



FAKULTÄT BAU GEO UMWELT
LEHRSTUHL FÜR WERKSTOFFE UND WERKSTOFFPRÜFUNG IM BAUWESEN

Beurteilung der Gebrauchseigenschaften von Asphaltmörtel mit dem Dynamischen Scherrheometer

Johann Eicher

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Bau Geo Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Stephan Freudenstein

Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen
2. Prof. Dr. techn. Ronald Blab

Die Dissertation wurde am 12.07.2018 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt am 06.11.2018 angenommen.

Kurzfassung

Die Gebrauchseigenschaften von Asphalt, wie Verdichtbarkeit, Verformungsbeständigkeit und Ermüdungsresistenz, werden maßgeblich durch die Eigenschaften des Asphaltmörtels beeinflusst. An der Technischen Universität München wurde in einem Forschungsprojekt ein Ansatz gesucht, der es ermöglichen sollte, anhand neuer Untersuchungen des Asphaltmörtels Kenntnisse über dessen Gebrauchseigenschaften zu erhalten. Über experimentelle Ansätze wurde dabei das aus den Bindemitteluntersuchungen bekannte Prüfverfahren zur Untersuchung der rheologischen Eigenschaften mittels Dynamischem Scherrheometer auf die Prüfung des Asphaltmörtels übertragen. Die Ergebnisse erlauben auf Basis rheologischer Kenngrößen von Asphaltmörtel Rückschlüsse auf dessen Gebrauchseigenschaften. Das im Rahmen des Forschungsprojekts entwickelte Verfahren liefert bedeutsame Grundlagen für Anpassungen und Optimierungen von Asphaltrezepturen und trägt damit zu einer deutlichen Verbesserung der Asphaltbauweise bei.

Abstract

The performance characteristics of asphalt are compactability, deformation resistance and fatigue resistance. These characteristics are significantly influenced by the properties of the asphalt mortar. At the Technische Universität München, a research project was looking for an approach that would enable to gain knowledge about its performance characteristics by means of new tests on asphalt mortar. Using experimental approaches, the test method known from the binder investigations to examine the binder's rheological properties by dynamic shear rheometer was transferred to the testing of the asphalt mortar. On the basis of rheological characteristics of asphalt mortar, the results permit conclusions to be drawn on its performance characteristics. As this approach evolves, the process developed in the research project provides meaningful groundwork for adjustments and optimizations of asphalt formulations. Thus, the asphalt constructions will be improved significantly.

Vorwort

„Vorstellungskraft ist wichtiger als Wissen“

Albert Einstein

Der Mensch hat die wunderbare Gabe, Dinge wahrzunehmen, sich Zusammenhänge vorzustellen und diese auch bei Bedarf kritisch zu hinterfragen. Für die Weiterentwicklung von Technologien, von Wissen und von Können ist es in der Gesellschaft wichtig, das Hinterfragte weiterzudenken, mit dem Ziel, bedarfsgerechte Lösungsansätze zu finden und somit Sachverhalte weiterzuentwickeln.

Dieser Verpflichtung wurde ich mir im ersten Jahr meiner beruflichen Tätigkeit am Staatlichen Bauamt Passau bewusst, wo ich als Abteilungsleiter neben Planung und Straßenverwaltung mitunter für den Bau und den Betrieb von Straßen zuständig war. Ich bin den erfahrenen Bauleitern am Bauamt dankbar, dass sie mich auf viele negative Beobachtungen im Asphaltbau hingewiesen haben und von mir zugleich dafür Erklärungen erwartet haben. Als junger Ingenieur kam mir damit sehr früh eine spannende Aufgabe zu, der ich mich unbedingt stellen wollte. Wissen reifte heran. Ich bin auch den Verantwortlichen der Bayerischen Bauverwaltung dankbar, die es mir ermöglicht haben, auf meiner Suche nach Ursachen etwaiger Entwicklungen im Asphaltbau die wissenschaftliche Tätigkeit aufzunehmen und mich dabei unterstützt und mir immer vertraut haben. Ganz besonders dankbar bin ich den mir in fachlichen Fragen zur Seite gestandenen Kollegen aller Facetten der Baustoffprüfung am Centrum für Baustoffe und Materialprüfung der Technischen Universität München. Auch dass sie mich als externen Wissenschaftler freundlich aufgenommen haben und mir ein selbständiges und kreatives Arbeiten ermöglicht haben. Namentlich nennen möchte ich meinen fachlich kaum zu übertreffenden Betreuer Dr.-Ing. Thomas Wörner und den Institutsleiter Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen, der zugleich mein Doktorvater war. Ohne die gewissenhaften Laboranten, ohne deren praktisches Wissen zu Baustoffen und ohne deren Geschick wäre diese wissenschaftliche Arbeit nicht möglich gewesen. Die überwiegende Laborarbeit wurde von Bernd Bollmann ausgeführt, aber allen anderen Beteiligten gebührt ebenso großer Dank.

Johann Eicher, im Juli 2018

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	3
Abstract.....	4
Vorwort.....	5
Inhaltsverzeichnis.....	6
Abkürzungsverzeichnis	10
0 Motivation – Idee – Ziel	12
1 Grundlagen	15
1.1 Ausgangslage	15
1.1.1 Schäden und deren Wirkung	15
1.1.2 Gebrauchseigenschaften von Asphaltmörtel.....	16
1.1.3 Erste Lösungsansätze	17
1.2 Baustoff Asphalt	17
1.2.1 Bitumen	17
1.2.2 Gesteinskörnungen.....	18
1.2.3 Modellbildung für Asphalt.....	20
1.3 Literaturstudie, Stand von Wissenschaft und Forschung	22
1.3.1 Literaturstudie Bitumen	22
1.3.2 Literaturstudie Füller	24
1.3.3 Literaturstudie feine Gesteinskörnungen.....	26
1.3.4 Literaturstudie Asphaltmastix und Asphaltmörtel	28
1.3.5 Literaturstudie rheologische Prüfverfahren.....	28
1.3.6 Literaturstudie zur Notwendigkeit ganzheitlicher Prüfverfahren.....	30
1.3.7 Stand von Wissenschaft und Forschung.....	31
2 Entwicklung des Prüfverfahrens	32
2.1 Rheologie und Rheometrie.....	32
2.1.1 Rheologische Modelle für Bitumen und Asphalt.....	32
2.1.2 Anwendungsbereiche rheologischer Verfahren.....	39
2.1.3 Übertragung der Rheologie auf Asphaltmörtel	46
2.1.4 Funktionsweise des Dynamischen Scherrheometers.....	47

2.2	Erfahrungen aus Bitumenuntersuchungen	50
2.3	Modifizierte Prüfeinrichtung für Asphaltmörtel	51
2.3.1	Prüfparameter.....	51
2.3.2	Beschreibung der Prüfeinrichtung	56
2.4	Statistik und Ausreißerprüfung	57
2.4.1	Statistik.....	57
2.4.2	Ausreißerprüfung.....	58
3	Untersuchung von Asphaltmörtel.....	62
3.1	Auswahl von Rezepturen und Varianten.....	62
3.1.1	Allgemeines	62
3.1.2	Komponente Bitumen	62
3.1.3	Komponente Füller	63
3.1.4	Komponente feine Gesteinskörnungen	64
3.1.5	Variantenbildung und Prüfmatrix.....	65
3.2	Verifizierung und Darstellung der Ergebnisse.....	67
3.2.1	Verifizierung der Ergebnisse.....	67
3.2.2	Darstellung der Ergebnisse.....	68
3.3	Bewertung und Interpretation der Ergebnisse.....	69
3.3.1	Bewertungsmethodik	69
3.3.2	Bewertung der Streckenrezepturen	72
3.3.3	Bewertung der Varianten	75
3.3.4	Zusammenfassung der Einzelanalysen	109
3.4	Vergleich mit Ergebnissen aus Asphaltuntersuchungen	112
3.4.1	Allgemeines	112
3.4.2	Forschungsprojekt Performance-relevante Asphalteeigenschaften	112
3.4.3	Zusammenstellung der relevanten Prüfergebnisse	113
3.4.4	Gegenüberstellung der Ergebnisse.....	117
3.4.5	Bewertung der Gegenüberstellung	119
4	Zusammenfassung.....	122

4.1 Allgemeines.....	122
4.2 Bewertung und Beurteilung des Prüfverfahrens	124
4.3 Optionen und weiterer Forschungsbedarf.....	125
4.4 Ausblick.....	127
Literaturverzeichnis	128
Anhang.....	137

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen von Begriffen

AL	Arbeitsanleitung
B	(Straßenbau-) Bitumen
BBR	Bending Beam Rheometer
DBM	Diabasmehl
DSR	Dynamisches Scherrheometer
EF	Eigenfüller
EP	Erweichungspunkt (Ring und Kugel)
EXCEL	Tabellenkalkulationsprogramm der Fa. Microsoft
fGK	feine Gesteinskörnungen
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.
gGK	grobe Gesteinskörnungen
KSM	Kalksteinmehl
MSCR	Multiple Stress Creep and Recovery (Prüfung)
PmB	polymermodifiziertes Bitumen
RAMST	Rheologischer Asphaltmörtel Setting Test
SHRP	Strategic-Highway Research Programm
SMA	Splittmastixasphalt
TL	Technische Lieferbedingungen
TP	Technische Prüfvorschrift
T-Sweep	Temperatur-Sweep

Verwendete Formelzeichen

D	(Platten-) Durchmesser
d	Spannweite
E	Elastizitätsmodul
f	Frequenz
G^*	Komplexer Schermodul
G'	Speichermodul
G''	Verlustmodul
h	(Platten-) Abstand
M	Drehmoment
P	Statistische Sicherheit
r	(Platten-) Radius
R^2	Bestimmtheitsmaß in der Statistik
s	(Platten-) Auslenkung am äußeren Rand
s	empirische Standardabweichung
t	Zeit
V	Variationskoeffizient
\bar{x}	arithmetischer Mittelwert
α	Verdrehwinkel
δ	Phasenverschiebungswinkel
ε	Dehnung
γ	Verformung
λ	Zugviskosität

μ	Mittelwert
π	Kreiszahl Pi
σ	Spannung
σ	Standardabweichung
τ	Scherspannung
ω	Winkelgeschwindigkeit

Indizes

a	(statistisch) kritische Spannweite
Burgers	nach dem Burgers-Modell
el	elastisch
konst	Konstant
max	maximal
Maxwell	nach dem Maxwell-Modell
min	minimal
RuK	Ring und Kugel
V.-K.	nach dem Voigt-Kelvin-Modell
vis	viskos

Einheiten

$^{\circ}$	(Winkel-) Grad
$^{\circ}\text{C}$	(Temperatur-) Grad Celsius
μm	Mikrometer
cm	Zentimeter
cm^2/g	Quadratcentimeter pro Gramm
g/cm^3	Gramm pro Kubikcentimeter
Hz	Hertz
K	Kelvin
kPa	Kilopascal
mm	Millimeter
mNm	Milli-Newtonmeter
MPa	Megapascal
Nm	Newtonmeter
Pa	Pascal
rad	Bogenwinkel, Radiant
s	Sekunden

0 Motivation – Idee – Ziel

„Straßen sind das Rückgrat unserer mobilen Gesellschaft. Mobilität prägt die Gegenwart und die Zukunft unserer Gesellschaft. Wir brauchen deshalb ein modernes Verkehrsnetz mit intakter Straßeninfrastruktur, um steigenden Anforderungen der Menschen, der Wirtschaft und der Natur gerecht zu werden. Die Politik muss die Weichen dafür stellen, dass Deutschland mobil bleibt und bleiben kann. Dazu muss Mobilität bezahlbar bleiben.“, so ein Slogan des Verbandes PRO MOBILITÄT.

Diese Feststellung besitzt in Deutschland große Gültigkeit, jedoch mit der Einschränkung, dass es nicht alleine Aufgabe der Politik ist, sich um die Straßen zu kümmern oder auch darum, dass Mobilität und die Infrastruktur in Form von Straßen bezahlbar bleibt – nein, es geht alle an, die in diesem Umfeld Verantwortung tragen, begonnen bei Wissenschaft und Forschung, weiter über die verschiedenen Bauverwaltungen, hin zu den Baufirmen und Prüfstellen und letztlich auch die Rohstofflieferanten. Sich nur mit dem Vorhandensein von Straßen zufrieden zu geben ist nicht mehr ausreichend. Wir müssen mehr denn je auch an die Zukunft denken, an die Schonung von Ressourcen, an Auswirkungen unseres Handelns für Natur und Umwelt, an Nachhaltigkeit.

Im Jahr 2009 haben das damalige Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung und die Spitzenverbände der Deutschen Bauwirtschaft eine „Innovationsoffensive Straßenbau“ gestartet. Auch diesen Überlegungen lag die Erkenntnis zugrunde, dass die Anforderungen an die Mobilität und damit an die Verkehrsinfrastruktur ständig steigen und die Straße die Hauptlast des Güter- und Personenverkehrs trägt. Alle Prognosen deuteten auf weitere Zunahmen des Straßenverkehrs hin. Es erwuchs die Erkenntnis, dass, um dieser Herausforderung gewachsen zu sein, die Straßen leistungs- und zukunftsfähig gestaltet werden müssen. Es gelte neue, innovative Wege im Straßenbau zu gehen und dabei alle Potenziale bautechnischer und unternehmerischer Art sowie des Verwaltungshandelns intensiv zu nutzen, so die damalige Argumentation. Die Entwicklung und Erprobung neuer Technologien, Bauweisen und Bauverfahren sollte dabei angeregt werden. Ein besonderes Augenmerk sollte dabei angesichts der zu erwartenden Verkehrszunahme und -beanspruchung auf der Dauerhaftigkeit der Straßenkonstruktion liegen, die es zu verbessern gälte, um den Erhaltungsaufwand zu reduzieren.

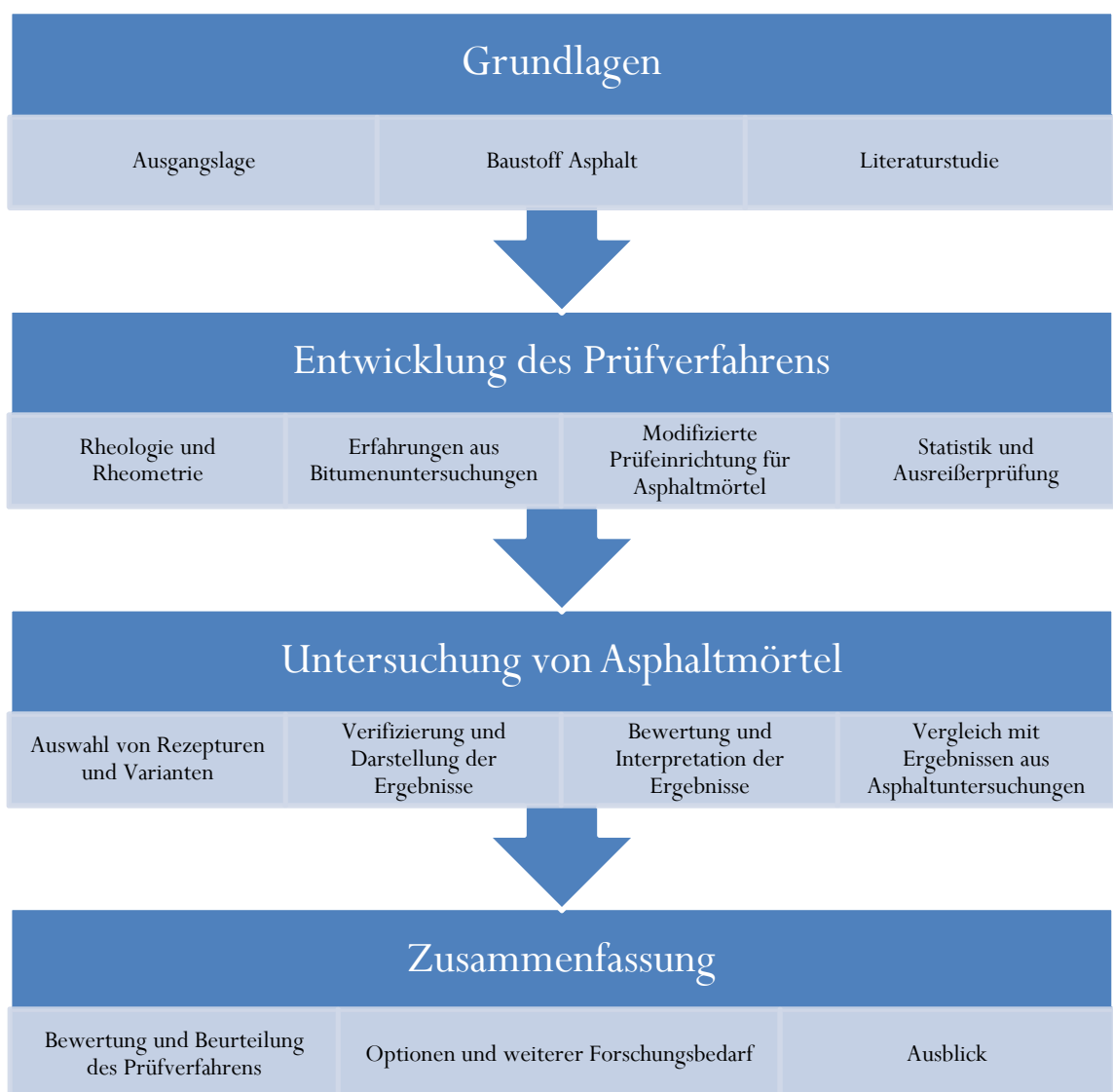
Aus Sicht eines Bauherren, der zu diesem Zeitpunkt bereits zunehmende Probleme mit der Zunahme der Verkehrslasten und sich deutlich verkürzende Sanierungsintervalle erkennen musste, das einzig richtige Signal an alle Beteiligten.

Es steht also fest: Der Bedarf an leistungsfähigen Straßen wird weiter steigen, ebenso die Verkehrs- und Achslasten. Die Straßen der letzten Generation werden diesen Anforderungen oft nicht mehr gerecht.

Dies wirft die Frage auf, warum unsere Straßen die angestrebte Lebensdauer nicht mehr erreichen. Weitaus wichtiger ist es jedoch zu klären, wie Straße und Asphalt künftig konzipiert werden können, um den benötigten Anforderungen gerecht zu werden. Diese Arbeit beschäftigt sich mit ebendieser Thematik und wird geeignete Lösungsansätze bieten.

Das Ziel dieser wissenschaftlichen Arbeit ist es, über methodisches Suchen nach neuen Erkenntnissen durch empirisches Erarbeiten von praxisrelevanten Ansätzen, das aktuelle Fachwissen zu erweitern.

Die Vorgehensweise ist in der folgenden Grafik dargestellt.



Auf diese Weise soll eine neue Grundlage für ein unabhängiges Verfahren zur Ermittlung von performance-basierten Kennwerten von Asphaltmörteln erarbeitet werden, was besonders wichtig erscheint, da sich die Prüfung einzelner Parameter oder einzelner Baustoffkomponenten in der Vergangenheit als nicht mehr ausreichend qualitätssichernd erwiesen hat. Die Notwendigkeit einer neuen Basis für Prüfungen an Asphaltmörteln ergibt sich schlussendlich auch aus der Praxiserfahrung.

Zur Sicherstellung der Praxisrelevanz wurden für die Untersuchungen Asphaltmörtel, wie sie in realen Asphaltrezepturen enthalten sind, verwendet. Diese Grundrezepturen wurden dann in einer Variantenanalyse weiterentwickelt, um die Einflussnahme der einzelnen Mörtelkomponenten darstellen zu können. Die Arbeit schließt mit einer Gegenüberstellung der Ergebnisse aus der Asphaltmörteluntersuchung und der Ergebnisse aus Untersuchungen an daraus hergestellten Asphalten ab.

Diese wissenschaftliche Arbeit kann aufgrund der theoretischen Vielschichtigkeit des Themas Asphalt nicht vollumfänglich alle Detailfragen beantworten – dies ist auch nicht die verfolgte Zielrichtung des Verfassers – sondern soll eine neue und wichtige Grundlage für eine neue Prüfmethodik schaffen. Auf Grundlage der Prüfmethode ist dann die Erarbeitung eines Bewertungshintergrundes möglich, mit dessen Hilfe die Asphaltkonzeption erheblich unterstützt werden kann.

1 Grundlagen

1.1 Ausgangslage

1.1.1 Schäden und deren Wirkung

Das deutsche Straßennetz weist in nicht unerheblichem Ausmaß technische Defizite und Schäden auf. Dies muss trotz umfassenden Wissens zur Entwicklung der Verkehrszahlen und der Verkehrslasten auf deutschen Straßen, trotz systematischer Zustandserfassung und -bewertung und trotz der nachgewiesenen Kenntnisse bezüglich des Finanzierungsbedarfs für eine angemessene Erhaltungsstrategie festgestellt werden. Wie auch in den benachbarten Ländern Österreich, Frankreich, Niederlanden und Schweiz handelt es sich bei den aufgetretenen Schäden um Risse, Kornausbrüche und Spurrinnen.

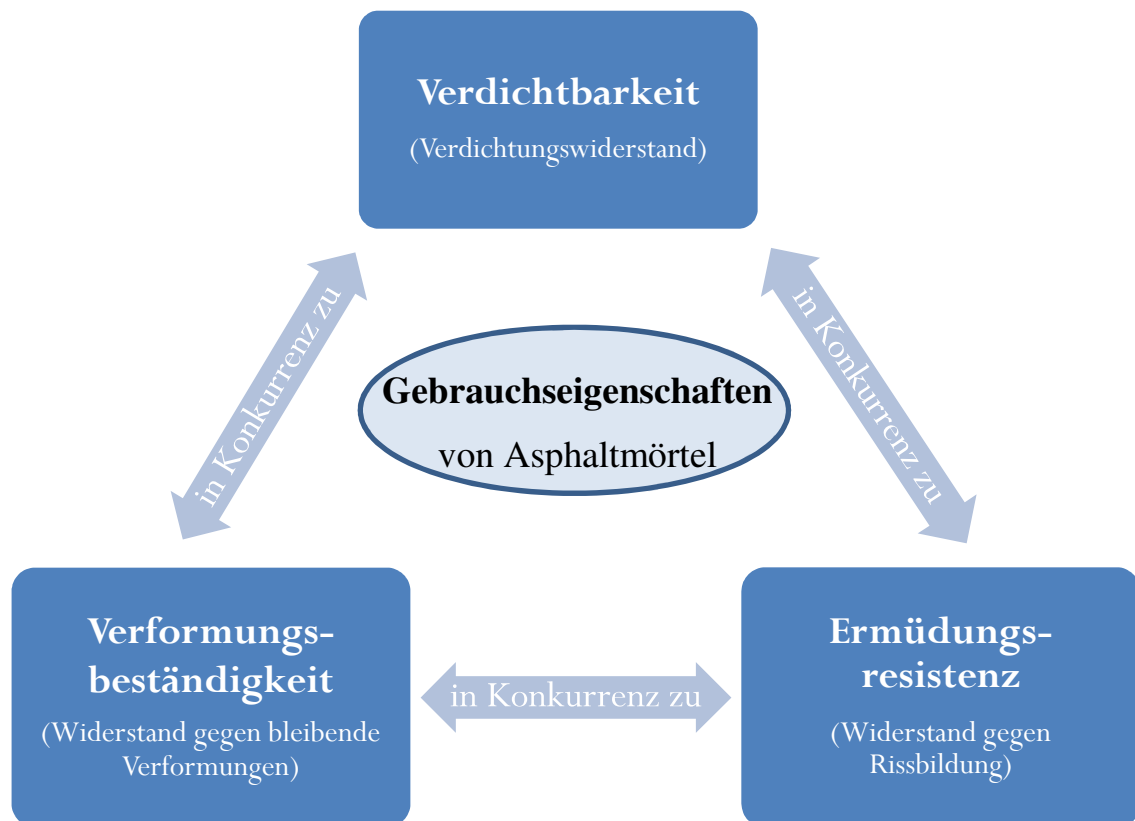
Unabhängig davon, welche Schäden vorliegen und welchen Ursachen die Schäden unterliegen, ist festzustellen, dass jeder Schaden einen Auslöser für weitere Schäden darstellt. Bei Rissen und zu offenporigem Gefüge führt das Eindringen von Wasser, Licht und Sauerstoff zu einer beschleunigten Alterung der Asphaltkomponente Bitumen, wodurch die Rissbildung wiederum zusätzlich gefördert wird. Eindringendes Wasser ist in der Lage, gesamte Asphaltoberbauten durch den so genannten „stripping-Effekt“ aufzulösen und damit die Tragfähigkeit des Oberbaus allmählich, aber erheblich zu reduzieren. Verformungen gefährden Verkehrsteilnehmer durch Unebenheiten und Aquaplaning, führen aber auch zu verstärkten Auswaschungen und Infiltration der Deckschicht bei Überrollung des dort andauernd vorhandenen Wasserfilms. Eine frühzeitige Erhaltungsmaßnahme und die rechtzeitige Behebung von Oberflächenschäden sind in jedem Fall erforderlich, um Kosten, Sperrzeiten und den volkswirtschaftlichen Schaden insgesamt so gering wie möglich zu halten. Eine nachhaltige Bewirtschaftung des Straßennetzes ist von besonders hoher Bedeutung. Dazu zählen auch die Auswahl einer geeigneten Bauweise und die bestmögliche, auf den Einzelfall bezogene Materialkombination.

Es ist zu beobachten, dass selbst auf neuen Strecken nach bereits wenigen Jahren unregelmäßige Risse auftreten. Andererseits gibt es Deckschichten, die gegenüber Verformungen anfällig sind. Denkbar wäre dabei, dass die erforderliche Verdichtungsleistung nicht immer zielsicher eingebracht werden konnte. Zu hohe Hohlraumgehalte, aber auch die so genannten „Nachtrockner“ weisen frühzeitig darauf hin. Diese Sachverhalte waren letztlich der Auslöser für eine genauere Betrachtung einzelner Asphaltgemische im Rahmen dieser Arbeit.

1.1.2 Gebrauchseigenschaften von Asphaltmörtel

Das Baustoffgemisch Asphalt erhält seine wesentlichen Eigenschaften aus dem Zusammenwirken seiner Komponenten. Da dabei insbesondere die Gebrauchseigenschaften des Asphaltmörtels eine große Rolle spielen, werden diese im Rahmen der folgenden Untersuchung näher betrachtet. Diese werden in diesem Zusammenhang durch die Parameter Verdichtbarkeit, Verformungsbeständigkeit und Ermüdungsresistenz beschrieben. Wie die nachstehende grafische Darstellung zeigt, stehen diese Parameter in gegenseitiger Konkurrenz zueinander. Daher ist die Kenntnis hinsichtlich deren Ausprägung im Asphaltgemisch bzw. im Asphaltmörtel besonders wichtig.

Abbildung 1.1: Darstellung der konkurrierenden Gebrauchseigenschaften von Asphaltmörtel und Asphalt



Die Parameter Verdichtbarkeit, Verformungsbeständigkeit und Ermüdungsresistenz nehmen Einfluss auf die übergeordneten Anforderungen an Asphaltbefestigungen wie Verkehrssicherheit, Dauerhaftigkeit und Wirtschaftlichkeit. Gelingt es, die Gebrauchseigenschaften von Asphaltmörtel zielgerichtet zu optimieren, können mit einer anforde-

rungsgerechten Mischgutrezeptur unter anderem auch besonders robuste und Fehler verzeihende Asphalte in Hinblick auf Herstellung und Einbau konzipiert werden.

1.1.3 Erste Lösungsansätze

Ausgelöst durch die Beobachtungen der zahlreichen Schäden an Fahrbahnbefestigungen aus Asphalt wird seit mehreren Jahren in Gremien auf nationaler sowie auf internationaler Ebene das Themenfeld der Asphaltqualität behandelt. Erste Ansätze führten in den vergangenen Jahren zu Überarbeitungen der deutschen Vertragsregelwerke im Asphaltstraßenbau. Anpassungen einzelner Anforderungen bedeuten letztlich immer eine Gratwanderung im Spannungsfeld zwischen Wirtschaftlichkeit und Qualität. Ziel sollte immer sein, für den jeweiligen Anwendungsfall unter Berücksichtigung von Steigung, Höhenlage, Temperatur, Verkehrsbelastung, Exposition, Untergrundbeschaffenheit etc. das ideale Mischgut für die prognostizierten Verkehrslasten zur Verfügung zu stellen.

1.2 Baustoff Asphalt

Die Technischen Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen (TL Asphalt-StB) [TL Asphalt 2007] definieren Asphalt als homogene Mischung, die üblicherweise aus groben und feinen Gesteinskörnungen, Füller und bitumenhaltigem Bindemittel besteht und zur Herstellung einer (Fahrbahn-) Befestigung verwendet wird. Es gibt bei dieser Anwendung auch Asphaltvarianten, die Faserstoffe oder Zusätze wie Gummipartikel, Polymere, Wachse oder farbgebende Pigmente beinhalten. Die Eigenschaften der Baustoffkomponente Bitumen verleihen dem Asphalt ein temperaturabhängiges Verhalten zwischen elastisch und viskos. Innerhalb der Gebrauchstemperaturen, diese liegen in Deutschland zwischen -20 °C und $+50\text{ °C}$, stellt sich Asphalt als weitgehend steif dar. Dennoch vermag Asphalt Spannungen in einem begrenzten und materialabhängigen Umfang abzubauen. Dies erfolgt durch das spezifische Relaxationsvermögen unter Nutzung der viskosen Eigenschaft des Bitumens. Insbesondere dadurch kommt dem Asphalt als Baustoff für große, zusammenhängende Flächen eine besondere Bedeutung zu.

1.2.1 Bitumen

Bitumen ist ein schwerflüchtiges, dunkelfarbiges Gemisch unterschiedlicher, überwiegend organischer Substanzen, das bei der Destillation des Rohöls in einer Raffinerie gewonnen wird. Die organischen Substanzen bestehen aus Kohlenwasserstoffverbindungen unterschiedlichster chemischer Formen und Wertigkeiten. Unter Zusammenfas-

sung spezifischer Stoffgruppen besteht Bitumen aus Asphaltenen und Maltenen, wobei letztere sich aus Paraffinen, Aromaten und Harzen zusammensetzen. Modellhaft bilden die Maltene eine Matrix aus niedrigmolekularen Harzen und Aromaten, in der neben Paraffinen Mizellen aus in Mänteln aus hochmolekularen Harzen und Aromaten eingebetteten Asphaltenen schwimmen. Es handelt sich dabei um eine homogene Dispersion, in der die Mizellen hauptverantwortlich für das Steifigkeitsverhalten des Gemisches sind. Aufgrund der Vielzahl an Bestandteilen organischen und anorganischen Ursprungs bei der Genese seines Grundstoffes Erdöl wird Bitumen häufig als „Tausendstoffgemisch“ bezeichnet, was schon auf seine hohe Komplexität hinweist. Einflüsse auf die Eigenschaften des Bitumens ergeben sich aus der Rohölprovenienz, dem Ablauf sowie der Intensität der Fraktionierung, sowie aus ggf. nachgeschalteten Verfahrensschritten, wie Verschneiden („Blenden“) oder Oxidieren („Anblasen“). Damit können die im Straßenbau eingesetzten Bitumensorten mit den verschiedenen Anforderungsspannen für die Penetration und den Erweichungspunkt Ring und Kugel erreicht werden. Über dies hinaus kann durch Zugabe von Polymeren oder anderer Substanzen und Stoffe eine Verbesserung spezifischer Eigenschaften erfolgen. Die Herstellung von polymermodifiziertem Bitumen (PmB) erfolgt in einer separaten Anlage entweder durch chargenweise Herstellung großer Mengen („batch“) in mehreren Reifestufen oder in Durchlaufprozessen („inline-Verfahren“) direkt bei Befüllung des Tanklastwagens, der das Bindemittel anschließend zur Asphaltmischanlage liefert. Neben der zur Verwendung kommenden Art der Polymere nimmt auch die Art der Polymerisierung des Bitumens Einfluss auf dessen Qualität. Mit [Hase 2011] und [Hase 2017] liegen zwei Forschungsberichte zum Einfluss von Qualitätsunterschieden polymermodifizierter Bindemittel gleicher Sorte auf das mechanische Verhalten von Asphalt vor. Darin ist nachgewiesen, dass Bitumen gleicher Art und Sorte aus unterschiedlichen Herstellorten mit offensichtlich unterschiedlichen Herstellungsverfahren, im Asphalt signifikant unterschiedliche Wirkungen zeigt. Da polymermodifizierte Bitumen im Straßenbau gerade auch für besondere Beanspruchungen zum Einsatz kommen, ist eine möglichst genaue Kenntnis deren Einflusnahme auf die Gebrauchseigenschaften des Asphaltmörtels unerlässlich.

1.2.2 Gesteinskörnungen

Gesteinskörnungen als mineralischer Zuschlag im Asphalt werden nach den Technischen Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TL Gestein-StB) in die Größenkategorien Füller, feine Gesteinskörnungen (fGK) und grobe Gesteinskörnungen (gGK) aufgeteilt.

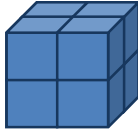
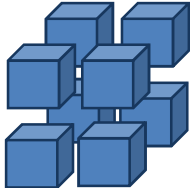
Die Trennung der Kornfraktionen findet nach [TL Gestein 2004] statt bei:

Korngröße [mm]	Bezeichnung
0 – 0,063	Füller
0,063 – 2,0	feine Gesteinskörnungen (fGK)
> 2,0	grobe Gesteinskörnungen (gGK)

Die Obergrenze des Größtkorns der zur Anwendung kommenden Gesteinskörnungen ist durch die Rezeptur für den angestrebten Verwendungszweck definiert. Die Bandbreite reicht dabei von 5,6 mm bei feinkörnigen Asphaltdeckschichten bis zu 32,2 mm bei Asphalttragschichten. Die mineralogische Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemisches ist für den Verwendungszweck im Asphaltbau nicht unmittelbar definiert. Aufgrund einzelner Anforderungen wie Frostbeständigkeit, Wasserempfindlichkeit, Polierresistenz oder Kornfestigkeit ergeben sich jedoch vom Verwendungszweck abhängige Anforderungen. Aus ökonomischen und ökologischen Gründen werden in der Regel möglichst die nahe einer Asphaltmischanlage vorkommenden Gesteinskörnungen verwendet.

Die Partikel von Füller, fGK und gGK wirken im Asphaltgemisch mit unterschiedlicher Art und Intensität. Neben der Porosität der gesteinspezifischen Oberfläche ist vor allem auch das Maß der Oberfläche eine maßgebende Größe. In einer kurzen Betrachtung wird die Einflussnahme der unterschiedlichen Oberflächen der einzelnen Fraktionen hinsichtlich deren Flächenanteile verdeutlicht.

Tabelle 1.1: Schematischer Zusammenhang zwischen Korngröße und Kornoberfläche

Korngröße	Einfache Sieböffnung (Referenzdurchmesser)	Halbe Sieböffnung (halber Referenzdurchmesser)
Schematisches Korn		
Oberfläche	A = 100%	A = 200%

Die Halbierung der Kantenlängen eines kubischen Körpers entspricht idealisiert einer Verdoppelung der freien Oberfläche. Erfahrungsgemäß besitzen gGK mit 2,0 bis 8,0 mm Korndurchmesser einen Mittelwert von ca. 5,0 mm, die fGK mit 0,063 bis 2,0 mm Korndurchmesser einen Mittelwert von ca. 1,3 mm und Füller mit 0 bis 0,063 mm Korndurchmesser einen Mittelwert in der Größenordnung von ca. 0,03 mm.

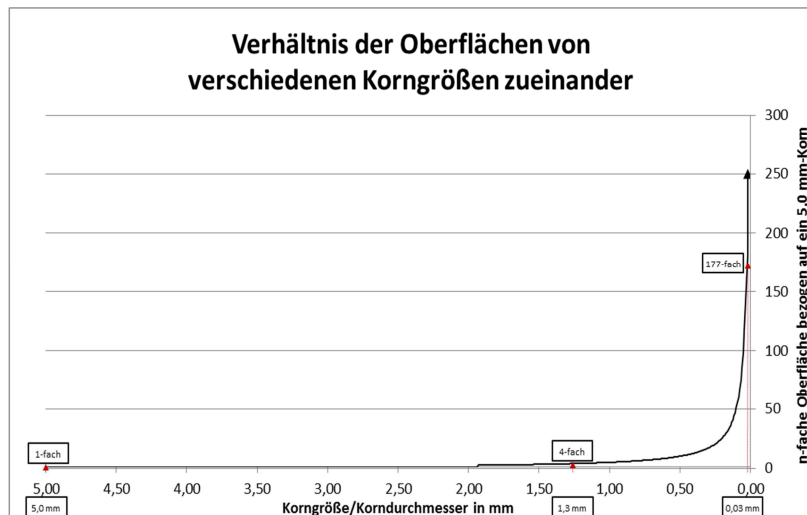


Abbildung 1.2:
Diagramm zur Darstellung des Oberflächenzuwachses bei Verkleinerung der Korndurchmesser

Abbildung 1.2 stellt den exponentiellen Zuwachs der Oberfläche und damit auch des Oberflächenverhältnisses in Bezug auf den mittleren Korndurchmesser der gGK bei Verkleinerung der Korndurchmesser dar. Hieraus kann abgeleitet werden, dass eine massengleiche fGK etwa eine 4-fache Oberfläche und massengleicher Füller eine 177-fache Oberfläche im Vergleich zur gGK aufweist. Füller weist in dieser Abschätzung im Vergleich zur fGK etwa eine 44-fache Oberfläche auf. Es wird deutlich, dass der Betrachtung der Wirkung von fGK und insbesondere des Füllers im Asphaltmörtel eine sehr hohe Bedeutung beigemessen werden muss.

1.2.3 Modellbildung für Asphalt

Am „Christian-Doppler-Labor für gebrauchsvorhaltensorientierte Optimierung flexibler Straßenbefestigungen“ der Technischen Universität Wien wurde, wie in [Blab 2005] beschrieben, mit dem so genannten Mehrskalenmodell des Asphaltes nach [Jäger 2004] ein neuer Betrachtungsansatz entwickelt. Bei diesem Modell wird das Baustoffgemisch Asphalt in fünf Ebenen (scales) abstrahiert, mit dem Ziel, einzelne Ebenen besser verifizieren zu können und die Bewertungsmerkmale mittels geeigneter Schemen über ein Homogenisierungsverfahren auf eine andere Ebene zu übertragen. Beim so genannten „Upscaling“-Prozess werden die an einer bestimmten Ebene ermittelten mechanischen Eigenschaften auf die nächsthöhere Ebene transferiert. Voraussetzung ist, dass eine Homogenisierung gelingt. Ist dies der Fall, können durch Bewertungsverfahren einzelner Ebenen Prognosen zu Eigenschaften auf anderen Ebenen, bis hin zur Fahrbahn generiert werden. Über dieses Modell könnten zahlreiche bislang bekannte Performance-Prüfverfahren dazu beitragen, den Asphalt besser zu beschreiben. Die Ebenen im Mehrskalenmodell (Abbildung 1.3) werden wie in Tabelle 1.2 beschrieben, definiert:

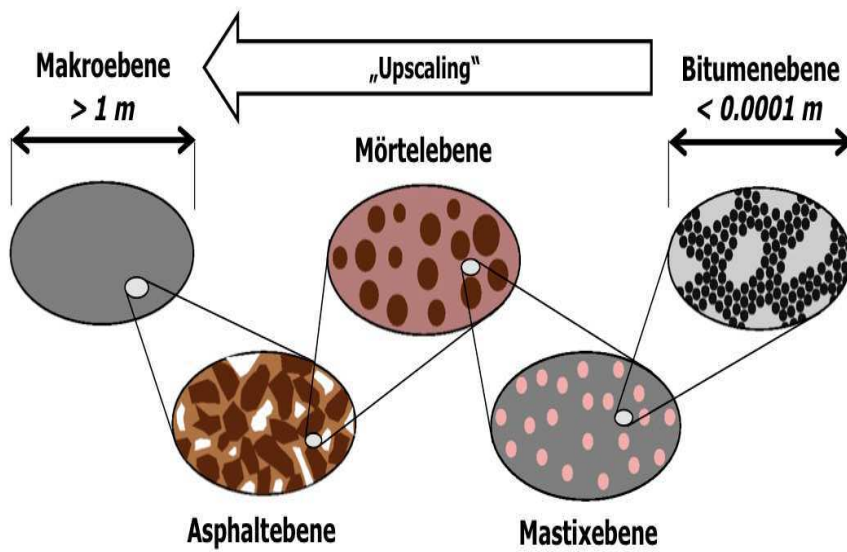


Abbildung 1.3: Mehrskalensmodell zur Beschreibung des Asphaltens über fünf Ebenen. [Blab 2005]

Tabelle 1.2: Ebenen des Mehrskalensmodells mit Bestandteilen und Beschreibung

Ebene (scale)	Beschreibung, Bestandteile
Bitumenebene	Asphaltene, Maltene (Harze, Aromaten, Paraffine), Polymere, Wachse, chem. Zusätze, mineralische Partikel, gelöster Gummi
Mastixenebene	Bitumen, Füller, Fasern, mineralische Zusätze
Mörtelebene	Mastix, feine Gesteinskörnungen $\leq 2,0$ mm, Gummipartikel
Asphaltenebene	grobe Gesteinskörnungen $> 2,0$ mm, Mörtel, Hohlräume
Makroebene	Kontinuum, Fahrbahn, Verkehrsfläche

Die in Abbildung 1.3 dargestellte abstrakte Trennung der Ebenen kann nur eine theoretische Hilfskonstruktion zur Herauslösung bestimmter Eigenschaften, für die Prüfungen möglich sind, darstellen. Denn betrachtet man beispielsweise die Bitumenebene und die Mastixenebene, so stellt man fest, dass Füllerpartikel geringere Größen aufweisen können als die Mizellen des Bitumens. In der Mörtelhypothese stellt [Pippich 1981] schon lang vor dem Mehrskalensmodell fest, dass in der Bitumenebene Füllerpartikel im Grunde wie die größten Mizellen von Bitumen betrachtet werden müssen. Andererseits können auch Polymerstrukturen wiederum Netze ausbilden, die ihrerseits größere Strukturen aufweisen als Partikel des Füllers. Somit greifen die Wirkungen der einzelnen Ebenen ineinander, die Ebenen interagieren. Auch spielen auftretende Effekte wie „Schwimmen“ und „Berühren“ von Partikeln im Bitumen eine große Bedeutung hinsichtlich der sich im Mörtel einstellenden Viskosität oder hinsichtlich der Widerstandsfähigkeit oder Festigkeit des daraus entstehenden Asphaltens. Es sollte daher unbedingt eine Betrachtung

tung des Gemisches am Kontinuum, somit über die einzelnen Ebenen hinweg, erfolgen. Auch für den Fall, dass eine hochgradige Homogenisierung beim Mehrskalmodell nicht erreicht werden kann, da geeignete Transformationen nicht vorliegen, ist es besonders wichtig, dass Prüfverfahren über mehrere Ebenen hinweg zur Verfügung stehen. Gelingt es also, die bestimmenden Größen in Asphalt in ihrer Summe anzusprechen, werden aufwendige, theoretische, teils mit stark idealisierten Annahmen behaftete Transformationen weitgehend entbehrlich. Unter Anwendung einer Performance-Prüfung am Asphaltmörtel, ist der Upscaling-Prozess lediglich in die Asphaltebene und von dort aus auf die Makroebene (Asphaltfläche) erforderlich. Die Komplexität, Idealisierungen und Unsicherheiten können dadurch abgebaut werden.

1.3 Literaturstudie, Stand von Wissenschaft und Forschung

Die Berichte und Veröffentlichungen im Bereich des Asphaltbaus und der Asphalttechnologie befassen sich einerseits mit Anforderungen und Prüfverfahren, andererseits mit den einzelnen Eigenschaften bestimmter Asphaltkomponenten aber auch des gesamten Asphaltgemisches. Viele der Veröffentlichungen basieren auf Fragestellungen, die durch Mängel bzw. daraus resultierende Schäden ausgelöst wurden. Oft sind in den Veröffentlichungen Ansätze für neue Herangehensweisen erkennbar, die jedoch häufig zu weiteren offenen Fragen führen.

1.3.1 Literaturstudie Bitumen

Zahlreiche Wissenschaftler im In- und Ausland hatten sich mit der Analyse des Tausendstoffgemisches beschäftigt. Bis in die 1960er Jahre gehen bei [Neumann 1973] dessen eigene tiefgreifende Erkundungen zurück. Sein Ziel dabei war es, einen experimentellen Nachweis zu erbringen, dass es sich bei Bitumen um ein Kolloidsystem mit mehreren Phasen handelt. [Zenke 1990(I)] fasst über Jahrzehnte entstandene Forschungsergebnisse anschaulich zusammen und versucht dabei, die materialstrukturellen Ansätze der Chemiker in die Sprache der Ingenieure zu übersetzen. Er versucht die Frage der inneren Stoffstruktur auf materialorientierte Eigenschaften zu übertragen. Dabei werden Aspekte der Mikromorphologie mit rheologischen Stoffparametern wie Viskosität, Konsistenz und Scherempfindlichkeit in Beziehung gebracht. In einer umfangreichen Zusammenfassung des damaligen Standes der Wissenschaft und Forschung auf dem Gebiet von Erdöl und Bitumen im Bereich des Straßenbaus wird bei [Zenke 1991(II)] und [Zenke 1991(III)] insbesondere auf die Entstehung der Rohöle und die damit verbundenen materialstrukturellen Eigenschaften des Bitumens eingegangen. Im wissenschaftlichen Sinne werden dabei zwar spannende Erkenntnisse gewonnen, aber in der praktischen Nutzung des Baustoffes Bitumen erlangten diese noch keine direkte, maß-

gebende Bedeutung. Entscheidend war jedoch die Aussage, dass die Art der Asphaltene zwar erdölgeneetisch bedingt ist, sich jedoch auch raffinerietechnisch steuern lässt. Dies ist bedeutsam, da zugleich festgestellt wurde, dass das Alterungsverhalten von Bitumen entscheidend durch die Eigenschaften dieser Asphaltene bestimmt wird. Das Thema Alterung wird bei [Neumann 1992] und bei [Neumann 1995] behandelt. Dabei werden die verschiedenen Alterungsvorgänge der Verdunstungsalterung, auch destillative Alterung genannt, der Oxidationsalterung und der Strukturalterung gerade auch in Hinblick auf den Einsatz von Recycling-Bindemittel aufgegriffen. Dabei ist festzuhalten, dass auch polymermodifizierte Bindemittel altern und der Alterungsprozess irreversibel ist. Es wird dort beschrieben, dass der Endzustand der Alterung immer über ein Gel führt. Dieses verliert im Alterungsprozess fortschreitend an flüssiger, nicht koagulierter Phase. Dabei treten die koagulierten Kolloide näher zusammen und werden dichter gepackt, was mit einer geringen Volumenreduzierung einhergeht. Das Bitumen wird nach einer aktuellen Forschung an der Technischen Universität Wien, veröffentlicht bei einem Seminar durch [Blab 2014] härter, da sich durch äußere Einflüsse wie Sauerstoff und UV-Strahlung die niedrigmolekularen Aromaten und Harze aus der flüssigen, matrixbildenden Maltenphase in eine hochmolekulare Form verwandeln und sich in Folge dessen zur Wahrung des inneren Gleichgewichts in Richtung Mizelle (Asphalten) bewegen. Dadurch wird die Steifigkeit des Gemisches erhöht und die Elastizität und die Plastizität reduziert – das Bitumen versprödet. Allerdings stellt [Blab 2014] auch fest, dass dieser Prozess durch Erhitzen teilweise rückgeführt werden kann („healing“). In [Hirsch 2001] werden Eigenschaften und die Wirkungsweise polymermodifizierter Bitumen erörtert. Dabei ist die Art der Polymere, deren Gehalt und deren strukturelle Parameter von besonderer Bedeutung. Diese Parameter entziehen sich jedoch in der Regel ebenfalls der Kenntnis der Nutzer. Zwar können über relativ einfache physikalische Verfahren manche charakteristische Produkteigenschaften ermittelt werden, aber die spezifischen Asphalteigenschaften, insbesondere jene, die sich aus Wechselbeziehungen ergeben, lassen sich nicht hinreichend beschreiben. Offen blieb bis dato auch die Frage der konkreten Wirksamkeit des Bindemittels oder dessen Modifizierung in Hinblick auf den Widerstand gegen bleibende Verformungen und Rissbildung im Asphaltgemisch. Wie [Hirsch 2014] in seiner Abhandlung zu chemischen Untersuchungsverfahren zur Ansprache von Bitumen berichtet, ist der Ausspruch „Chemie bringt nichts!“ eine häufige Bemerkung in Zusammenhang mit der normativen Beschreibung von Bitumen. Auch ist in den aktuellen europäischen Normen nur noch eine Spezifizierung des Baustoffes auf performance-orientierten Verfahren vorgesehen. Gleichwohl sieht er für das Verständnis der physikalischen Eigenschaften die chemischen Prozesse und Einflüsse als elementar an. Er bezieht dies auf das Alterungsverhalten, auf das Haftverhalten, aber auch auf die rheologischen Eigenschaften des Bitumens. Letztere lassen sich nach seiner Erkenntnis mit entsprechendem Wissen über die Wechselwirkungen zwischen den Komponenten

und den einzelnen Stoffgruppen durchaus steuern. Nicht zuletzt durch Zugabe von Additiven und Polymeren wird dies auch in der Praxis bereits angewandt. Im Labor wurden dabei auch rheologische Bindemittleigenschaften durch verschiedene Zusammensetzung vorher isolierter Stoffgruppen variiert. Hilfreich sei die chemische Analyse jedoch wiederum nur unter „ganzheitlicher“ Betrachtung, welche aufgrund der supramolekularen Koordination relativ kompliziert ist. Nur dann ist nach [Hirsch 2014] die Chemie bei der Erklärung physikalischer Phänomene hilfreich.

1.3.2 Literaturstudie Füller

Im Zuge der Erforschung von Gesteinskörnungen, insbesondere des Füllers, gewinnt [Feix 1979] viele bis heute unangefochtene Erkenntnisse. Ein deutlicher Einfluss der feinen Gesteinskörnungen einschließlich Füller im Asphalt, wird dort mit Beobachtungen aus der Praxis und wissenschaftlichen Ansätzen fundiert herausgearbeitet. Seine Arbeiten, in denen Mörtel als Gemisch aus Bitumen, feiner Gesteinskörnung und Füller definiert ist, sind Basis für weitere Forschung auf diesem Gebiet. [Feix 1979] stellt am Mörtel wichtige Einflussgrößen auf Verdichtbarkeit und Verformungsbeständigkeit fest. Er beschreibt dabei die unterschiedlichsten Eigenschaften der Gesteinskörnungen wie Kornform, Kornabstufung, Feinstkornanteil, Oberflächeneigenschaften, Chemismus und deren Wirkung hinsichtlich Bindemittelversteifung und bringt sie mit den Mörtel-eigenschaften in Verbindung. Anhand von Felduntersuchungen kann er seine theoretischen Ansätze teilweise belegen. Neben der mineralogischen Zusammensetzung der Gesteine bringt [Feix 1979] auch die Art der Gewinnung (z.B. Abraummanagement, Zwischenlagen, Verwitterung) und Aufbereitung (Waschen, Vorabsiebung, Brecherart) in die Betrachtung mit ein und stellt dabei signifikante Zusammenhänge fest. Einflüsse, die sich für gewöhnlich den Kenntnissen der Baustoffanwender oder der Auftraggeber entziehen und die mit den praktizierten Prüfverfahren nicht angesprochen werden. Bedingungen, die vertraglich nicht geregelt sind, sich jedoch auch auf Eigenschaften späterer Asphalt-schichten nachweislich ganz erheblich auswirken. Er stellt auch den Fülleranteil und dessen Schwankungsbreite als ein wesentliches Qualitätsmerkmal der feinen Gesteinskörnungen dar. Bei [Suss 1982] wird die Eignung von verschiedenen Füllern für Asphaltbetondeckschichten hinsichtlich verschiedenster physikalischer und chemischer Eigenschaften untersucht. Dabei wurde auch auf Verfahren zurückgegriffen, die weit über die Verfahren wie die Korngrößenverteilung, die Rohdichtebestimmung oder die mineralogische Zusammensetzung einzelner Kornfraktionen hinausgehen. Man war damals auf der Suche nach Prüfverfahren, die den Füller möglichst praxisnah beschreiben sollten. Zugleich sollte dabei eine Aussage bezüglich der Anwendungsmöglichkeiten im Asphaltstraßenbau gewonnen werden. Auch die Wasserempfindlichkeit wurde dabei mit verschiedenen Verfahren angesprochen. Bei den ausführlichen Untersuchun-

gen musste jedoch vielfach festgestellt werden, dass Ergebnisse teilweise widersprüchliche Schlüsse auf Materialeigenschaften ergaben. Es stellte sich heraus, dass bekannte Gesteinseigenschaften der groben Gesteinskörnungen nicht ohne weiteres auf den Bereich des Füllers übertragen werden können. Auch die Ermittlung der Korngrößenverteilung nach Schlämmanalyse zeigte, dass die Ergebnisse aufgrund des Einflusses der verschiedenen Kornformen und aufgrund der Bildung von Konglomeraten nur eingeschränkt verwendet werden können. Es musste also erkannt werden, dass eine wirklichkeitsgetreue Korngrößenverteilung problematisch zu gewinnen ist. Ähnliches wird bei Betrachtung der Partikeloberfläche und der Partikelform festgestellt. Immer wieder wurde auch von anderen Experten bestätigt, dass der Füller einerseits eine ganz erhebliche Einflussnahme auf den Asphalt vorweist, jedoch die bislang mögliche Beschreibung und Untersuchung eine deutliche Differenzierung und befriedigende Aussagekraft nicht zulässt. Bereits [Schuhbauer 1962] berichtete über das komplexe Verhalten der Füller und darüber, dass die versteifende Wirkung der einzelnen Füllerarten verschieden groß sei. Dabei wird auf damals bereits 30 Jahre zurückliegende Erfahrungen von Evans und Walther, sowie von Neumann und Wilhelmi verwiesen. Man betrachtete dabei die Absorptionswirkung des Bindemittels an den Gesteinsoberflächen aber auch an den inneren Oberflächen von Hohlräumen und Kapillaren poröser Füllstoffe. Die Überlegungen gingen soweit, dass man davon ausging, dass sogar nur Teile des Bindemittels in vorhandene Hohlräume eingesaugt werden und gerade dieses Phänomen eine Auswirkung auf die Klebefähigkeit des Bitumens bzw. auf die Verbundkraft hat. Aber auch der Feinheitsgrad der Füllstoffe hatte bei [Schuhbauer 1962] schon eine maßgebliche Bedeutung erlangt. Er postulierte, dass nicht nur die Kornabstufung im „Splitt- oder Sandbereich“ Bedeutung besitzt, sondern insbesondere auch jene des Füllers. Weiterhin wurde damals schon die Kornform als wichtige Größe genannt, jedoch sogleich die Schwierigkeit deren Bestimmung festgestellt. Bis heute kann die Aussage von [Schuhbauer 1962] bestätigt werden, dass auf dem Gebiet der Füllerforschung schon viele Einzelarbeiten durchgeführt worden sind, jedoch noch viele Unklarheiten bestehen. Die Erkenntnis nach den vielen teilweise vergeblichen Bemühungen war letztlich die, dass ein Aufschluss über die Eignung eines Füllers für den Asphaltstraßenbau nur über einen praktischen Versuch auf der Straße gefunden werden kann. In ähnlicher Weise beschäftigte sich [Pippich 1981] auch mit der Wirkung des Füllers im Asphalt. Nach [Suss 1982] besteht kein gesicherter Zusammenhang zwischen der spezifischen Oberfläche nach Blaine und dem Hohlraumgehalt nach Rigden. In diesem Zusammenhang wird auch herausgestellt, dass die Ermittlung der spezifischen Oberfläche teilweise, z.B. bei inneren Hohlräumen einzelner Gesteinskörner, falsche Ergebnisse liefert. [Suss 1982] sieht keine Abhängigkeiten von im Labor ermittelten Materialparametern und im Asphalt auf der Straße vorzufindenden Eigenschaften. Die reinen Füllereigenschaften besitzen daher, so seine Feststellung, eine nur eingeschränkte Aussagekraft. Bei [Suss

1994] wird hingegen die Erkenntnis herausgearbeitet, dass die im Labor am Füller zu bestimmenden Werte des Hohlraumgehaltes nach Rigden und der Stabilisierungsindex wiederum doch einen Bezug zum Verformungsverhalten des Asphaltes zulassen, indem ein hoher Hohlraumgehalt nach Rigden und ein zugleich niedriger Stabilisierungsindex bei den Untersuchungen zu einer höheren Steifigkeit führten. [Schellenberger 2002] wagt die Erforschung des Füllers auf erneute Weise und stellt fest, dass dieser optisch nicht beurteilt werden kann. Auch wird in diesem Zuge erneut ein besonderer Einfluss der Kornanteile $< 0,063$ mm hervorgehoben. [Schellenberger 2002] betrachtet auch die spezifische Oberfläche und die Kornanteile $< 0,002$ mm der untersuchten Füller und stellt sehr starke Schwankungen zwischen einzelnen Produktionszeiträumen einer Produktionsstätte fest. Er beobachtet teilweise Unterschiede von über 100% und beschreibt diese als ungünstig für die Asphaltqualität, ganz konkret spricht er sogar von einer „Gefahr“ für die Qualität. Letztlich lassen sich wieder keine klaren Zusammenhänge aller untersuchten Eigenschaften der verschiedenen Füller mit den weiterführenden Untersuchungen anhand von den dort durchgeführten Spaltzugprüfungen feststellen. Unumstritten ist hingegen, dass mit kleiner werdenden Korndurchmessern der Einfluss der Gesteinskörnungen auf die Asphalteigenschaften erheblich steigt. Ganz interessant scheint das Ergebnis des Vergleichs von Füllern gleichen Ursprungsgesteins, die einerseits als qualifiziert gemahlene Füller und andererseits als Entstaubungsfüller verwendet wurden. Entstaubungsfüller stellen sich bei [Schellenberger 2002] generell als nicht gleichwertig, sogar deutlich schlechter und nur bedingt einsetzbar heraus. Einen anderen Ansatz wählte [Arand 1971] bei seinen Untersuchungen des Mörtels mit Hauptaugenmerk auf den Hohlraumgehalt. Er stellt dabei den Übergang vom hohlraumfreien Gemisch, dem Mörtel, bei dem die Mineralstoffe in dem Mastix eingeschlossen sind und quasi schwimmen, zum hohlraumhaltigen Gemisch dar. Er macht den Wechsel abhängig vom „maßgeblichen Korndurchmesser“, der die geschlossene Phase von der offenen Phase trennt. Dieser Phasenübergang hat einen Einfluss auf das Stabilitätsverhalten des Asphaltes. Der Bedarf an Bindemittel stellt sich dabei mit großer Abhängigkeit von der Korngröße dar, indem die feinsten Körnungen aufgrund ihrer großen Oberfläche einen besonders hohen spezifischen Bindemittelbedarf vorweisen. Mit zunehmendem Korndurchmesser nimmt dieser jedoch schnell ab, was wiederum eindeutig auf die besondere Bedeutung der feinsten Körnungen und somit auch auf die Bedeutung der Sieblinie der verwendeten Füller hinweist.

1.3.3 Literaturstudie feine Gesteinskörnungen

Dass neben dem Füller auch die feinen Gesteinskörnungen einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf die Asphalteigenschaften nehmen, stellt [Feix 1979] fest (vgl. Abschnitt 1.3.2). Bei der Anwendung der Betrachtungsweise der Asphalttragwirkung mittels Mo-

dell eines stabilen Korngerüsts liegt es nahe, zur Beurteilung des Verformungsverhaltens von Asphalt als Erstes die Kornform und die Oberflächenbeschaffenheit der feinen Gesteinskörnungen zu betrachten. Beide Kriterien können durch Ermittlung eines Fließwertes, der so genannten Fließzahl ausgedrückt werden. [Arand 1981], [Krass 1990] und zuletzt [Eckers 2004] stellten fest, dass dieser Fließwert in Korrelation zum Verdichtungswiderstand des Asphaltes steht. Es wurde jedoch auch festgestellt, dass ein direkter Zusammenhang zwischen der Fließzahl und dem Verformungsverhalten des Asphaltes unter dynamischer Beanspruchung nicht besteht. Es sei dem Verfasser dieser Arbeit jedoch die Anmerkung erlaubt, darauf hinzuweisen, dass ein indirekter Zusammenhang zwischen der Fließzahl, also der Verdichtbarkeit des Asphaltes und der Verformungsbeständigkeit des Asphaltes über dessen Verdichtungsgrad durchaus bestehen kann. Auch [Graf 2007] untersuchte systematisch in erster Linie feine Gesteinskörnungen samt den dazugehörigen Füllern mit aufwendigen Methoden und versuchte dabei auch, die Mineralogie, die Entstehung und die Herstellung der Gesteinskörnungen in die Analyse miteinzubeziehen. Auch wenn bei den Untersuchungen die Wasserempfindlichkeit, untersucht anhand mehrerer Verfahren, im Vordergrund steht, so lässt sich dabei jedoch auch eine wichtige Erkenntnis ableiten. Die Dauerhaftigkeit von Asphalt wird auf eine möglichst langanhaltende kompakte Verklebung der Gesteinspartikel durch Bitumen zurückgeführt. Auch wenn eine Schädigung der Verklebung in erster Linie immer auf das lösende Wasser an sich zurückgeführt wird, so lässt sich jedoch in diese Arbeit ebenso gut hineininterpretieren, dass bei der Herstellung der Prüfkörper allein schon die Verdichtbarkeit des jeweiligen Gemisches von Bedeutung war. Dort wo wasserführende Hohlräume infolge eines höheren Verdichtungswiderstandes verbleiben, ist mit höherem Einfluss des Wassers bei der Prüfung zu rechnen. Ergo spielt der theoretische Hohlraumgehalt im Füller nach Rigden auch, wenngleich indirekt, eine Rolle bei der Prüfung der Wasserempfindlichkeit der Gesteinskörnungen, die beeinflusst wird durch deren Mineralogie und Gewinnung (Mühle, Entstaubungsanlage). Es kann sogar davon ausgegangen werden, dass die Form der einzelnen Partikel eine nicht unwesentliche Bedeutung bei der Untersuchung der Wasserempfindlichkeit einnimmt. Letztlich bringt [Graf 2007] dies zum Ausdruck, indem er von vorherrschenden Einflüssen schreibt, welche die festgestellten Merkmale überlagern und dadurch eine klare Differenzierung der Wasserempfindlichkeit der Gesteinsart erschweren. Er schlägt daher im Falle einer negativen Beurteilung der Gesteinsart durch Schüttelabrieb- oder Quellungsprüfung eine zusätzliche Prüfung an Asphaltprobekörpern der vorgesehenen Asphaltrezeptur vor.

1.3.4 Literaturstudie Asphaltmastix und Asphaltmörtel

[Arand 1971] erklärt, dass sich die einflussreichen Komponenten nicht nur in der Mastixebene finden, sondern auch in die Mörtel Ebene hineinreichen. Alleine die Kenntnis der versteifenden Wirkung von Füllern und der Eigenschaften des Bitumens führen, wie festgestellt wird, nur ansatzweise zur optimalen Asphaltrezeptur. Über diese Erkenntnis hinaus spannt [Arand 1971] jedoch auch noch den Bogen in die praktische Verwendung der Asphalte, indem er beschreibt, dass sich die Verdichtungswilligkeit des Asphalttes letztlich auf die Materialeigenschaften der fertigen Schicht auswirkt. Diese Verdichtungswilligkeit muss ihrerseits wieder über die Mörtel Eigenschaften gesteuert werden. Es ist also letztlich eine Gratwanderung, den Mörtel entsprechend steif zu konzipieren, um der Schicht entsprechende Stabilität zu verleihen, aber zugleich die Viskosität unter Einbaubedingungen so zu halten, dass eine optimale Verdichtung zuverlässig und ohne Überbelastung des Materials möglich ist. [Schellenberg 2010] hatte mit der Entwicklung des Zugretardationsversuches erstmals die Möglichkeit geschaffen, die Viskosität und damit die Temperaturempfindlichkeit von Asphaltmörtel zu untersuchen. Er zielt damit auf die Prognose der Verformungsbeständigkeit bei Wärme und der Flexibilität bei Kälte ab. Die Eigenschaften bei Wärme können jedoch aufgrund der Prüfbedingungen nur bei einer Temperatur von maximal ca. 35°C ermittelt werden, da die Gefahr eines einsetzenden Fließens am Prüfkörper besteht. Die Eigenschaft der Verformungsbeständigkeit kann also bei diesem Verfahren nur indirekt ermittelt werden. Einen bedeutenden Einfluss des Verhältnisses von Füller zu Bitumen (f/b -Verhältnis) in Asphaltmastix auf die Ermüdungsresistenz und die Verformungsbeständigkeit des daraus hergestellten Asphalttes finden [Moreno 2016] aber auch [Vale 2016] in unabhängigen Studien heraus. In deren vergleichenden Untersuchungen wurden in unterschiedlichen Asphaltgemischen (AC, SMA u.a.), die zugleich mit Bindemitteln unterschiedlicher Arten und Sorten hergestellt wurden, mehrere definierte f/b -Verhältnisse verwendet. Mitunter anhand rheologischer Prüfverfahren konnte bestätigt werden, dass es besonders wichtig ist, die in den Erstprüfungen rezeptierten Füllermengen auch in der Praxis zielsicher umzusetzen, da, wie festgestellt wurde, ein übermäßiger Füllstoffgehalt die Ermüdungsresistenz des Asphalttes ernsthaft beeinträchtigen kann. Auf der anderen Seite konnte jedoch auch belegt werden, dass in Abhängigkeit vom verwendeten Bindemittel, eine gezielte Steuerung der Verformungsbeständigkeit durch moderate Variation des f/b -Verhältnisses möglich ist.

1.3.5 Literaturstudie rheologische Prüfverfahren

In einer amerikanischen Studie von [Delaporte 2009] wurden die viskoelastischen Eigenschaften von Bitumen bei Verwendung von ultrafeinen Füllern untersucht. Dabei

wurde ein dynamisches Untersuchungsverfahren mit dem Annular Shear Rheometer (ASR), ähnlich dem Dynamischen Scherrheometer (DSR), aber mit ringförmigem Probekörper gewählt. Es konnten anhand des Schermoduls und des Phasenverschiebungswinkels deutliche Unterschiede der ultrafeinen Füller im Vergleich zu den Standardfüllern festgestellt werden. Bei Erhöhung der Oszillationsfrequenzen wurde jedoch ein Nachlassen dieses Einflusses ermittelt. Da die Erhöhung der Frequenz aufgrund des Superpositionsprinzips einem Absenken der Temperatur gleichkommt, deckt sich diese Erscheinung mit dem bekannten Wissen, dass sich bei niedrigen Temperaturen eine höhere Mahlfeinheit bei den Füllern nicht signifikant auswirkt. Dies lässt darauf schließen, dass ein rheologisches Prüfverfahren hier durchaus in der Lage ist, weiterführende Ergebnisse zu liefern. In der Literaturobwertung des Europäischen Kalkverbandes EULA [Kalkhydrat 2011] wird dieses Phänomen ebenfalls beschrieben und mit praktischen Versuchen belegt. Auch in einer früheren amerikanischen Studie von [Cooley 1998] wurden dynamische Prüfverfahren aus dem amerikanischen SUPERPAVE Prüfprogramm, wie in [McGennis 1994] beschrieben, am Bitumen-Füller-Gemisch angewandt. Ziel dabei war es, die versteifende Wirkung verschiedener Füller in Bitumen-Füller-Gemischen festzustellen. Das Verfahren am Dynamischen Scherrheometer konnte dabei auch zuverlässige und nachvollziehbare Ergebnisse auf dieser Ebene liefern. Die Verformungsbeständigkeit wird dabei anhand des Quotienten aus dem komplexen Schermoduls G^* und dem $\sin(\delta)$ hergeleitet. Mit denselben Ansätzen stellt [Yalçın 2016] den Einfluss von ultrafeinen, im Nanometerbereich liegenden Füllerpartikeln (nanoclay), mit welchen in mehreren Versuchsreihen das Bitumen modifiziert wurde, auf dessen Eigenschaften hinsichtlich Ermüdungsresistenz und Verformungsbeständigkeit fest. Einen Einfluss auf die Strukturviskosität des Bitumens fand [Arand 1998] heraus, indem bei einer Untersuchung über mehrere Temperaturstufen neben der Temperatur selbst auch die Richtung der Temperatursteuerung eine signifikante Rolle spielte. Die thixotrope Eigenschaft wird dort den beim Vernetzungsvorgang entstehenden inneren Strukturen zugeschrieben. Diese thermisch-energetischen Effekte können durchaus Ursache thermo-mechanischer Phänomene bei Asphalten sein und damit dessen Widerstand gegen bleibende Verformungen beeinflussen. Hier ist also festzustellen, dass allein durch den zeitlichen Ablauf der Strukturbildung im Bindemittel äußere Eigenschaften des Asphaltes wie Hohlraumgehalt oder Verdichtungsgrad beeinflusst werden können. Im Rahmen des 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress in Prague stellt [Kriz 2016] rheologische Prüfverfahren am Bitumen dar und vergleicht diese mit den bekannten empirischen Verfahren. Als großen Vorteil stellt er dabei die rheologischen Größen als Eingangsparameter für weitere Dimensionierungsmodelle und Prognoseverfahren dar.

1.3.6 Literaturstudie zur Notwendigkeit ganzheitlicher Prüfverfahren

Gesprächen mit Bauherren und ausführenden Firmen kann entnommen werden, dass Qualitätsprobleme im Asphaltbau gerne und häufig auf das Bindemittel zurückgeführt werden. Erstaunlicherweise gibt es jedoch sowohl negative Erfahrungen mit anforderungskonformen als auch positive Erfahrungen mit nicht anforderungskonformen Qualitäten der Bindemittel. Dies legt die Vermutung nahe, dass der Einfluss des Bindemittels diesbezüglich oft überschätzt wird. Dazu und zur Bedeutung rheologischer Prüfverfahren in Hinblick auf die Vorhersage des Gebrauchsverhaltens von Asphalt gibt es eine Abhandlung von [Molenaar 1996]. Er stellt die Performance-Untersuchungen am reinen Bitumen nicht über Untersuchungen der Gebrauchseigenschaften am Asphalt, da rheologische Bindemittelleigenschaften häufig von Eigenschaften anderer Asphaltkomponenten überspielt werden. Er fordert, generell mehr Gewicht auf Untersuchungen der Wechselwirkungen zwischen Bitumen und den Gesteinskörnungen zu legen, da diese Wechselwirkungen nach seiner Beobachtung Oberflächendefekte, wie beispielsweise Splittverlust, in hohem Maße beeinflussen. Auch wird an dieser Stelle wieder die Verarbeitbarkeit des gesamten Stoffgemisches als bedeutende Eigenschaft erwähnt. Als zentrale Aufgabe sieht er das Beschreiben der Zusammenhänge der rheologischen Eigenschaften des Bindemittels mit den mechanischen Eigenschaften des Mischgutes. Er beweist dies anhand der überwiegend vorherrschenden Schadensbilder an niederländischen Fernstraßen mit Splittverlust, Rissen und Spurrinnen. Letztlich stellt er fest, dass zwar rheologische Untersuchungen am Bindemittel einen wichtigen Beitrag zur Charakterisierung und Spezifizierung von Asphalt leisten, aber überdies hinaus insbesondere die Wechselwirkung zwischen Bitumen und Gesteinskörnungen eine außerordentliche Bedeutung für die Erzielung dauerhafter Deckschichten hat. [Bommert 2017] greift den von [Schellenberg 2010] entwickelten Zugretardationsversuch auf und bestätigt der Prüfung am Asphaltmörtel große Bedeutung. Er versucht dabei auch eine Prognose aus dem Tieftemperaturverhalten für das Hochtemperaturverhalten des Asphaltmörtels abzuleiten und bestätigt dabei die Notwendigkeit einer solchen Betrachtungsmöglichkeit für die künftigen Asphaltoptimierungen im Spannungsfeld der konkurrierenden Asphalteigenschaften Ermüdungsresistenz und Verformungsbeständigkeit. Bei einer Gegenüberstellungen von Ergebnissen aus dem Zugretardationsversuch an Asphaltmörteln und dem einaxialen Druck-Schwellversuch aus den Forschungsprojekten von [Hase 2011] und [Hase 2017], unter Verwendung identischer bzw. vergleichbarer Baustoffkomponenten, wird eine Vergleichbarkeit dieser Kenngrößen nachgewiesen.

1.3.7 Stand von Wissenschaft und Forschung

Bis dato wurde noch keine praktikable Methodik zur Untersuchung der Gebrauchseigenschaften des Asphalttes anhand des Asphaltmörtels gefunden. In dem unveröffentlichten Abschlussbericht von [Grönninger 2014] zu einem Forschungsprojekt des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung aus dem Jahre 2008 wurde der Einfluss der feinen Gesteinskörnungen und des Asphaltmörtels auf die Gebrauchseigenschaften von Asphalt untersucht. Dabei wurden neben den klassischen Prüfverfahren auch rheologische Prüfungen im Bending Beam Rheometer (BBR) und im Dynamischen Scherrheometer (DSR) für die Untersuchung von Bitumen-Füller-Gemischen und von Bitumen-Füller-Sand-Gemischen durchgeführt. Aufgrund der Konsistenz der gewählten Mischungen scheiterten jedoch in weiten Bereichen die rheologischen Untersuchungen am Asphaltmörtel. Es stellte sich heraus, dass mit dem dort eingesetzten Prüfgerät weder der komplexe Schermodul noch der Phasenverschiebungswinkel bestimmt werden konnte. Als Schlussfolgerung wurde in der Forschungsarbeit beschrieben, dass anhand der an dem Asphaltmastix und am Asphaltmörtel festgestellten Eigenschaften eine quantitative Prognose der Asphalteigenschaften nicht möglich sei. Lediglich das Füller-Bitumen-Verhältnis und die Bitumenart und die Bitumensorte konnten bei den untersuchten Splittmastixasphalten als maßgebende Einflüsse nachgewiesen werden. Aufgrund der nicht zufriedenstellenden Erkenntnisse bei [Grönninger 2014] wurden neue Forschungsziele wie „Erforschung der Wirksamkeit des Asphaltmörtels für jede Asphaltmischgutart“, „Prüfverfahren zur Überprüfung der asphaltechnologischen Wirksamkeit von Fasern“ oder „Stabilisierende Wirkung von Füller und Eigenfüller“ entwickelt.

2 Entwicklung des Prüfverfahrens

2.1 Rheologie und Rheometrie


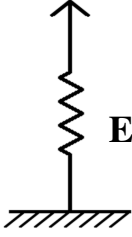
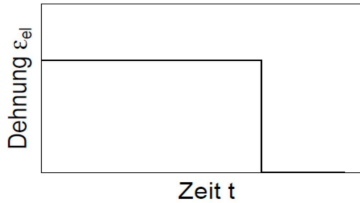
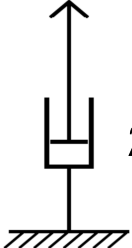
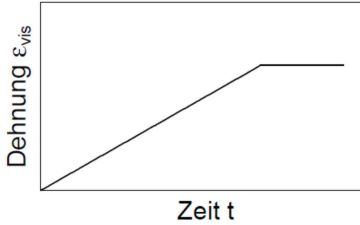
Nach [Schramm 1995] beschreibt die Rheologie, wie sich ein Körper bei Beanspruchung durch äußere Kräfte verformt. Als Körper sind Festkörper, Flüssigkeiten aber auch Gase zu verstehen. Ideale Festkörper verhalten sich elastisch, das heißt, die Deformationsenergie wird nach Abklingen der Schubspannung wieder vollständig zurückgewonnen („Hooke’sche Feder“). Ideale Fluide, wie Flüssigkeiten und Gase, werden hingegen irreversibel verformt, das heißt, sie fließen, da in Flüssigkeiten die Deformationsenergie aus Schubbeanspruchung in Wärme umgewandelt wird, und diese Energie nach Abklingen der Spannung nicht wieder zurückgewonnen werden kann („Newton’scher Dämpfer“). Reale Körper sind weder ideal-elastische Festkörper noch ideal-viskose Fluide. Reale Körper sind mit ihrem viskoelastischen Verhalten zwischen den Idealzuständen einzureihen.

2.1.1 Rheologische Modelle für Bitumen und Asphalt

Aufgrund des kolloidalen Charakters des Bitumens ist Asphalt bzw. Asphaltmörtel stark temperaturabhängig und reagiert je nach den äußeren Einflüssen elastisch, viskos, spontan plastisch oder als Kombination dieser Verhaltensformen. Vereinfachend wird im Folgenden davon ausgegangen, dass Bitumen bzw. der Asphaltmörtel unabhängig von etwaigen Modifikationen als linear-viskoelastisch zu betrachten ist, auch wenn [Bahia 1999] diese Vereinfachung als kritisch bewertet. Da jedoch die Prüfbedingungen bei vorliegendem Forschungsprojekt den realen Bedingungen in Asphalt hinsichtlich der Verkehrslasten und der thermischen Beanspruchung nachempfunden sind, ist dies möglich. Diese Annahme ist auch zulässig, da die unter identischen Prüfbedingungen ermittelten Ergebnisse als relative Werte für Vergleiche untereinander verwendet werden.

Für die Entwicklung der in der Asphaltforschung häufig zugrunde liegenden rheologischen Modelle werden als Erstes die Grundmodelle betrachtet, die zur Beschreibung der elastischen und viskosen Stoffeigenschaften dienen. In Tabelle 2.1a sind die rheologischen Grundmodelle dargestellt.

Tabelle 2.1a: Rheologische Grundmodelle

<p>Rheologische Grundmodelle</p>	<p>Spannungs-Dehnungs-Beziehung</p> <p>$\sigma(t) = \sigma_{\text{konst.}}$</p>	
	<p>Hooke'sche Feder</p> <p>$\epsilon_{\text{el}}(t) = \frac{\sigma_{\text{konst.}}}{E}$</p> <p>mit</p> <ul style="list-style-type: none"> $\sigma_{\text{konst.}}$ = Spannung E = Elastizitätsmodul ϵ_{el} = Dehnung 	
	<p>Newton'scher Dämpfer</p> <p>$\epsilon_{\text{vis}}(t) = t \cdot \frac{\sigma_{\text{konst.}}}{\lambda}$</p> <p>mit</p> <ul style="list-style-type: none"> $\sigma_{\text{konst.}}$ = Spannung λ = Zugviskosität ϵ_{vis} = Dehnung 	

Die **Hooke'sche Feder** repräsentiert das elastische Verhalten des Bitumens. Eine idealisiert masselose Spiralfeder weist dabei Proportionalität zwischen Dehnung und einwirkender Kraft auf.

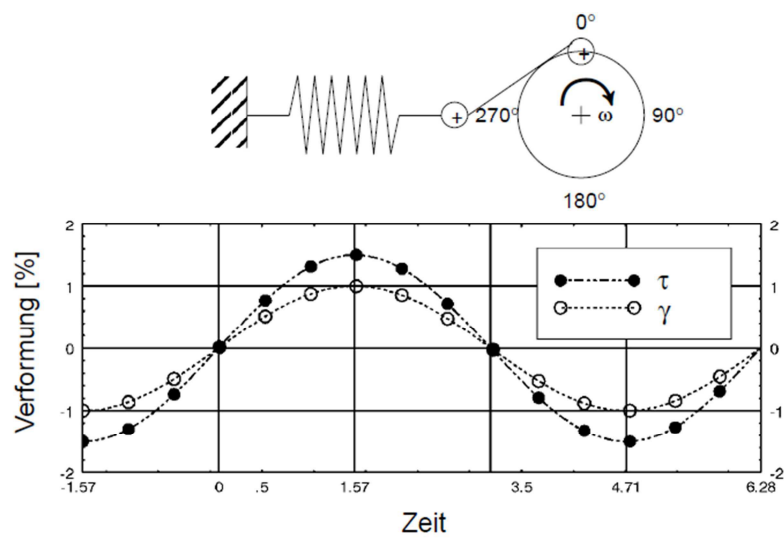


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung der Zusammenhänge der im DSR ermittelbaren Kenngrößen komplexer Schermodul G^* und Phasenverschiebungswinkel δ unter Modellbildung mit Hooke'scher Feder. [Schramm 1995]

Der **Newton'sche Dämpfer** repräsentiert das viskose Verhalten des Bitumens. Ein idealisiert masseloser Kolben in einem als endlos anzusehenden Zylinder mit ideal-viskoser Flüssigkeit dämpft dabei die Bewegung.

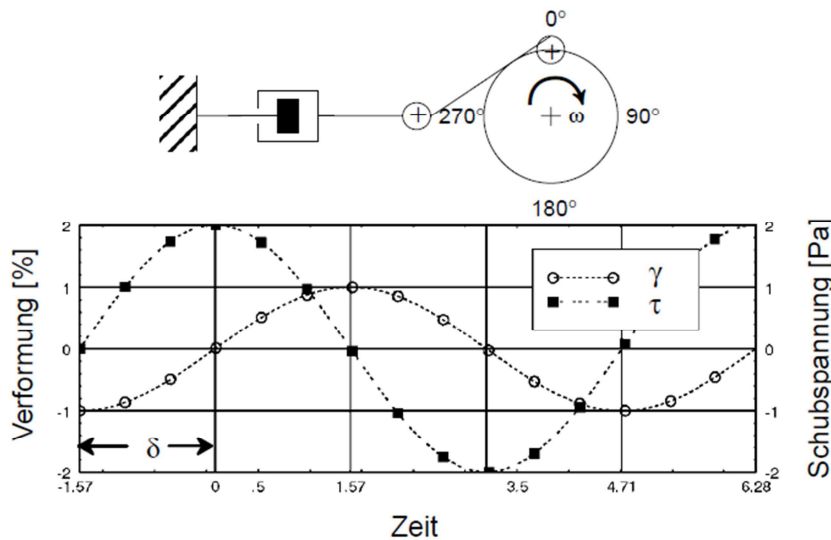


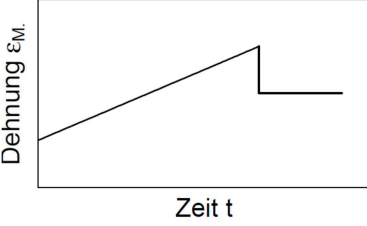
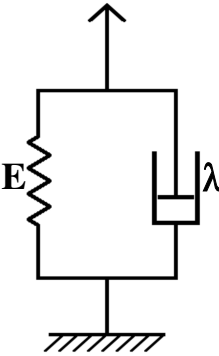
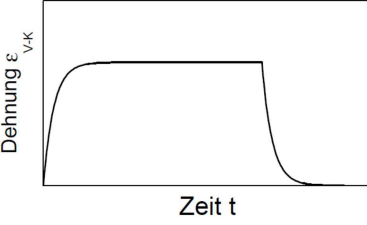
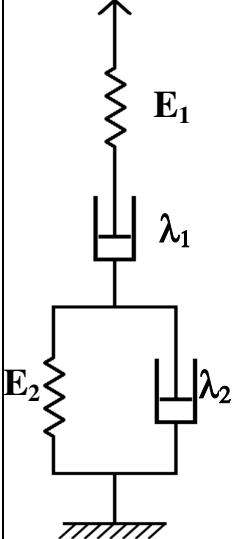
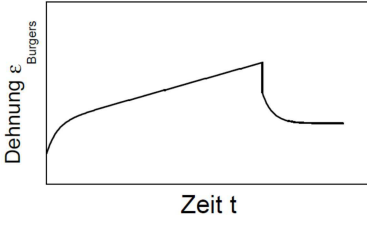


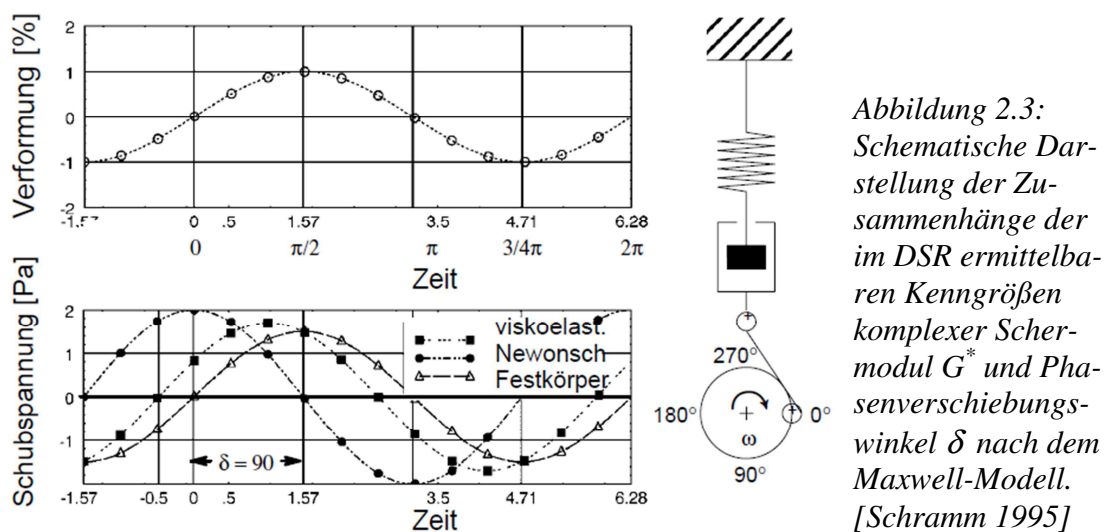
Abbildung 2.2:
Schematische Darstellung der Zusammenhänge der im DSR ermittelbaren Kenngrößen komplexer Schermodul G^* und Phasenverschiebungswinkel δ unter Modellbildung mit Newton'schem Dämpfer.
[Schramm 1995]

Verwendet man eine Kombination der oben eingeführten Modellkörper parallel oder in Serie angeordnet, so kann man mit ihrer Hilfe nach [Schramm 1995] typische rheologische Eigenschaften von viskoelastischen Flüssigkeiten und Festkörpern herausarbeiten und mathematische Gleichungen für ihr Spannungs-/Deformationsverhalten ableiten. Während das Verhalten der unterschiedlichen Kombinationstypen der Modellkörper mit dem tatsächlichen rheologischen Verhalten eines viskoelastischen Materials Ähnlichkeiten aufweist, besteht jedoch nicht immer eine direkte Beziehung zwischen den mechanischen Modellen und z.B. den charakteristischen Besonderheiten der Molekularstruktur oder der Homogenität von realen Polymerblends, die im Grunde weitaus komplexeren Strukturen und Verhaltensweisen unterliegen. Die Kombination von Newton'schem Dämpfer und Hooke'scher Feder berücksichtigt eine zeitabhängige Komponente für das Spannungs-/Deformationsverhalten, die bei der Betrachtung einer einzelnen Feder oder eines einzelnen Dämpfers nicht auftritt. Daher eignet sich eine solche Kombination für die grundlegende Beschreibung der rheologischen Eigenschaften von Bitumen und Asphalt, wie dies auch im Rahmen des in [McGennis 1994] beschriebenen SUPERPAVE-Projektes bestätigt wurde. Aber auch dafür mussten die rheologischen Grundmodelle zu den folgenden Kombinationsmodellen weiterentwickelt werden.

Tabelle 2.1b: Kombination der rheologischen Grundmodelle zur Beschreibung der rheologischen Eigenschaften von Bitumen und Asphalt, sowie anderer Flüssigkeiten und Feststoffe

Rheologische Modelle	Spannungs-Dehnungs-Beziehung $\sigma(t) = \sigma_{\text{konst.}}$	
	<p>Maxwell-Modell</p> $\epsilon_{\text{Maxwell}}(t) = \frac{\sigma_{\text{konst.}}}{E} + t \cdot \frac{\sigma_{\text{konst.}}}{\lambda}$ <p>mit</p> <ul style="list-style-type: none"> $\epsilon_{\text{Maxwell}}$ = Dehnung $\sigma_{\text{konst.}}$ = Spannung E = Elastizitätsmodul λ = Zugviskosität 	
	<p>Voigt-Kelvin-Modell</p> $\epsilon_{\text{V.-K.}}(t) = \frac{\sigma_{\text{konst.}}}{E} \cdot \left(1 - e^{-\frac{E}{\lambda}t} \right)$ <p>mit</p> <ul style="list-style-type: none"> $\epsilon_{\text{V.-K.}}$ = Dehnung $\sigma_{\text{konst.}}$ = Spannung E = Elastizitätsmodul λ = Zugviskosität 	
	<p>Burgers-Modell</p> $\epsilon_{\text{Burgers}}(t) = \frac{\sigma_{\text{konst.}}}{E_1} + t \cdot \frac{\sigma_{\text{konst.}}}{\lambda_1} + \frac{\sigma_{\text{konst.}}}{E_2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{E_2}{\lambda_2}t} \right)$ <p>mit</p> <ul style="list-style-type: none"> $\epsilon_{\text{Burgers}}$ = viskoelastische Dehnung E_1 = Elastizitätsmodul des Maxwell-Modells E_2 = Elastizitätsmodul des Voigt-Kelvin-Modells λ_1 = Zugviskosität des Maxwell-Modells λ_2 = Zugviskosität des Voigt-Kelvin-Modells 	

Das **Maxwell-Modell** (s. Abbildung 2.3) entsteht aus einer Reihenschaltung von Feder und Dämpfer mit der Konsequenz, dass die Schubspannungen in beiden Modellelementen identisch sind, während sich die Deformationen addieren. Die einwirkende Kraft bzw. Spannung wirkt auf beide Elemente gleich. Die sich einstellende Dehnung ergibt sich aus den beiden unterschiedlichen Dehnungen von Feder und Dämpfer, wie dies auch in der Spannungs-Dehnungs-Beziehung in Tabelle 2.1b dargestellt ist. Das Maxwell-Modell charakterisiert nach [Schramm 1995] eine viskoelastische Flüssigkeit. Wird diese spontan mit einer Deformationskraft bzw. Schubspannung beaufschlagt, so reagiert sie zunächst mit einem sofortigen Stufenschritt der Deformation, die der elastischen Reaktion der Hooke'schen Feder entspricht. In der weiteren Entspannungsphase zeigt die Flüssigkeit ein viskoses Fließverhalten, bei dem die Deformation unbegrenzt steigt, solange die Schubspannung beibehalten wird. Die Deformation erhöht sich mit einer konstanten Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Viskosität des Newton'schen Dämpfers. Wird die Flüssigkeit nach Ablauf nach einer bestimmten Zeit entlastet, so fällt die Deformationskurve sofort in einem einzigen Schritt auf ein neues, niedrigeres, zeitkonstantes Niveau. Die Höhe dieses spontanen Deformationsabfalls resultiert aus der Entspannung der Hooke'schen Feder.



Das **Voigt-Kelvin-Modell** (s. Abbildung 2.4) entsteht aus einer Parallelschaltung von Feder und Dämpfer. Bei diesem Modellschaltbild ist die Feder mit dem Dämpfer parallel verbunden, so dass ein fester Rahmen, in dem die Modellelemente eingebaut sind entsteht, der sicherstellt, dass jede Kraft, die auf das System aufgebracht wird, in gleichem Maße auf die Feder und den Dämpfer wirkt. Die aufgebrachte Dehnung ist daher bei beiden Elementen gleich. Die auftretende Spannung ist dagegen in beiden Elementen unterschiedlich. Die wirkende Schubspannung entspricht der Summe der Spannungen

gen des Dämpfers und der Feder, wie dies auch in der Spannungs-Dehnungs-Beziehung in Tabelle 2.1b dargestellt ist. Dieses Modell bietet sich nach [Schramm 1995] für viskoelastische Festkörper an, denn bei einem idealen Festkörper verändern die Volumenelemente ihre Position zueinander nicht, was bedeutet, dass die auf den Festkörper wirkende Schubspannung zu keiner Art von Fließvorgängen in der Probe führt. Die Rückführung auf den Ausgangszustand erhält man in diesem Modellschaltbild nach einer (unendlichen) Zeitdauer.

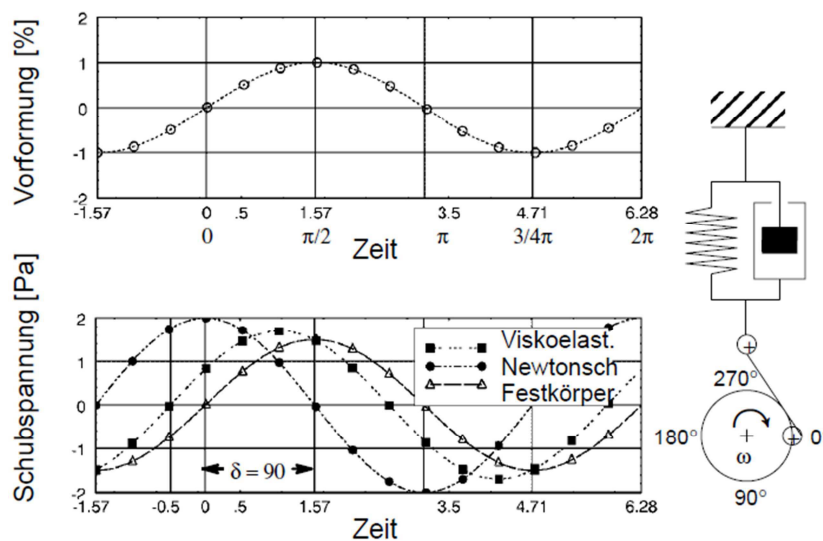
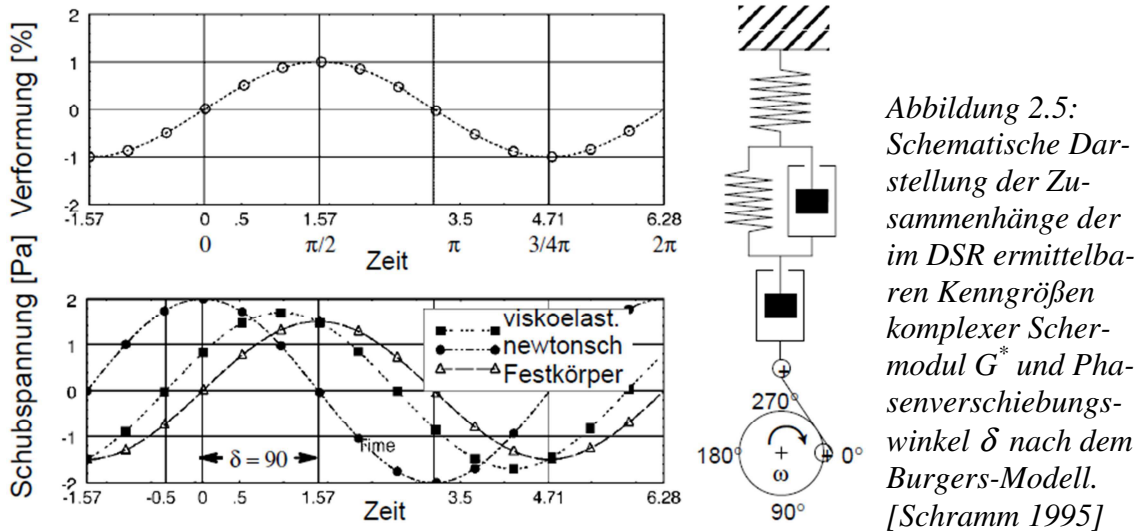


Abbildung 2.4:
Schematische Darstellung der Zusammenhänge der im DSR ermittelbaren Kenngrößen komplexer Schermodul G^* und Phasenverschiebungswinkel δ nach dem Voigt-Kelvin-Modell.
[Schramm 1995]

Sowohl das **Maxwell-Modell**, als auch das **Voigt-Kelvin-Modell** sind noch relativ einfach aufgebaut, da sie nur jeweils einen einzelnen Newton'schen Dämpfer und eine einzelne Hooke'sche Feder verbinden. Für beide Modelle gibt es Gleichungen, die die Erfordernisse von linearer Viskoelastizität erfüllen. Reale viskoelastische Substanzen lassen sich in der Regel jedoch nur durch komplexere Kombinationen von Federn und Dämpfern beschreiben. Eine Weiterentwicklung der vorgenannten Modelle ist das **Burgers-Modell** (s. Abbildung 2.5), welches aus einer Reihenschaltung von Voigt-Kelvin-Modell und Maxwell-Modell entsteht. Das Burgers-Modellschaltbild ordnet also ein Kelvin-Modellschaltbild für einen viskoelastischen Festkörper in Serie an ein Maxwell-Modellschaltbild für eine viskoelastische Flüssigkeit. Die einwirkende Kraft wirkt auf beide Teilmodelle gleich, die resultierende Dehnung setzt sich aus den beiden Einzelverformungen zusammen. Mit diesem deutlich komplizierteren Modellschaltbild beschreibt das Burgers-Modell jedoch das rheologische Verhalten von viskoelastischen, realen Substanzen im Vergleich zu den oben beschriebenen Modellen deutlich besser. Eine analoge Vorgehensweise wurde auch bei [Hagner 2003] gewählt. Die Modellbildung liegt auch den aktuellen Regelwerken der Bitumenuntersuchung mit dem DSR zugrunde.



Manche viskosen oder viskoelastischen Stoffe verhalten sich unterhalb einer gewissen Grenzscherubspannung nicht wie eine Flüssigkeit, sondern wie ein Festkörper. In diesem Zustand verformen sie sich nur elastisch („Hooke’sche Feder“). Erst nach Erreichen der Grenzscherubspannung beginnen diese Stoffe tatsächlich zu fließen. Unterhalb dieser Grenze sind Spannung σ und Dehnung ϵ zueinander linear. Der Proportionalitätsfaktor hierfür ist der Elastizitätsmodul E des Stoffes. Oberhalb der Fließgrenze führt die vorgegebene Spannung σ zu unbegrenzter Dehnung ϵ , welche sich auch nach Abklingen der Spannung nicht selbständig zurückbildet. Der Proportionalitätsfaktor hierfür ist die Viskosität, welche die Reibung zwischen den idealisierten Flüssigkeitsschichten beschreibt. Es gibt demzufolge also neben linear-viskosen Körpern noch andere Arten von Körpern. Deren rheologisches Verhalten wird in der Literatur beispielsweise als pseudoplastisch, viskoplastisch, strukturviskos (scherverdünnend) oder dilatant (scherverdickend) beschrieben. Im Falle eines Kornhaufwerkes spricht man bei solchem Verhalten auch von hypoplastisch, welches durch Überwindung oder Zerstörung der in den idealisierten Schichten vorherrschenden Kornverzahnung ebenfalls plötzlich eine Dehnung ϵ zulässt. Die mathematische Abbildung solcher Eigenschaften erfordert ein weiteres Schaltbild, das so genannte St.-Venant’sche Reibelement. Unter Einbeziehung dieser Funktionalität würde die Komplexität eines Modellschaltbildes deutlich erhöht werden. Aufgrund der wirklichkeitstreuen und daher sehr geringen, auf den Prüfkörper wirkenden Deformationen, wird bei den folgenden Betrachtungen nicht von einer dauerhaft stattfindenden Umlagerung im Korngerüst des Asphaltmörtels ausgegangen, welches ein hypoplastisches Verhalten hervorrufen könnte. Es wird von einem linear-viskoelastischen Stoffverhalten des Asphaltmörtels ausgegangen. Die Plastizität wird daher nicht weiter behandelt.

Alle diese hier beschriebenen Modelle werden regelmäßig, wenn auch in teilweise reduzierter, aber auch in weiterentwickelter Form für eine Vielzahl weiterer Festkörper und Flüssigkeiten, die mit rheologischen Prüfverfahren untersucht werden, angewendet.

Für die Herausarbeitung der rheologischen Zusammenhänge im Rahmen der weiter unten folgenden Untersuchungen an Asphaltmörtel soll das oben beschriebene und in Tabelle 2.1b dargestellte **Burgers-Modell** angewendet werden.

2.1.2 Anwendungsbereiche rheologischer Verfahren

Da bislang einerseits kein rheologisches Prüfverfahren auf Asphaltmörtel angewendet wird – und daher entsprechende Literatur und Erfahrung fehlt – und andererseits insbesondere Bitumen ein sehr komplexer Stoff, der sich nur sehr abstrakt formulieren und abbilden lässt, ist, wird zur besseren Einordnung der in Abschnitt 2.1.1 aufgeführten Modellbildung noch ein Exkurs in andere Anwendungsbereiche rheologischer Verfahren ausgeführt.

2.1.2.1 Anwendungsfall Bitumen

Bitumen ist als Bindemittel im Asphalt ein maßgebender Bestandteil bezüglich dessen Gebrauchseigenschaften Ermüdungsresistenz, Verformungsbeständigkeit und Verdichtbarkeit. Die Eigenschaften des Bitumens spielen eine große Rolle bei der Asphaltherstellung, dem Asphalteinbau und der Gebrauchsdauer des Asphaltbelages. Aufgrund seines temperaturabhängigen Verhaltens, welches zusätzlich von der Art seiner Modifikation beeinflusst wird, und seiner in den verschiedensten Temperaturbereichen geforderten Eigenschaften, gewinnt die rheologische Untersuchung des Bitumens immer mehr an Bedeutung. Denn nur solche Verfahren können durch Messungen über mehrere Temperaturstufen umfassende und praxisnahe Informationen über den Stoff liefern. Die Grundlagen für die Bitumenuntersuchungen wurden im Rahmen des amerikanischen SUPERPAVE-Projektes sehr aufwendig und umfassend erarbeitet. Im Rahmen dieses Strategic-Highway Research Programms (SHRP) wurden performance-orientierte Prüfverfahren zur prüftechnisch physikalisch eindeutigen Erfassung der Gebrauchseigenschaften des Baustoffs Bitumen entwickelt. Auf Grundlage dieser Ansätze befasst sich [Hagner 2003] in seiner Dissertation mit der Bindemitteluntersuchung im DSR, wobei er verschiedene Bitumenarten und -sorten, die zudem aus verschiedenen Produktionsstufen bei der Asphaltherstellung stammen, untersuchte und dabei eine Datenbasis generierte. Dabei wertete er auch die Präzision des Prüfverfahrens aus. Insgesamt konnte festgestellt werden, dass diesem neuen Prüfverfahren in Hinblick auf die besondere Aussagekraft der rheologischen Größen eine hohe Bedeutung zukommt. Eine Untersuchung und Optimierung der Prüf- und Auswertebedingungen für Messungen am DSR

wurde von [Hase 2003] durchgeführt. Mitunter aus diesen Ergebnissen wurde die in Deutschland geltende Arbeitsanleitung [AL DSR 2014] für die Bitumenuntersuchungen am DSR entwickelt.

Bei allen Untersuchungen am Bitumen wird zur Beschreibung dessen viskoser und elastischer Anteile und Eigenschaften generell das Burgers-Modell zugrunde gelegt.

2.1.2.2 Anwendungsfall Verformungsverhalten von Asphalt

In mehreren Ansätzen beschäftigte sich die Wissenschaft auch mit dem rheologischen Verhalten von Asphaltprobekörpern unter bestimmten Belastungsregimes. In einem umfangreichen Verbundforschungsprojekt, das bei [Roos 2015] zusammengefasst ist, wurden neuartige performance-relevante Asphalteeigenschaften mittels rheologischer Prüfverfahren untersucht und ausgewertet (vgl. Abschnitt 3.4.2). Eines der dort beschriebenen Verfahren, der Druckschwellversuch, wurde bereits von [Karcher 2005] im Rahmen von Studien an Splittmastixasphalten angewandt und weiterentwickelt. Auch dabei wird das Burgers-Modell als Basis für die Betrachtung der rheologischen Zusammenhänge verwendet. Aufgrund des sich im Splittmastixasphalt ausbildenden Korngerüsts sieht [Karcher 2005] jedoch auch das plastische Materialverhalten als zusätzliche wichtige Größe an und weicht daher auf ein Fünf-Parameter-Modell aus, bei dem auch plastische Verformungen durch Kornverschiebungen und -umlagerungen bei verdichteten Asphaltgemischen unter äußerer Belastung theoretisch miterfasst werden können. Der Forschungsbericht [Cost 1999] gibt dazu Modellparameter für verschiedene Asphalte vor. Es verbleiben jedoch auch bei diesem Modell gewisse Unzulänglichkeiten, insbesondere hinsichtlich des Langzeitverhaltens. Zwar kann durch weitere Modifikationen das Modell noch verbessert werden, doch sind diese Verfeinerungen nicht mehr von praktischem Nutzen, da die dadurch gewonnene theoretische Angleichung an das Baustoffverhalten durch viele andere praktische Erscheinungen wie Änderung mechanischer Eigenschaften des Asphalts durch irreversible Gefügeveränderungen oder durch Alterungsvorgänge im Bitumen überlagert und wieder verzerrt wird. Es stoßen also auch weiter verfeinerte Modelle allein aufgrund der tatsächlichen Materialveränderungen an ihre Grenzen. Daher ist gegenüber den hochkomplexen Formulierungen den einfacheren Modellen, deren Schwächen bekannt sind, der Vorzug zu geben. Wichtig dabei ist es, sich mit den in der Praxis auftretenden Phänomenen ingenieurmäßig auseinanderzusetzen.

Da bei den Asphaltmörteluntersuchungen aufgrund der sehr geringen Deformationen bei den im Vergleich zum Asphaltgemisch relativ bindemittelreichen Probekörpern nicht mit der Ausbildung eines Korngerüsts zu rechnen ist, kann dort also die plastische Komponente vernachlässigt werden.

2.1.2.3 Anwendungsfall selbstverdichtender Beton

Mit dem Sedimentationsverhalten und der Robustheit selbstverdichtender Betone (SVB) befasst sich [Lowke 2013] in seiner Dissertation. Da es bei dieser Betrachtung in erster Linie um die Frischbetoneigenschaften wie Sedimentationsstabilität und Fließfähigkeit geht, wird dort eine Modellierung der interpartikulären Wechselbeziehungen in den zementbasierten Suspensionen vorgenommen. Dabei wird auf rheologische Modelle zurückgegriffen, die nachfolgend in Hinblick auf die Übertragbarkeit auf den Asphaltmörtel dargestellt und analysiert werden.

Beton ähnelt in seiner Zusammensetzung aus Gesteinskörnungen und einem Bindemittel (Zementleim aus Zement und Wasser) in Bezug auf die Makrostruktur der des Asphalts. In Asphalt wird jedoch als Bindemittel Bitumen eingesetzt, welches durch sein dauerhaft temperaturabhängig-viskoelastisches Verhalten andere Eigenschaften als Zementleim vorweist, welcher durch den Hydratationsprozess erstarrt und dem Beton seinen festen Aggregatzustand verleiht. Die angestrebten Gebrauchseigenschaften von Bitumen, Asphaltmörtel und Asphalt gleichen daher grundsätzlich nicht jenen des Zementleims. Ungeachtet dessen kann auf beide Stoffgemische Beton und Asphalt/Asphaltmörtel das Mehrskalensmodell angewendet werden und die einzelnen Ebenen, wie in Abschnitt 1.2.3 für Asphalt beschrieben, abstrahiert werden. Im frischen Zustand lässt sich also auch auf Ebene des Zementleims (analog zur Mastixebene bei Asphalt) das rheologische Verhalten analysieren. Dabei kann das Fließverhalten und das Verhalten der Sedimentationsstabilität angesprochen werden. Ein wesentliches Merkmal der zementbasierten Suspension (Zementleim) stellt die Instationarität der rheologischen Eigenschaften infolge kolloidaler Oberflächen-Wechselwirkungen und der Hydratationsreaktion des Zements dar. Makroskopisch wird dies durch Thixotropie und Ansteifen des Betons sichtbar. Die Thixotropie beschreibt den reversiblen Prozess der Verringerung von Fließgrenze und Viskosität bei einer Scherbelastung mit anschließender Regenerierung nach Beendigung der Scherbelastung.

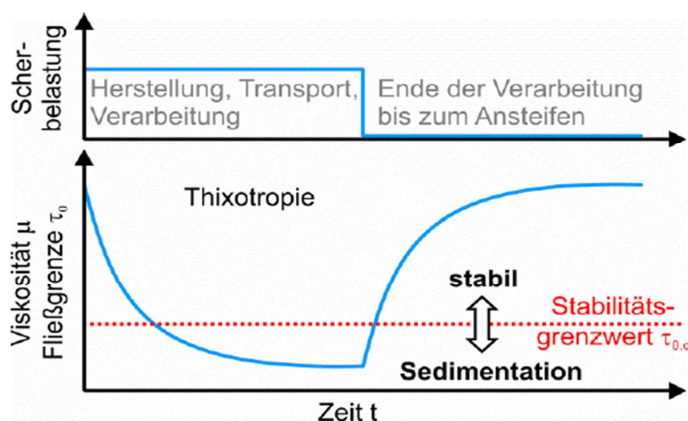


Abbildung 2.6:
Thixotropie im
Verarbeitungsprozess eines selbst-
verdichtenden
Betons.

[Lowke 2013]

[Lowke 2013] fasst die Problemstellung zusammen, indem er beschreibt, dass bislang das „Fluid“ selbstverdichtender Beton als kontinuierliches, homogenes Medium ohne Berücksichtigung des inneren Aufbaus betrachtet wurde. Die Beschreibung beruhte allein auf Basis des makroskopischen Deformationsverhaltens, welches mit Hilfe rheologischer Zustandsgleichungen und Modelle abgebildet wird. Jene eignen sich jedoch in erster Linie zur Beschreibung des Fließverhaltens bei hohen Scherraten. Im Bereich kleiner Scherraten sind sie nach [Haist 2009] hingegen mit einer großen Unsicherheit belegt. Zudem nimmt, wie [Papo 1988] feststellt, die Genauigkeit mit steigendem Feststoffanteil aufgrund zunehmender elastischer Eigenschaften der Suspension ab. Es ist bei dieser Betrachtung daher offensichtlich erforderlich, auch die Wechselwirkungen in der zementbasierten Suspension zu berücksichtigen.

Dies sind die kolloidalen Oberflächen-Wechselwirkungen:

- abstoßende elektrostatische Doppelschicht-Wechselwirkungen,
- anziehende van der Waals Wechselwirkungen sowie
- abstoßende sterische Wechselwirkungen infolge adsorbierter Polymere.

Daneben können zementbasierte Suspensionen jedoch auch noch durch die folgenden interpartikulären Wechselwirkungen beeinflusst werden, zu deren drei Hauptinteraktionen die

- Brown'sche Wechselwirkungen,
- hydrodynamische Wechselwirkungen sowie
- Kontakt-Wechselwirkungen

zählen.

Bisher findet die quantitative Betrachtung der interpartikulären Wechselwirkungen im Bereich zementbasierter Baustoffe kaum Beachtung. Dementsprechend liegen nur wenige gesicherte Erkenntnisse hinsichtlich der besonderen Randbedingungen zementbasierter Suspensionen, wie dem Einfluss der Hydratationsreaktion, der hohen Ionenkonzentration in der Porenlösung, der vergleichsweise geringen Oberflächenbelegung mit Fließmittelpolymeren oder dem hohen Feststoffgehalt vor. Erste Arbeiten zeigen jedoch die grundsätzliche Anwendbarkeit und Relevanz dieser Vorgehensweise für zementbasierte Baustoffe, sowohl hinsichtlich der rheologischen Eigenschaften als auch hinsichtlich der Gefügebildung und der Transporteigenschaften der erhärteten Zementsteinmatrix. [Lowke 2013] vertritt sogar die These, dass die Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen den Partikeln auf der Nano- und Mikroebene einen wesentlichen Beitrag zum tieferen Verständnis des makroskopischen Materialverhaltens leisten kann. Dies trifft im besonderen Maße auf die in seinem Forschungsprojekt betrachteten Aspekte der Rheologie zementbasierter Suspensionen und des Sedimentationsverhaltens selbstverdichtender Betone zu. Deshalb verfolgt er neben der ingenieurwissenschaftli-

chen Zielstellung einer Optimierung gleichberechtigt das Ziel, die maßgebenden interpartikulären Wechselwirkungen unter Berücksichtigung der besonderen Randbedingungen zementbasierter Suspensionen qualitativ und quantitativ zu beschreiben und im Hinblick auf ihre rheologische Relevanz zu klassifizieren. Durch die Verknüpfung mit den rheologischen Eigenschaften eröffnet sich schließlich die Möglichkeit der quantitativen Prognose der Sedimentationsbeständigkeit und Robustheit selbstverdichtender Betone.

Wenngleich diese Zielsetzung zweifelsfrei eine sinnvolle Kombination von wissenschaftlichen und experimentellen Ansätzen darstellt, die ein enormes Potential an Aussagekraft und Zuverlässigkeit verspricht, so muss an dieser Stelle jedoch angemerkt werden, dass im Bereich der Beton- und Zementforschung bereits ein beinahe unerschöpflicher Fundus an Fachwissen und Literatur vorhanden ist. Hier kann auf konkrete Fragestellungen gut reagiert werden und neue Ansätze auf bestehenden und bewährten Modellen aufgesetzt und weiterentwickelt werden. Im Bereich der rheologischen Untersuchungen von Asphalt und insbesondere von Asphaltmörtel, steht eine vergleichbare Literatur in diesen sehr speziellen Fragestellungen weder auf nationaler, noch auf internationaler Ebene zur Verfügung. Dies ist auf die Neuartigkeit der Prüf- und Beurteilungsmethodik zurückzuführen, die sich nach Einschätzung des Autors derzeit noch auf dem Niveau der Grundlagenforschung befindet. Auch aufgrund der Tatsache, dass bei den zementbasierten Suspensionen die Denkansätze und die rheologischen Modelle sich immer auf Fließverhalten und Stabilitätsverhalten, also auf die thixotropen Eigenschaften beziehen, die sich nur durch von Abschnitt 2.1.1 abweichende, modifizierte Modelle darstellen lassen, werden die von [Lowke 2013] hergeleiteten Ansätze für die folgenden Untersuchungen nicht weiter verfolgt. Dennoch sollten sie als Grundlage für spätere, weitergehende Forschungsansätze nicht unterschätzt werden.

2.1.2.4 Anwendungsfall Reaktionsharzmörtel bei Verbunddübeln

Verbunddübel werden häufig mittels Reaktionsharzmörtel im Beton oder Mauerwerk kraftschlüssig verklebt. Als Reaktionsharzmörtel werden in der Regel Duromere eingesetzt. Speziell finden dabei ungesättigte Polyester- (UP), Vinylester- (VE), Methacrylat- (MA) und Epoxidharze (EP) Anwendung. Für die Prognose des Langzeittragverhaltens der Verklebung hat [Kränkel 2017] das viskoelastische Deformationsverhalten der Verklebung mittels rheologischer Modellbildung untersucht. Als Eingangsparameter des rheologischen Modells werden dabei nichtlineare Funktionen in Abhängigkeit der Belastungshöhe und -dauer sowie des Deformationszustandes des Verbunddübels verwendet. Dafür werden kombinierte rheologische Modelle zur Beschreibung des viskoelastischen Verhaltens hergeleitet, die als Grundlage für das im Rahmen der Forschungsarbeit entwickelte rheologische Prognosemodell für Kriechverhalten von Verbunddübeln die-

nen. Da Verbunddübel jedoch ein ausgeprägt nichtlinear-viskoelastisches Deformationsverhalten aufweisen, muss eine Modifikation dieser Modelle vorgenommen werden. [Kränkel 2017] gelingt es mittels Auszugversuchen die Festigkeit und Steifigkeit der Verbunddübel zur Quantifizierung der verbundspannungsvarianten Verbundsteifigkeit der Verbunddübel als notwendigen, systemvereinfachenden Eingangsparameter zu ermitteln. Über weitere Verfahren, wie Dauerstandversuche und Degradationsversuche konnten weitere wichtige Systemparameter ermittelt und sein zugrunde gelegtes rheologisches Modell hinsichtlich Zuverlässigkeit überprüft werden. Grundlage für das rheologische Modell zur Prognose des Kriechverhaltens ist wiederum das Burgers-Modell, an dem jedoch grundlegende Modifikationen vorgenommen wurden. Nur dadurch konnte das Modell in die Lage versetzt werden, das ausgeprägt nichtlinear-viskoelastische Deformationsverhalten der Verbunddübel abzubilden. Denn bei einer Prognose des Langzeittragverhaltens von Verbunddübeln müssen folgende nichtlineare Parameter in das Modell eingebunden werden:

- 1) Verbundspannungsvariante Verbundsteifigkeit (zeitunabhängiges Tragverhalten),
- 2) zeitvariante Viskosität (zeitabhängiges Tragverhalten) und
- 3) verschiebungsvarianter Degradationsindikator (Strukturveränderungen unter Lasteinwirkung).

Bei der experimentellen Analyse des viskoelastischen Deformationsverhaltens unter quasi-statischen, also nicht-dynamischen Bedingungen sind dabei nach [Findley 1976] drei experimentelle Untersuchungsmethoden üblich:

- a) die Analyse der zeitlichen Entwicklung der Deformationen eines mit konstanter Spannung beanspruchten Werkstoffs im Kriechversuch,
- b) die Analyse der zeitlichen Entwicklung der Spannung eines mit konstanter Dehnung beanspruchten Werkstoffs im Relaxationsversuch, sowie
- c) die Analyse der zeitlichen Entwicklung der Deformation oder Spannung in Versuchen mit konstanter Steigerungsrate des jeweils anderen Kennwerts (Versuche mit konstanter Belastungs- oder Dehnrate).

Um den Praxisbezug zu wahren, wird bei [Kränkel 2017] speziell auf das Verhalten der Verbunddübel im Kriechversuch eingegangen. Wie er darlegt, kommt dieser Versuch den in der Praxis tatsächlich vorherrschenden Bedingungen am nächsten. Relaxationsversuche sind für die vorliegende Problemstellung nicht zielführend und werden unterlassen. Als Versuche mit konstanter Belastungs- oder Dehnrate werden belastungsgesteuerte Auszugversuche an den Verbunddübeln durchgeführt, wobei ein Versagen der Verbunddübel innerhalb weniger Minuten herbeigeführt wird. Diese Versuche dienen der Ermittlung des (quasi zeitinvarianten) Kurzzeittragverhaltens der Verbunddübel. Für

die Analyse des (zeitvarianten) viskoelastischen Deformationsverhaltens werden diese Versuche jedoch nur als bedingt geeignet eingeschätzt.

Da die Gebrauchseigenschaften von Asphalt und Asphaltmörtel überwiegend unter dynamischer Belastung benötigt werden, lassen sich direkte Rückschlüsse von [Kränkel 2017] auf die vorliegende Arbeit nicht ziehen. Vielmehr soll die Modellbildung für die Asphaltmörteluntersuchung zur möglichst genauen Abbildung der Realität unter dynamischen Lasten erfolgen. Die Untersuchungen an den Verbunddübeln sind zudem auf eine Prognose des Langzeittragverhaltens ausgerichtet, was bei den Untersuchungen an den Asphaltmörteln nicht der Fall ist, da deren Gebrauchseigenschaften gerade zum Zeitpunkt der Untersuchung ermittelt werden sollen. Ein bedeutender Aspekt ist jedoch in Hinblick auf zukünftige Forschungsmöglichkeiten an bituminösen Stoffen zu sehen. Denn Asphaltmörtelgemische (aus PmB) aber auch polymermodifizierte Bitumen besitzen ebenso wie die Reaktionsharze einen makromolekularen Aufbau. Diese Makromoleküle weisen keine ideal-gleichmäßige Verteilung auf. [Kränkel 2017] spricht von einer großen Anzahl möglicher Anordnungen der Kettenelemente mit unterschiedlichen Abständen zwischen den Vernetzungspunkten einzelner Monomere und damit unterschiedlich stark ausgeprägten Bindungskräften innerhalb eines Makromoleküls. Für jede dieser Bindungen könnten einzelne geeignete rheologische Modelle (z.B. Maxwell- oder Voigt-Kelvin-Modell) eingesetzt werden. Die Kombination aller Modellelemente führt zu einem generalisierten Modell, welches aus (endlich) vielen Parametern besteht. Bei Belastung kommt es in Abhängigkeit von den intermolekularen Unterschieden der einzelnen Bindungen zu variablen Deformationsreaktionen der einzelnen Makromolekülsegmente. Ein generalisiertes Modell bietet die Möglichkeit dieses variable Deformationsverhalten zu abstrahieren und damit den gesamten Werkstoff abzubilden. Dies erfordert jedoch eine Anpassung sämtlicher Modelleingangsparameter (E_i , λ_i) der einzelnen Elemente an das Deformationsverhalten des Gesamtmodells und damit an das Deformationsverhalten des gesamten polymeren Werkstoffs oder eben des Asphaltmörtelgemisches. Für den Anwendungsfall, bei dem lediglich die Summe der das Deformationsverhalten beschreibenden Parameter E und λ benötigt wird (diese können mittels Rheometer ermittelt werden), beispielsweise für den Fall der IST-Zustand Beschreibung des Stoffes, ist dieses Vorgehen gut geeignet, da es das viskoelastische Deformationsverhalten gut nachbildet. In diesem Fall kann das generalisierte Modell also wieder auf das Burgers-Modell zurückgeführt werden, welches in den Asphaltmörteluntersuchungen Anwendung finden soll. Werden hingegen einzelne Parameter, beispielsweise jene, die für das Langzeitverhalten in Form von Kriechen verantwortlich sind, für PROGNOSE-Zustand Beschreibungen benötigt, so ist diese Vorgehensweise aufgrund der hohen Komplexität und der regelmäßig nicht vollumfänglich und teilweise nur mit enormen

Aufwand bestimmbarer Modelleingangsparameter (E_i , λ_i) der einzelnen Elemente nur bedingt geeignet.

Neben den unter Abschnitt 2.1.1 dargestellten und dem generalisierten Modell zur Beschreibung des linear-viskoelastischen Werkstoffverhaltens gibt es noch zahlreiche rheologische Modellansätze zur Veranschaulichung des Deformationsverhaltens. Alle Modelle bestehen aus einer Reihen- und/oder Parallelschaltung der rheologischen Grundmodelle. Für eine Übersicht über einige weitere solcher rheologischen Modelle wird an dieser Stelle auf [Reiner 1968], [Findley 1976] und [Krawietz 1986] verwiesen. Aus oben beschriebenen Gründen finden diese sehr komplexen Modelle hier jedoch keine Anwendung.

2.1.3 Übertragung der Rheologie auf Asphaltmörtel

Unter Berücksichtigung der Zusammenhänge aus Abschnitt 2.1.1 und unter Einbeziehung der Erfahrungen aus den anderen in Abschnitt 2.1.2 dargestellten Stoffbereichen lassen sich Grundlagen für die rheologischen Untersuchungen von Asphaltmörtel entwickeln. Als Bedingung wird vom Autor die Praxisnähe einerseits und eine möglichst einfache rheologische Modellbildung, d.h. ohne komplexe Parameterbestimmung, andererseits festgelegt, ohne dabei die Aussagekraft der Ergebnisse außer Acht zu lassen. Um die vereinfachten Ansätze hinsichtlich Zuverlässigkeit der Aussagekraft zu verifizieren, soll in Abschnitt 3.4 ein Vergleich der Ergebnisse aus den Asphaltmörteluntersuchungen mit dem Dynamischen Scherrheometer mit Prüfergebnissen aus Untersuchungen stattfinden, bei denen aus den geprüften Asphaltmörteln hergestellte Asphalte im Rahmen des Forschungsprojektes FE 07.0253/2011/ERB mit dem Titel „Repräsentative Ermittlung der performance-relevanten Asphalteigenschaften als Grundlage neuer Vertragsbedingungen“, [Roos 2015], vermessen und ausgewertet wurden. Daraus sollen Rückschlüsse auf das Verfahren und die gewählten Rahmenbedingungen gewonnen werden.

Asphalt bzw. Asphaltmörtel ist aufgrund des kolloidalen Charakters des Bindemittels Bitumens stark temperaturabhängig, mit der Folge, dass er sich bei niederen Temperaturen nahezu wie ein elastischer Festkörper und bei hohen Temperaturen annähernd wie eine viskose Flüssigkeit verhält. Im dazwischen liegenden Temperaturbereich ändert sich das Verhalten in Abhängigkeit von den Eigenschaften seiner Bestandteile unter Berücksichtigung einer gegenseitigen Beeinflussung. Asphalt bzw. Asphaltmörtel ist also als temperaturabhängig viskoelastisch einzustufen. Es ist daher notwendig, die Analyse von Asphaltmörtel in mehreren Temperaturstufen („Temperatursweep“) vorzunehmen.

Als Fahrbahnbelag erfährt Asphalt grundsätzlich eine dynamische Belastung aus dem Überrollen des Verkehr als mechanogene Beanspruchung und aus regelmäßig (tages- und jahreszeitlich) einwirkenden Temperaturänderungsspannungen als kryogene Beanspruchung. Aufgrund der bekanntermaßen vorwiegenden mechanogenen Beanspruchung soll bei der Untersuchung im Scherrheometer eine der Praxis nachempfundene kurzweilige dynamische Belastung aufgebracht werden. Prüfungen am Bitumen werden vorwiegend im verformungskontrollierten, auch als weggesteuert bezeichneten Modus durchgeführt. Dabei wird eine definierte Verformung γ in Form einer Auslenkung der oberen Platte aufgebracht und die dafür notwendige Schubspannung τ aus dem gemessenen Drehmoment abgeleitet.

2.1.4 Funktionsweise des Dynamischen Scherrheometers

Mittels Scherrheometer, welches über dynamische Rotation der Messgeometrie (vgl. Abbildung 2.7a) eine Torsionsbeanspruchung auf den Probekörper aufbringt und dabei den Verlauf des erforderlichen Drehmomentes M und den Verdrehwinkel α der Stempelachse aufnimmt, können die rheologischen Kenngrößen eines Probekörpers ermittelt werden.

Bei den folgenden Untersuchungen wird die Messgeometrie des Systems Platte/Platte verwendet. Das Gesamtsystem aus Rheometer und Messgeometrie, die Systemparameter und die Berechnungsformeln sind im Folgenden dargestellt.

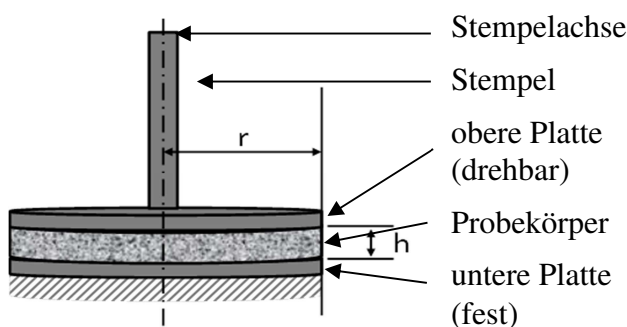


Abbildung 2.7a:
Messgeometrie eines
Dynamischen Scherrheometers mit dem
System Platte/Platte.
(Ansicht)

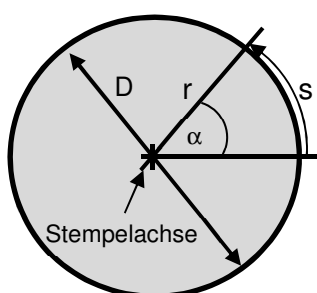


Abbildung 2.7b:
Messgeometrie eines
Dynamischen Scherrheometers mit dem System
Platte/Platte unter Rotation mit Winkel α um
die Stempelachse.
(Draufsicht)

Dabei ist

r	Plattenradius [mm]
D	Plattendurchmesser [mm]
α	Verdrehwinkel [°]
h	Plattenabstand [mm]
s	Auslenkung am äußersten Rand [mm]

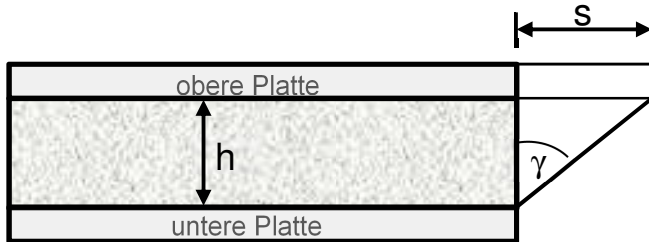


Abbildung 2.7c:
Darstellung der Verzerrung γ an der Messgeometrie eines Dynamischen Scherrheometers mit dem System Platte/Platte.

Daraus ergibt sich:

$$\begin{aligned} \gamma & \text{ Verformung [-]} \\ \gamma & = s / h = r \cdot \alpha / h \end{aligned}$$

Eine Auslenkung s der oberen Platte am äußersten Umfang um den Plattenabstand h bewirkt somit 100 % Deformation γ . Bei einer Platte mit einem Durchmesser von 25,0 mm und 6,0 mm Spalt muss die Geometrie am Plattenrand also um 6,0 mm ausgelenkt werden, um 100 % Deformation zu erzielen. Dies entspricht einer Drehung der oberen Platte um ca. 25,6 °. Bei den nachfolgenden Untersuchungen wurde eine Deformation von 1,0 % gewählt. Daraus ergibt sich bei einem Spaltabstand von 6,0 mm und 25,0 mm Plattendurchmesser ein Verdrehwinkel aus der Rotation um die Achse des Stempels von $\alpha = 0,275^\circ (= 4,8 \cdot 10^{-3} \text{ rad})$.

Das Rheometer ist mit Messeinheiten für den Verdrehwinkel α und das aufgebrachte Drehmoment M ausgestattet. Erfasst wird dabei auch der Zeitunterschied zwischen den Extremwerten der eingebrachten Spannung und den Extremwerten der daraus resultierenden Deformation. Unter Berücksichtigung der Frequenz kann daraus mit nachstehenden Formeln der Phasenverschiebungswinkel δ berechnet werden.

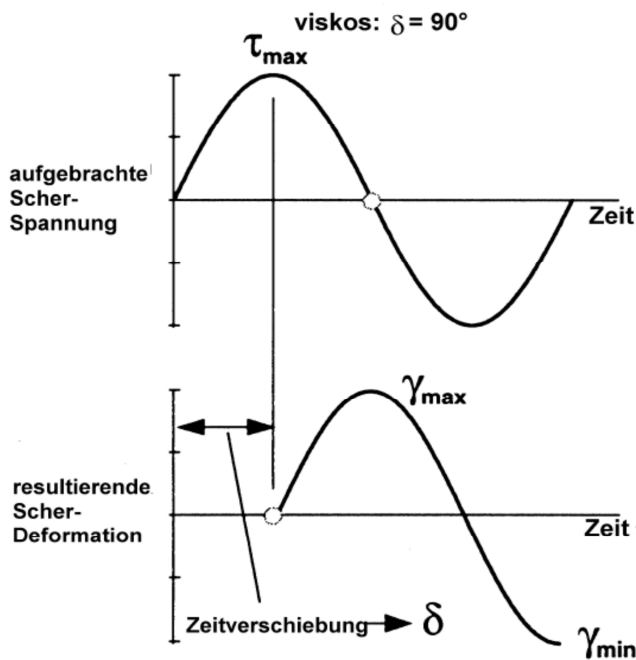


Abbildung 2.7d:
Graphische Ermittlung
des Phasenverschie-
bungswinkels δ .
Bei absolut viskosen
Körpern beträgt
 $\delta = 90^\circ$.
[Litzka 2001]

Bei oszillierender Bewegung der oberen Platte werden aus den Größen

π	Kreiszahl π [-]
f	Frequenz [Hz]
M	maximal aufgebrachtes Drehmoment [Nm]
Δt	Zeitverschiebung zwischen τ_{\max} und γ_{\max} [s]

die Größen

ω	Winkelgeschwindigkeit [1/s]
τ	Scherspannung [Pa]
t	Zeit für eine Schwingung [s]
δ	Phasenverschiebungswinkel [$^\circ$]
G^*	komplexer Schermodul [Pa]

durch ω	$= 2 \cdot \pi \cdot f$
τ	$= (2 \cdot M) / (\pi \cdot r^3)$
t	$= 1 / f$
δ	$= \Delta t / t \cdot 360^\circ$
G^*	$= \tau / \gamma$

berechnet.

Die Berechnung von G^* und δ erfolgt automatisch durch das Messgerät bzw. den angeschlossenen Rechner.

Aus G^* und δ können mit nachstehenden Formeln die Kombinationswerte

G'	$= G^* \cdot \cos(\delta)$	Speichermodul [Pa]
G''	$= G^* \cdot \sin(\delta)$	Verlustmodul [Pa]

berechnet werden.

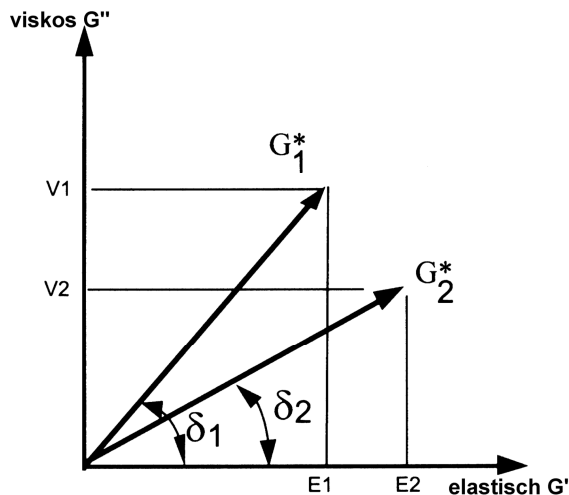


Abbildung 2.7e:
Diagramm von zwei unterschiedlichen Körpern mit betragsmäßig gleichem kompl. Schermoduln G^* aber unterschiedlichen Speicher- und Verlustmoduln G' und G'' .
[Litzka 2001]

Die Berechnungen des Speichermoduls G' und des Verlustmoduls G'' gewinnt in der Ermittlung der Kenngrößen für Asphaltmörtel an Bedeutung, da von diesen Moduln Aussagen zu den elastischen und zu den viskosen Anteilen im komplexen Schermodul G^* und damit Aussagen zu den Bindemittleigenschaften hergeleitet und wie im folgenden Abschnitt dargestellt, auch Aussagen zu den Gebrauchseigenschaften von Asphaltmörtel abgeleitet werden können.

2.2 Erfahrungen aus Bitumenuntersuchungen

An der Technischen Universität München wird im Zuge von Kontrollprüfungen an Bundes- und Landesstraßen in Bayern seit über zwei Jahrzehnten eine Sonderuntersuchung am Bitumen durchgeführt, um die in Bayern zum Einsatz kommenden Bindemittel zu erkunden und um zugleich aktuelle und neue Prüfverfahren anzuwenden und damit einen Bewertungshintergrund für vertragliche Anforderungen sammeln zu können. Dabei wurde seit über zehn Jahren auch das Dynamische Scherrheometer (DSR) eingesetzt. Hierbei konnten im Labor des Centrums Baustoffe und Materialprüfung der Technischen Universität München bereits umfangreiche Erfahrungen im Umgang mit den Prüfgeräten, der Probenvorbereitung sowie dem Prüfverfahren gesammelt werden. Für das Untersuchungsverfahren liegt mittlerweile eine Arbeitsanleitung (AL DSR (T-Sweep)) [AL DSR 2014] für Bitumenuntersuchungen vor. Bei diesem Prüfverfahren werden die Kenngrößen komplexer Schermodul G^* und Phasenverschiebungswinkel δ über mehrere Temperaturstufen ermittelt. Das Verfahren ist international bekannt und hat sich in den zurückliegenden Jahren auch national etabliert. Neben den oben genannten Kenngrößen wird seit mehreren Jahren auch das Verformungsverhalten des Bitumens mit der sogenannten Multiple Stress Creep and Recovery-Prüfung (MSCR) am DSR untersucht. Dabei werden nach kurzer Belastung und anschließender Entlastung der Probe nach zehn Zyklen aus einem Last-Verformungsdiagramm die Rückformung

und die Nachgiebigkeit von Bitumen unter definierter Scherbeanspruchung ermittelt. Bei dieser kraftgesteuerten Untersuchung treten große, in der Praxis nicht vorkommende, Verformungen auf. Daher eignet sich dieses Verfahren nicht für die Untersuchungen an Asphaltmörteln, welche unter Praxisbedingungen nur äußerst geringen Verformungen ausgesetzt sind.

Für die Ergebnisse der Bitumenuntersuchung soll derzeit in einem bundesweiten Forschungsvorhaben (FE 29.0327/2013 „Datentechnische Erfassung und Auswertung von Prüfdaten zur Erfahrungssammlung“) durch aufwendige Datensammlung und -auswertung ein Bewertungshintergrund u.a. für die rheologischen Kennwerte an verschiedenen Bitumenarten und -sorten geschaffen werden. Die Zuverlässigkeit und Aussagekraft der Ergebnisse sowie die Bedeutung und die Notwendigkeit rheologischer Untersuchungen im Bereich des Asphaltstraßenbaus sind in der Fachwelt mittlerweile unumstritten.

2.3 Modifizierte Prüfeinrichtung für Asphaltmörtel

Das hinreichend praxiserprobte DSR-Verfahren am reinen Bitumen soll nun im Zuge dieser Arbeit erweitert werden. Erste und einfachere Ansätze, dieses Verfahren zur Beurteilung von Asphaltmastix anzuwenden, gelangen bereits im Zuge mehrerer Forschungsprojekte mit zufriedenstellenden Ergebnissen.

In dieser Arbeit soll die Möglichkeit geschaffen werden, auch die quasi untrennbar im Asphaltmörtelgemisch vorliegenden Komponenten und Zusätze, wie beispielsweise Fasern, Gummipartikel und Wachse im DSR zu analysieren. Aufgrund der Spezifikationen der Komponenten von Asphaltmörtelgemischen müssen an dem aus der Bitumenuntersuchung bekannten Verfahren daher mehrere Modifikationen vorgenommen werden.

2.3.1 Prüfparameter

Im Rahmen einer Voruntersuchung wurden die Rahmenbedingungen für das Prüfverfahren entwickelt. In mehreren Prüfläufen wurden dabei das Vorgehen und die einzelnen Parameter hinreichend in Bezug auf Anwendbarkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse überprüft.

Im folgenden Abschnitt sollen vorwiegend die Parameter Prüftemperatur, Temperaturverläufe, Spaltmaß, Prüffrequenz und aufgebrachte Deformation praxisnah modifiziert und definiert werden.

Es gelten für die folgenden Untersuchungen die nachstehenden Konventionen:

1) Prüftemperatur - Temperaturverlauf von 90 °C bis 30 °C

Bei der Prüfung mittels DSR ist die Reihenfolge der Temperaturwahl ein wichtiger Aspekt. Dies trifft insbesondere bei polymermodifizierten Bindemitteln zu, deren viskoelastisches Verhalten durch Strukturänderungen der Polymerketten bzw. durch Polymernetzbildung oder -auflösung überlagert werden kann. Der sogenannte Temperatursweep erfolgt regelgemäß bei den Bitumenuntersuchungen von 30 °C bis 90 °C in Stufen von 10 K. Ein umgekehrter und weitaus realistischerer Temperatursweep, nämlich von 90 °C bis 30 °C, der bei den reinen Bitumenuntersuchungen aufgrund eines möglichen Ausfließens insbesondere bei den viskositätsveränderten Bindemitteln im oberen Prüftemperaturbereich und einer damit einhergehenden Ergebnisverzerrung nicht ausnahmslos funktioniert, soll bei den Asphaltmörtelprobekörpern unter Zuhilfenahme einer Stützstruktur ermöglicht werden. Damit kann dem Erstarrungsverhalten bzw. dem Polymernetzbildungsverhalten der polymermodifizierten Bitumen im Rahmen dieser Untersuchungen Rechnung getragen werden. Erste Tastversuche zeigten, dass sich dieses Phänomen durchaus in den gemessenen rheologischen Eigenschaften äußert. Ein weiterer entscheidender Vorteil bei diesem Vorgehen ist, dass bei den anfänglichen hohen Temperaturen in Folge der geringen Steifigkeiten des Asphaltmörtels gegebenenfalls noch eine Umlagerung der Gesteinspartikel stattfinden kann. Diese Umlagerung kann mit den Vorgängen bei der in der Praxis stattfindenden Verdichtung verglichen werden. Auch das hinreichende Verkleben des eingebauten Asphaltmörtels mit der oberen und unteren Platte der Messgeometrie wird bei den anfänglich hohen Temperaturen zuverlässiger sichergestellt.

2) Spaltmaß von 6 mm

Aufgrund der maximalen Partikelgröße von 2,0 mm wird als dessen 3-faches Maß ein Spaltmaß von 6,0 mm gewählt.

3) Zuhilfenahme einer Stützstruktur

Aufgrund des Spaltabstandes von 6,0 mm wird zur Verhinderung eines seitlichen Ausfließens des Probekörpers im eingebauten Zustand bzw. während des Prüfablaufes eine die Messgeometrie umfassende Stützstruktur in Form eines Teflonringes (s. Abbildung 2.8) verwendet. Um auftretende Reibungskräfte zu reduzieren ist dieser so konzipiert, dass der obere Bereich des Probekörpers frei liegt. Zudem zeichnet sich der Werkstoff Teflon durch äußerst geringe Oberflä-

chenhaftung aus, weshalb flächendeckende Anhaftungen und Bitumenrückstände am Teflonring nicht zu beobachten waren. Im Rahmen von Tastversuchen wurde zur Abschätzung der Randreibung der Teflonring zusätzlich mit Silikonfett versehen. Ein signifikanter Einfluss eventueller Reibungskräfte konnte dabei nicht festgestellt werden. Die Seitenreibungskräfte werden auch ohne Verwendung von Silikonfett im Vergleich zu den inneren Reibungskräften als absolut untergeordnet eingestuft und daher nicht weiter untersucht.



*Abbildung 2.8:
Für die Prüfung von Asphaltmörtel im DSR entwickelte Stützstruktur in Form eines Teflonringes, der den Probekörper stützt und dessen seitliches Auflösen verhindert.*

4) Frequenz von 10 rad/s bzw. 1,59 Hz.

Aus den SHRP-Studien geht hervor, dass die Belastungszeit bei Überrollung eines Punktes an der Oberfläche der Asphaltfahrbahn bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h mit etwa 0,1 Sekunden anzunehmen ist. Diese Belastungszeit entspricht einer Frequenz von 10 rad/s bzw. 1,59 Hz. Da vor allem LKWs, wie dies auch die bekannte Vierte-Potenz-Regel beschreibt, die maßgebende Belastung auf den Baustoff Asphalt darstellen, wird die Prüfung ausschließlich mit dieser Frequenz durchgeführt.

5) Deformation von 1,0 %

Bei den Bitumenuntersuchung am DSR wird nach [AL DSR 2014] die Deformation an die jeweilige Prüftemperatur und Bitumenart und -sorte angepasst. Die Werte können dabei zwischen 1,0 % und 30,0 % liegen. Im Rahmen von Tastversuchen wurden an einer Asphaltmörtelprobe Prüfungen mit den Deformationen 0,1 %, 0,5 %, 1,0 %, 2,0 %, 3,0 %, 5,0 % und 10,0 % durchgeführt. Die Frequenz wurde beibehalten, was bei einer Steigerung der Deformation zu einer höheren Scherrate führt. Der zu beobachtende Unterschied bei den ermittelten komplexen Schermoduln und Phasenverschiebungswinkeln lässt sich durch das Zeit-Temperatur Superpositionsprinzip nach [Litzka 2001] und [Jongepier 1969] erklären, das besagt, dass eine Änderung der Scherrate einer Änderung der Temperatur am untersuchten Probekörper gleichkommt, was eine Änderung der

Ergebnisse erwarten lässt. Hinter dieser Superposition steht eine Abhängigkeit, der sogenannte shift factor, dessen Ermittlung im Zuge weiterer Forschungen sicherlich noch zusätzliche Aspekte zur Beurteilung von Asphaltmörteln liefern kann. Hier konnte beim komplexen Schermodul zumindest eine sehr gute logarithmische und beim Phasenverschiebungswinkel eine gute lineare Korrelation festgestellt werden. Aufgrund dieser Beziehungen ohne signifikante Ausreißer kann also ein Wert innerhalb der betrachteten Deformationen ausgewählt werden. Zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse der verschiedenen Asphaltmörtelvarianten wird in dieser Arbeit eine feste Deformation von 1,0 % gewählt, denn im Vordergrund stand die Nähe zur Praxis, in der auf der Fahrbahn nur sehr geringe Verformungen durch Überrollung zu erwarten sind. Eine weitere Reduzierung der Deformationen auf $< 1,0$ % könnte auf der anderen Seite zu Messfehlern führen, indem die Auflösung der Messsensoren erreicht wird. Durch insgesamt sehr geringe Deformationen kann das Auftreten von Kornberührungen oder gar Kornverkeilungen während des Prüfablaufs wirksam reduziert werden. So kann die gemessene Steifigkeit rein auf die Steifigkeit des zwischen den fGK vorhandenen Mastix zurückgeführt werden. Kornverkeilungen, die sich aufgrund einer Überschreitung der maximalen Torsionskraft durch eine Fehlermeldung am Prüfgerät und durch extreme Ausreißer in den Ergebnisdaten widerspiegeln würden, waren nicht zu beobachten.

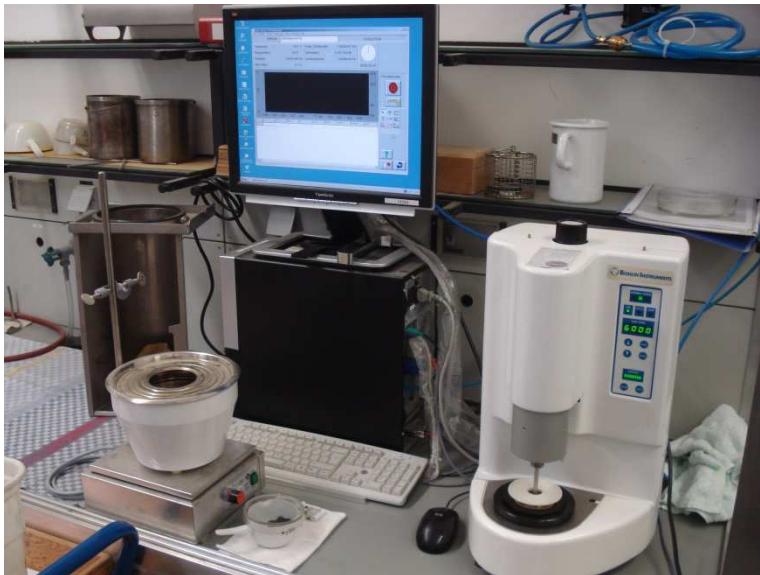
Während der Untersuchungen von Asphaltmörtel waren Anpassungen hinsichtlich der Rahmenbedingungen nicht zugelassen, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen.

Tabelle 2.2: Zusammenfassung der Prüfparameter für die Untersuchung von Bitumen und Asphaltmörtel mit dem Dynamischen Scherrheometer (die modifizierten Prüfparameter sind blau hinterlegt)

	Untersuchung von Bitumen	Untersuchung von Asphaltmörtel
Regelwerk	DIN EN 14770, AL DSR 2014	AL DSR Mörtel (intern entwickelt)
Prüfgeometrie	25 mm Platte-Platte	25 mm Platte-Platte
Frequenz	1,59 Hz	1,59 Hz
Spaltabstand	2,0 mm	6,0 mm unter Nutzung einer Stützstruktur (Teflonring)
Prüftemperatur	Temperatursweep 30 °C – 90 °C	Temperatursweep 90 °C – 30 °C
Partikelgröße	keine Partikel	max. 2,0 mm
Deformation	abhängig von Prüftemperatur und Bitumenart und -sorte zwischen 1,0 % und 30,0 %.	1,0 %
Kenngrößen	kompl. Schermodul G^* Phasenverschiebungswinkel δ	kompl. Schermodul G^* Phasenverschiebungswinkel δ

2.3.2 Beschreibung der Prüfeinrichtung

Im folgenden Abschnitt wird die Anordnung der Prüfeinrichtung des Dynamischen Scherrheometers im Asphalt- und Bitumenlabor des Centrums Baustoffe und Materialprüfung der Technischen Universität München dargestellt und die Messeinrichtung beschrieben.



*Abbildung 2.9:
Anordnung der Prüfeinrichtung (DSR-Messgerät und Rechner mit Prüfsoftware) für die Asphaltmörteluntersuchungen am Dynamischen Scherrheometer.*

Es wurde das DSR-Prüfgerät vom Typ BOHLIN DSR CVO 50 eingesetzt. Das Gerät verfügt über eine Wasserbadtemperierung des Prüfkörpers mit einer Temperaturregelung, die eine Temperierung des Prüfkörpers während der gesamten Prüfdauer über den Mindestbereich von 5 °C bis 90 °C mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1$ °C ermöglicht. Die Temperaturregelung schließt beide Platten ein, wodurch ein Temperaturgefälle an und zwischen den Platten vermieden wird. Der Antriebsmotor des Rheometers deckt den Drehmomentbereich von 0,0005 mNm bis 50 mNm ab und verfügt dabei über eine Winkelauflösung von 9×10^{-7} rad.

Über die Messsoftware werden je Untersuchungsstufe (Temperaturstufe) zehn Einzelmesspunkte des komplexen Schermoduls G^* und des Phasenverschiebungswinkels δ aufgenommen, die dann je Temperaturstufe zu einer Mittelwertbildung für den komplexen Schermodul G^* und den Phasenverschiebungswinkel δ herangezogen werden. Je Messreihe ergeben sich somit für jeden Temperatursweep sieben Werte für den komplexen Schermodul G^* und sieben Werte für Phasenverschiebungswinkel δ . Die Anwahl der Temperaturstufen erfolgt in Stufen von 10 K, jedoch abweichend von den bisherigen Festlegungen aus den Bitumenuntersuchungen von 90 °C bis 30 °C.

Zwar wird der Wert des komplexen Schermoduls G^* den gerätespezifischen Messbereich an der oberen Grenze überschreiten, aber aus der Literatur kann von vergleichba-

ren rheologischen Untersuchungen abgeleitet werden, dass die Messergebnisse oberhalb des maximalen Schubspannungsbereiches des Gerätes noch als relative Ergebnisse verwendet werden können. Damit sind diese Werte also für Vergleiche einzelner Datensätze untereinander, unter sonst gleichen Prüfbedingungen, verwendbar. Auch die Tatsache, dass die Steifigkeitsverläufe im Temperaturbereich von 30 °C mit den höchsten Steifigkeitswerten keine Auffälligkeiten wie Knicke oder Nullwerte zeigen, unterstützt diese Aussage.

Das im Zuge der vorliegenden Untersuchungen praktizierte Vorgehen bei Probenvorbereitung, Probeneinbau und Prüfablauf wurde in einer Arbeitsanleitung zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften von Asphaltmörtel im Dynamischen Scherrheometer (DSR) – Temperatursweep (AL DSR Mörtel) zusammengestellt. Diese Arbeitsanleitung mit Fotodokumentation ist in Anhang 1 enthalten.

2.4 Statistik und Ausreißerprüfung

2.4.1 Statistik

Wie bei den Bitumenuntersuchungen am DSR, wurden die Untersuchungen der Asphaltmörtelproben ebenfalls durch mindestens zwei, an separaten Probekörpern ermittelten, gültigen Bestimmungen durchgeführt. Bei den ersten Untersuchungen wurden jeweils sechs Prüfläufe am selben Asphaltmörtelgemisch durchgeführt. Diese umfangreichen Analysen zeigten, dass auch eine Dreifach- bzw. Doppelbestimmung der Werte ausreichend ist und dadurch der Prüfaufwand deutlich reduziert werden kann. Da nun abhängig von den einzelnen Varianten unterschiedlich umfangreiche Messergebnisse vorliegen (2-fach, 3-fach, 6-fach bestimmte Werte) wurde bei der statistischen Auswertung differenziert.

Zur Ermittlung der Zuverlässigkeit der ermittelten Daten und zur Verifizierung der Funktionsweise des Prüfverfahrens insgesamt, erfolgte eine statistische Überprüfung der einzelnen Messergebnisse über eine einfache Ausreißerprüfung. Bei vorliegendem Prüfverfahren wird vereinfachend angenommen, dass die ermittelten Werte sich gleichmäßig um den "wahren" Wert anordnen. Es wurde daher bei der Ausreißerprüfung hinsichtlich der Verteilung der einzelnen Werte von einer Standardnormalverteilung ausgegangen.

In Anlehnung an die Technischen Prüfvorschriften für Asphalt (TP Asphalt-StB) werden als statistische Kenngrößen der Mittelwert μ , die Standardabweichung σ und die Spannweite d ermittelt. Der Mittelwert μ kann hier als hinreichende „statistische Schätzung“ durch den arithmetischen Mittelwert \bar{x} ersetzt werden, da unterstellt werden kann, dass die betreffende Grundgesamtheit der Werte vollständig und frei von zufälligen und

systematischen Prüfergebnisabweichungen geprüft wurde und das Prüfverfahren unter denselben Bedingungen unbegrenzt oft durchführbar ist (ein Prüfgerät, ein Laborant). Unter selbigen Voraussetzungen ergibt sich auch die Standardabweichung σ als hinreichende „statistische Schätzung“ aus der empirischen Standardabweichung s . Die Spannweite d ist die Differenz zwischen dem größten und dem kleinsten Einzelwert einer Messreihe. Sie ist immer dann heranzuziehen, wenn im Rahmen einer Mehrfachbestimmung aus mehreren Einzelwerten ein Ergebnis zu bilden ist. Die kritische Spannweite dient dazu, bei der Durchführung mehrerer Bestimmungen an Probesteilen von ein und derselben Probe in einem Labor die Verträglichkeit der Einzelwerte miteinander zu prüfen. Die zugehörige Entscheidungsregel lautet: Die ermittelten Einzelwerte sind miteinander verträglich, daher anzunehmen und in die weiteren Untersuchungen über die Mittelwertbildung einfließen zu lassen, falls ihre Spannweite d nicht größer als die zugehörige kritische Spannweite d_a ist. Die kritische Spannweite d_a für Einzelwerte wird aus der entsprechenden Standardabweichung σ_a und einem Faktor errechnet, der von der Anzahl der Einzelwerte und der gewählten statistischen Sicherheit P abhängt. Bei der Ermittlung der kritischen Spannweite d_a wird hier eine statistische Sicherheit von $P = 95\%$ angestrebt.

2.4.2 Ausreißerprüfung

Bei den 6-fach bestimmten Werten der in Abschnitt 3.1 näher beschriebenen Streckenrezepturen der Strecken 8, 9, 11, 12 und 13 wird die Beziehung der Kenngrößen Standardabweichung σ_a und kritische Spannweite d_a aus den [TP Asphalt 2016] durch Extrapolation zu $d_a = 4,00 \cdot \sigma_a$ zugrunde gelegt. Diese Schranke wird gleichmäßig um den Mittelwert angelegt und bei der Ausreißerprüfung als obere und untere Grenze, jeweils mit dem Abstand von $2,00 \cdot \sigma_a$ festgelegt. Außerhalb dieser Schranken liegende Werte werden als Ausreißer deklariert und eliminiert. Anschließend wird bei diesen Datensätzen eine Auswertung der Zuverlässigkeit der Ergebnisse mittels modifizierter Box-Plots, so genannten „Box-Whisker-Plots“ nach [Sachs 2006] vorgenommen. Dabei wird der Medianwert mit dem unteren und oberen Quartil sowie Minimal- und Maximalwert einer Wertereihe je Prüftemperatur graphisch in einem Diagramm dargestellt (Anhang 4). Anhand dieser Box-Whisker-Plots kann dann visuell beurteilt werden, in welchem Verhältnis die Extremwerte der Datenreihen zum Median und zu den Quartilen stehen. Bei Gegenüberstellung der Box-Whisker-Plots der unbereinigten Daten und der im ersten Schritt bereinigten Daten kann dann auf die Eignung der gewählten Vorgehensweise zur Ermittlung der Ausreißer und auf die Qualität der ermittelten Werte geschlossen werden (s. Abbildung 2.10a und 2.10b).

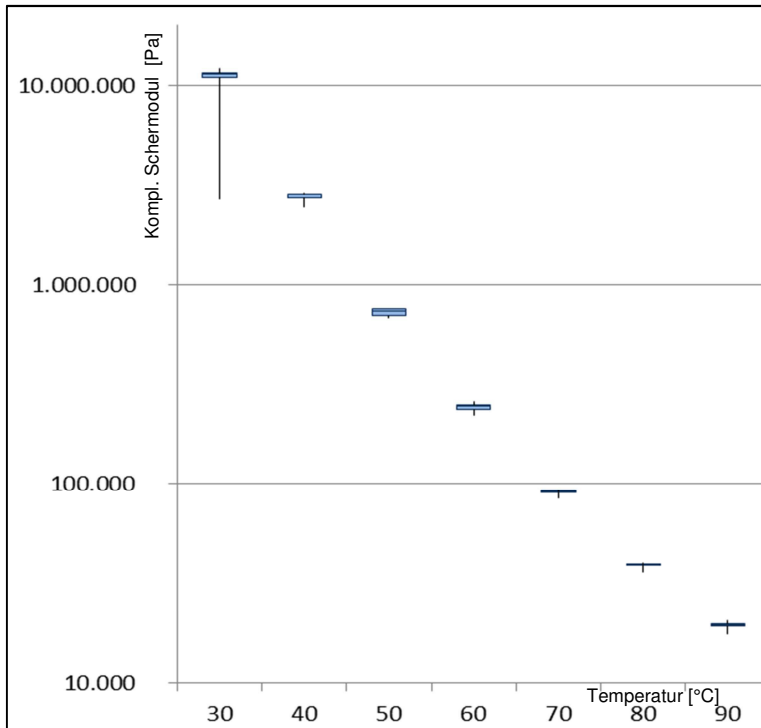


Abbildung 2.10a:
Box-Whisker-Plots der
Daten von Strecke 11
vor der Ausreißer-
bereinigung.

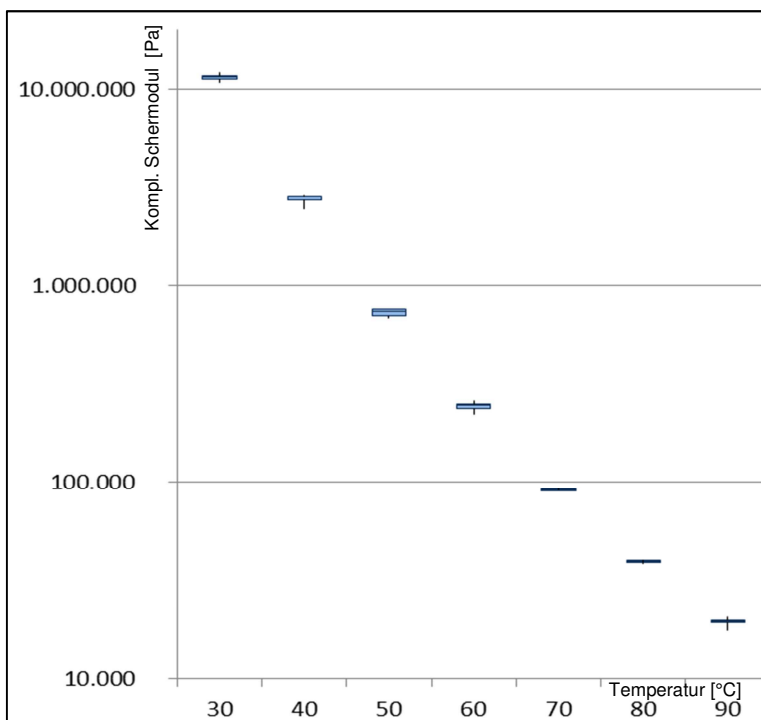


Abbildung 2.10b:
Box-Whisker-Plots der
Daten von Strecke 11
nach der Ausreißer-
bereinigung.

Bei den 3-fach bestimmten Werten wird ein analoges Verfahren gewählt, bei dem die Beziehung der Kenngrößen Standardabweichung σ_a und kritische Spannweite d_a gemäß [TP Asphalt 2016] zu $d_a = 3,31 \cdot \sigma_a$ zugrunde gelegt wird. Die obere und untere Schranke wird jeweils mit dem Abstand von $1,66 \cdot \sigma_a$ um den Mittelwert gelegt und die erkannten Ausreißer eliminiert. Box-Whisker-Plots wurden hier aufgrund der geringen Aussagekraft nicht erstellt.

Bei den 2-fach bestimmten Varianten kann eine Ausreißerprüfung mittels Mittelwertbildung und Standardabweichung bzw. mittels Box-Whisker-Plots nicht durchgeführt werden. Hier erfolgt die Wertung der Ergebnisse anhand einer Plausibilitätsbeurteilung.

Als Maßstab für die Plausibilitätsbeurteilung wurde anhand der unten aufgeführten Formeln der Variationskoeffizient V aus dem arithmetischen Mittelwert \bar{x} einer Datenreihe je Temperatur und deren empirischen Standardabweichung s mit den folgenden Formeln gebildet.

$$V = \frac{s}{\bar{x}}$$

wobei

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

Für die Abschätzung ohne temperaturspezifische Bewertungsfaktorbildung wurden Beurteilungskriterien über den gesamten Temperaturbereich definiert. Als Grundlage für diese Beurteilung wurde der Variationskoeffizient gewählt:

- Variationskoeffizient komplexer Schermodul G^* : $V \leq 0,10$
- Variationskoeffizient Phasenverschiebungswinkel δ : $V \leq 0,05$

Variationskoeffizienten sind dimensionslos, was eine gute Vergleichbarkeit der Wertequalität ermöglicht. Die hier verwendeten Variationskoeffizienten sind von den 6-fach bestimmten Ergebnisreihen abgeleitet. Daher ist das Sicherheitsniveau bei den 2-fach bestimmten Werten an dem der 6-fach bestimmten Werte kalibriert.

In [DIN EN 14770] ist als Zulässigkeitskriterium für Ergebnisse aus zwei Messungen im Bereich der Überlappungstemperatur bei einem Wechsel der Prüfgeometrie eine maximale Abweichung der komplexen Schermoduln G^* von 15 % und der Phasenverschiebungswinkel δ von 3 ° festgelegt. Nach Abschätzung der 2-fach bestimmten Werte durch die oben beschriebene Konvention mit den Variationskoeffizienten V kann festgestellt werden, dass diese normativen Zulässigkeitskriterien von den als zuverlässig abgeleiteten Werten an keiner Stelle erreicht wird. Die hier gewählte Abschätzung liegt somit auf der sicheren Seite.

Die gewählte Vorgehensweise wurde hier für einfache Kontrollzwecke im ersten Erprobungsstadium des neuen Prüfverfahrens genutzt. Zur Ermittlung von Präzisionsdaten sind zu einem späteren Zeitpunkt Ringversuche durchzuführen.

Es wird für weitere Untersuchungen im Zuge der Weiterentwicklung dieses Prüfverfahrens angemerkt, dass insbesondere im unteren Temperaturbereich bei 30 - 40 °C der

Einfluss des Phasenverschiebungswinkels δ generell sehr niedrig ist, da bei diesen Temperaturen die viskosen Anteile aufgrund der thermoviskosen Eigenschaften von Bitumen bzw. von Asphaltmörtel noch keine maßgebende Wirkung entfalten, was sich in geringen Phasenverschiebungen bemerkbar macht. Vergleichbare Beobachtungen gibt es jedoch auch bei den Bitumenuntersuchungen, bei denen die Werte im Bereich von 30 °C und von 90 °C sowohl bei Untersuchungen an Straßenbaubitumen, als auch bei Untersuchungen an polymermodifizierten Bitumen generell als kritisch anzusehen sind. Zwar kann die absolute Abweichung zweier Messwerte zueinander in der Größenordnung von 10-15 % des gemessenen Wertes liegen, aber in der weiteren Berechnung über die Winkelfunktion $\cos(\delta)$ reduziert sich der Einfluss dieses Fehlers. Konkret würde dies bei der diesbezüglich auffälligsten Variante P2-5 durch Inbezugnahme des Wertes des Phasenverschiebungswinkels über die Winkelfunktionen $\cos(\delta)$ dazu führen, dass die bei 30 °C ermittelte Differenz im Phasenverschiebungswinkel von 4,7 °, Ungenauigkeit ca. 13,1 %, als Abweichung der $\cos(\delta)$ -Werte zueinander sich auf eine Ungenauigkeit von 6,6 % verkleinern würde. In diesem Fall könnten die genannten Abweichungen sogar hingenommen werden, da die vorhandenen Ungenauigkeiten eine Verschiebung der Ergebnisse nicht erwarten lassen.

Die weiteren Betrachtungen erfolgen mit Mittelwerten aus den als zuverlässig identifizierten Werten der einzelnen Varianten. Sofern Messergebnisse als auffällige Werte erkannt wurden, werden diese in der Auswertung gesondert betrachtet.

Die geprüften und ausreißerbereinigten Datensätze sind in Anhang 5 enthalten. Da, wie dort erkennbar, nur einzelne Werte als unzuverlässig einzustufen sind, ist dies ein gutes Indiz für die Eignung der Materialproben sowie für die Zuverlässigkeit des Prüfverfahrens.

3 Untersuchung von Asphaltmörtel

Die Betrachtung der Asphaltmörteleigenschaften innerhalb dieser Arbeit erfolgt an Rezepturen von Asphaltdeckschichten. In der Praxis weisen diese hochwertigen Schichten in der Regel Schichtdicken von 2,0 bis zu 5,0 cm auf. Da insbesondere auf den Straßen des überörtlichen Verkehrs Splittmastixasphaltbeläge verbaut werden und auch bei diesen Belägen in den vergangenen Jahren Schäden aufgetreten sind, wird in dieser Arbeit diese Mischgutart betrachtet und untersucht.

3.1 Auswahl von Rezepturen und Varianten

3.1.1 Allgemeines

Für die Untersuchungsserie standen fünf Asphaltrezepturen von Splittmastixasphalt-Deckschichten zur Verfügung. Die Strecken sind zum Zweck der späteren Vergleichbarkeit mit den Bezeichnungen aus einem bereits abgeschlossenen Forschungsvorhaben (vgl. Abschnitt 3.4) als Strecken 8, 9, 11, 12, 13 bezeichnet. Diese Rezepturen für SMA 8 S wurden in den Jahren 2012 und 2013 in Bayern im Rahmen von Straßenbauprojekten im Bereich von Deckschichten auf hochbelasteten Bundesfernstraßen verwendet. Die Rezepturen sind in Anhang 2 zusammengefasst dargestellt.

Die Material- bzw. Streckenauswahl für die zu untersuchenden Asphaltmörtel erfolgte unter den folgenden Grundlagen und Bedingungen:

- 1) Originalgetreue Mischungen (Sieblinie, Gesteinsart, Füller, Bindemittel)
- 2) Vergleichbare Mischungen (nur SMA 8 S)
- 3) Alle Asphaltkomponenten (einschließlich Fasern), jedoch ohne grobe Gesteinskörnungen
- 4) Große Bandbreite von in der Praxis vorkommenden Komponenten
- 5) Beibehaltung des Massenverhältnisses von feiner Gesteinskörnung : Bitumen (dieses liegt zwischen 3,1:1 und 3,6:1)

Um den Einfluss einzelner Asphaltmörtelkomponenten auf die rheologischen Kenngrößen der Asphaltmörtel zu bestimmen, wurden zusätzlich zu den Originalzusammensetzungen Varianten gebildet. Diese Varianten sind in Abschnitt 3.1.4 zusammengestellt.

Die eingesetzten Baustoffkomponenten werden im Folgenden kurz beschrieben.

3.1.2 Komponente Bitumen

Die Bindemittel stammen mit Ausnahme des Straßenbaubitumens von derselben Lieferstelle. Das in Strecke 8 eingesetzte PmB mit Haftverbesserer beinhaltet als Grundbin-

demittel das PmB 25/55-55 A, das auch bei den anderen Baumaßnahmen eingesetzt wurde. Ergänzend sei noch erwähnt, dass PmB 25/55-55 grundsätzlich durch Modifizierung eines Straßenbaubitumens 50/70, das hierbei als Grundbitumen bezeichnet wird, hergestellt wird. Aufgrund dieser Kenntnis kann in der späteren Betrachtung und Gegenüberstellung der Ergebnisse der Variantenuntersuchung (Abschnitt 3.3.4) auch der Effekt der Bitumenmodifizierung mit Polymeren besser nachvollzogen werden.

3.1.3 Komponente Füller

Zusätzlich zu den in den fünf ausgewählten Streckenrezepturen enthaltenen Füllern wurden in die Untersuchungen weitere Füller mit verschiedenen Mahlfeinheiten und Füller anderer Hersteller einbezogen. Diese Füller sind in Anhang 3 zusammengestellt. Die Wirkung der Komponente Füller erscheint dem Verfasser besonders wichtig, da – wie in vielen Veröffentlichungen belegt – erfahrungsgemäß primär die Form- und Oberflächeneigenschaften des Füllers die Gebrauchseigenschaften von Asphalt beeinflussen. Daher müsste sich ein Austausch des Füllers auch in den rheologischen Kenngrößen der Untersuchungsvarianten äußern. Aufgrund des in Füllern enthaltenen Überkorns werden, wie auch in der Praxis vorkommend, hier Füller mit einer Sieblinie bis 90 µm verwendet. Gleichwohl wird der Einfachheit halber die Bezeichnung „Füller“ beibehalten.

Die Füller wurden im Vorfeld zur Variantenbildung umfangreich untersucht. Die Ergebnisse der Fülleruntersuchung sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst. Dabei wurden für einen ersten Überblick die deutlich unterhalb und deutlich oberhalb des Durchschnittswertes liegenden Werte farblich hervorgehoben. Dabei steht die Farbe Rot für tendenziell mehr versteifend, die Farbe Grün für tendenziell weniger versteifend auf daraus hergestellte Asphaltgemische wirkend. Wenngleich alle Füller für den Asphaltstraßenbau grundsätzlich geeignet sind und deren Parameter in einem für Straßenbau üblichen Bereich liegen, können dennoch signifikante Unterschiede festgestellt werden. Dabei wirken scheinbar die Füller Nr. 2 und 6 tendenziell weniger versteifend und die Füller Nr. 4 und 5 tendenziell mehr versteifend.

Tabelle 3.1: Zusammenstellung der wichtigsten Parameter der verwendeten Füller

Nr.	Arbeits- bezeichnung	Größt- korn	Roh- dichte	Hohlr. Rigden	$\Delta EP_{RuK}^{1)}$	Stabili- Index	Blaine
		[μm]	[g/cm^3]	[%]	[$^{\circ}\text{C}$]	[-]	[cm^2/g]
1	KSM 90 W-A	90	2,741	31,7	11,0	2,0	3.900
2	KSM 90 W-B	90	2,862	28,1	9,5	2,5	4.600
3	KSM 90 W-C	90	2,732	32,6	12,5	2,2	6.300
4	EF W-D	90	2,703	31,1	14,0	1,7	3.600
5	KSM 20 W-B	20	2,907	34,8	14,5	2,1	9.450
6	KSM 63 W-B	63	2,876	28,9	10,0	2,4	4.800
7	DBM W-E	90	2,861	30,4	17,0	1,9	2.100
Durchschnittswert			2,812	31,1	12,6	2,1	4.964

¹⁾ Die Ermittlung des Wertes ΔEP_{RuK} erfolgte in Anlehnung an die Technischen Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TP Gestein 2016) unter Verwendung des Ausgangsbitumen B 160/220

In Anhang 3 liegen weitere Untersuchungsergebnisse an den Füllern vor. Dort sind auch die Sieblinien aus der lasergranulometrischen Partikelanalyse und der Luftstrahlsiebung dargestellt.

3.1.4 Komponente feine Gesteinskörnungen

Als fGK kommen bei den untersuchten Asphaltmörtelgemischen sowohl Festgesteine wie Granit und Diabas, als auch gebrochene Kiese zum Einsatz. Zur besseren Unterscheidung werden die fGK der beiden gebrochenen Kiese als Kies A und Kies B bezeichnet. Da jedoch der Einfluss der fGK auf die Gebrauchseigenschaften von Asphaltmörtel, wie in Abschnitt 1.2.2 erläutert, im Vergleich zum Füller als untergeordnet betrachtet werden kann, wird es als ausreichend angesehen, bei den Einzelanalysen unter Abschnitt 3.3.3.2 lediglich einzelne Varianten mit der fGK Granit und der fGK Diabas gegenüberzustellen. Eine größere Einflussnahme bei der Variation mit der fGK wird über die Zugabemenge erwartet. Dennoch ist die Miteinbeziehung dieser Kornfraktion für die Analyse der rheologischen Kenngrößen des Asphaltmörtelgemisches von elementarem Nutzen, da, wie in Abschnitt 1.2.3 beschrieben, dort einerseits rheologisch wirksame Gummipartikel oder rezyklierte Bestandteile enthalten sein können und andererseits in dieser Mörtelzebene ganz entscheidende Interaktionen stattfinden, die per se

die Asphaltmörteleigenschaften wesentlich beeinflussen können. Die Art der fGK wird in der Praxis hauptsächlich vom regionalen Vorkommen bestimmt.

3.1.5 Variantenbildung und Prüfmatrix

Ausgehend von den fünf Asphaltrezepturen der Strecken 8, 9, 11, 12 und 13 wurden zur Feststellung von Einflüssen einzelner Asphaltmörtelkomponenten auf die rheologischen Kenngrößen der Asphaltmörtel, insgesamt 35 verschiedene Varianten gebildet und mit dem modifizierten Prüfverfahren untersucht. Aus den 35 Varianten resultieren insgesamt 94 Datensätze (2-fach, 3-fach bzw. 6-fach bestimmte Wertereihen) mit je 14 Einzelwerten aus sieben Werten für komplexe Schermoduln G^* und sieben Werten für Phasenverschiebungswinkel δ , die ihrerseits wiederum aus je zehn Einzelmesspunkten bestehen. Damit steht eine aussagekräftige Datenmenge für eine anschließende Analyse und Auswertung zur Verfügung.

Tabelle 3.2: Zusammenstellung der 35 untersuchten Asphaltmörtelvarianten

		Bindemittel	Art fGK	Menge fGK	Anteil Fasern	Art Füller	Mahlfeinheit Füller	Menge Füller	Bezeichnung der Variante
Mischung Asphaltmörtel		PmB 25/55-55 mit Haftverbesserer	KiesA (gebrochen)	125g	0,4%	KSM 90 W-A	90µm	95g	P1-4
					0,3%	KSM 90 W-A	90µm	95g	P1-3
			Diabas	180g	0,4%	KSM 90 W-A	90µm	80g	P5-2
			KiesB (gebrochen)	130g	0,4%	EF W-D	90µm	130g	P6-1
			Granit	140g	0,3%	KSM 90 W-A	90µm	110g	P1-5
					0,4%	KSM 90 W-B	90µm	110g	P4-54
							80g	P4-53	
						KSM 90 W-A	90µm	110g	P1-6, P4-52
				180g	0,4%		80g	P4-51	
							110g	P4-44	
						80g	P4-43		
						110g	P4-42		
		Diabas	140g	0,4%	KSM 90 W-B	90µm	80g	P4-41	
						110g	P4-34		
				0,4%		80g	P4-33		
						110g	P4-32		
			170g	0,4%		80g	P4-31		
						110g	P4-24		
				0,4%		80g	P4-23		
						110g	P4-22		
						80g	P4-21		
						110g	P4-21		
		180g	0,4%	DBM W-E	90µm	80g	P2-5		
				EF W-D	90µm	80g	P2-4		
				KSM 90 W-C	90µm	80g	P2-3		
				KSM 20 W-B KSM 63 W-B KSM 90 W-B	20µm	80g	P3-3		
			63µm		80g	P3-2			
			90µm		110g	P4-14			
			KSM 90 W-A	90µm	80g	P2-2, P3-1, P4-13			
				110g	P4-12				
			0,3%		80g	P1-2, P2-1, P5-1, P4-11			
					80g	P1-1			
		B 50/70	Diabas	180g	0,4%	KSM 20 W-B KSM 63 W-B KSM 90 W-B	20µm	80g	P3-6
							63µm	80g	P3-5
							90µm	80g	P3-4
KSM 90 W-A	90µm						80g	P5-3	

3.2 Verifizierung und Darstellung der Ergebnisse

3.2.1 Verifizierung der Ergebnisse

Die bei der Beurteilung der 2-fach bestimmten Datensätze auffälligen Werte bedürfen einer gesonderten Bewertung hinsichtlich deren Aussagekraft im Rahmen der weiteren Untersuchungen. Die Ergebnisse dieser Bewertung sind in Tabelle 3.3 zusammengefasst.

Tabelle 3.3: Zusammenstellung der Verifizierung der Ergebnisse

Rezepturen		Art der Bestimmung	Gebrauchseigenschaften		
Varianten	zugehörige Strecke		Ermüdungs-resistenz	Verformungs-beständigkeit	Verdicht-barkeit
P1-4		2-fach			
P1-3	Strecke 12	6-fach			
P5-2		2-fach			
P6-1	Strecke 13	6-fach			
P1-5	Strecke 9	6-fach			
P4-54		2-fach			
P4-53		2-fach			
P1-6, P4-52		2-fach			
P4-51		2-fach		eingeschränkte Verwendbarkeit	eingeschränkte Verwendbarkeit
P4-44		2-fach			
P4-43		2-fach			
P4-42		2-fach			
P4-41		2-fach	eingeschränkte Verwendbarkeit		
P4-34		2-fach			
P4-33		2-fach			
P4-32		2-fach			
P4-31		2-fach		eingeschränkte Verwendbarkeit	eingeschränkte Verwendbarkeit
P4-24		2-fach			
P4-23	Strecke 11	6-fach			
P4-22		2-fach			
P4-21		2-fach			
P2-5		2-fach	kritische Werte eliminiert		
P2-4		2-fach			
P2-3		2-fach			
P3-3		2-fach	eingeschränkte Verwendbarkeit		
P3-2		3-fach			
P4-14		2-fach			
P2-2, P3-1, P4-13		2-fach			
P4-12		2-fach			eingeschränkte Verwendbarkeit

P1-2, P2-1, P5-1, P4-11	Strecke 8	6-fach			
P1-1		2-fach			
P3-6		1-fach	Nicht abgesichert	Nicht abgesichert	Nicht abgesichert
P3-5		3-fach			
P3-4		3-fach			
P5-3		2-fach			

Von insgesamt 105 Beurteilungsparametern sind lediglich sieben Beurteilungsparameter eingeschränkt verwendbar. Bei einem Beurteilungsparameter wurden Einzelwerte eliminiert und drei Beurteilungsparameter sind statistisch nicht abgesichert.

Die ermittelten Einschränkungen sind in den Grundlagendaten vermerkt und im Auswertprogramm als Hinweis aufgenommen. In den weiteren Auswertungen werden diese Einschränkungen entsprechend berücksichtigt.

3.2.2 Darstellung der Ergebnisse

Untersuchungen mit dem Dynamischen Scherrheometer liefern sehr große Datenmengen, die in einer Gesamtschau umfangreiche Aussagen zu den rheologischen Eigenschaften einer Probe ermöglichen. Über viele Temperaturen und Laststufen können mit dem DSR bei unterschiedlichen Frequenzen und Deformationen Datensätze generiert werden. Bei vorliegenden Untersuchungen werden bei vorgegebener Frequenz und Deformation Datenreihen vom komplexen Schermodul G^* und vom Phasenverschiebungswinkel δ über sieben Temperaturstufen generiert. Entscheidend für die weitere Auswertung der Daten ist, dass diese einer geeigneten und aussagekräftigen Darstellungsweise zugeführt werden. Hierbei wird auf Erfahrungen aus den Bitumenuntersuchungen (Abschnitt 2.2) zurückgegriffen. Dort werden in zwei separaten Diagrammen komplexer Schermodul G^* und Phasenverschiebungswinkel δ als Isochronen, als Graphen gleicher Schwingungsdauer über dem geprüften Temperaturbereich abgebildet. Als eine weitere Art einer aussagekräftigen Darstellung werden Black-Diagramme verwendet, bei denen der komplexe Schermodul G^* über dem Phasenverschiebungswinkel δ abgebildet wird.

Bei der Beurteilung der Gebrauchseigenschaften ist neben der Kenntnis der Steifigkeit des Probekörpers, abgebildet mit dem komplexen Schermodul G^* , zugleich auch die Kenntnis dessen viskoelastischen Verhaltens, abgebildet mit dem Phasenverschiebungswinkel δ , notwendig. Über mathematische Beziehungen (Abschnitt 2.1.4) lassen sich die rheologischen Kenngrößen komplexer Schermodul G^* und Phasenverschiebungswinkel δ in Beziehung setzen. So entstehen die in Hinblick auf die Gebrauchsei-

genschaften von Asphaltmörtel aussagekräftigeren Bewertungsgrößen Verlustmodul G'' und Speichermodul G' (Abschnitt 3.3.1). Die Darstellung dieser beiden Größen erfolgt in jeweils einem eigenen Diagramm. Für die bessere Lesbarkeit werden für die Beurteilung der Gebrauchseigenschaften des Asphaltmörtels (Abschnitte 3.3.2 und 3.3.3) jeweils Ausschnitte aus den beurteilungsrelevanten Temperaturbereichen gewählt. In einem EXCEL-Auswerteprogramm – im Rahmen dieser Arbeit wurde ein solches angelegt – können neben den hier abgebildeten Diagrammen beliebig viele einzelne Varianten ausgewählt und verglichen werden. Das EXCEL-Auswerteprogramm kann vom Autor zur Verfügung gestellt werden.

Beispielhaft sind in Abschnitt 3.3.2 auch die Isochronen des komplexen Schermoduls G^* und des Phasenverschiebungswinkels δ der Asphaltmörtelprobekörper der Strecken 8, 9, 11, 12 und 13 dargestellt.

Das EXCEL-Auswerteprogramm beinhaltet noch eine weitere Art der Darstellung, die es ermöglicht, Verlustmodul G'' und Speichermodul G' unabhängig von der Prüftemperatur abzubilden. In dem aus der Literatur bekannten Cole-Cole-Diagramm kann der Verlustmodul G'' über dem Speichermodul G' abgebildet werden. Ein erster Ansatz, der noch eines Bewertungshintergrundes und einer entsprechenden Normierung bedarf, ist im EXCEL-Auswerteprogramm als so genannter Performance-Indikator enthalten.

3.3 Bewertung und Interpretation der Ergebnisse

3.3.1 Bewertungsmethodik

Erste Ansätze zur Interpretation der Ergebnisse aus rheologischen Untersuchungen sind in den Berichten zum Strategic Highway Research Programm (SHRP) und bei [Litzka 2001] zu finden. Dort wird als Indikator für das Ermüdungsverhalten der Verlustmodul G'' vorgeschlagen und für das Verformungsverhalten der Quotient aus dem komplexen Schermodul G^* und $\sin(\delta)$. Aufgrund der relativ geringen Änderung der Werte des $\sin(\delta)$ mit Anstieg des Phasenverschiebungswinkels δ bei mittleren und hohen Prüftemperaturen, bei denen der Phasenverschiebungswinkel stoffbedingt den Hochpunkt bei 90° annähert und daher die Sinuskurve abflacht, vermag dieses Kriterium die Materialeigenschaften nur unzureichend zu differenzieren. [Goos 1999] schlägt daher vor, stattdessen den im zu bewertenden Temperaturbereich wesentlich deutlicher differenzierenden $\cos(\delta)$ einzubinden und damit die Beurteilung des Verformungsverhaltens auf Grundlage des Speichermoduls G' vorzunehmen. In einer Vorstudie im Zuge dieser Arbeit konnte dieser Sachverhalt nachvollzogen werden, weshalb im Weiteren die beiden Größen Verlustmodul G'' und Speichermodul G' als Beurteilungs- und Bewertungsgröße zugrunde gelegt werden. Bei der Beurteilung für die Asphaltmörtel eigen-

schaften werden die in Tabelle 3.4 beschriebenen rheologischen Größen verwendet. Als Vergleichsgröße zur Lagebestimmung der ermittelten Ergebnisse wird der Mittelwert aller untersuchten Asphaltmörtel (getrennt für PmB und Straßenbaubitumen) herangezogen.

Die in Abschnitt 2.1.4 beschriebenen Größen Speichermodul G' und Verlustmodul G'' geben Auskunft zu den elastischen und zu den viskosen Anteilen im komplexen Schermodul G^* . Daraus können nun Aussagen zu den Asphaltmörteleigenschaften abgeleitet werden. Tabelle 3.4 zeigt, wie diese beiden Moduln als Beurteilungsgrößen für die Gebrauchseigenschaften verwendet werden.







Die folgenden Zusammenhänge sind elementar für die Beurteilung der rheologischen Kenngrößen der untersuchten Asphaltmörtel in Bezug auf dessen Gebrauchseigenschaften:

- Ein **niedriger Verlustmodul G''** wird durch eine geringe Steifigkeit, also einen niedrigen komplexen Schermodul G^* (verformbar) bei zugleich niedrigem Phasenverschiebungswinkel δ (elastisch) erreicht.
- Ein **hoher Speichermodul G'** wird durch eine hohe Steifigkeit, also einen hohen komplexen Schermodul G^* (steif) bei zugleich niedrigem Phasenverschiebungswinkel δ (elastisch) erreicht.
- Ein **niedriger Speichermodul G'** wird durch eine geringe Steifigkeit, also einen niedrigen komplexen Schermodul G^* (verformbar) bei zugleich hohem Phasenverschiebungswinkel δ (viskos) erreicht.

Die Gebrauchseigenschaften von Asphalt bzw. von Asphaltmörtel werden in verschiedenen Phasen der Nutzung benötigt. Sie unterliegen daher auch unterschiedlichen, deren jeweiligem Einsatzbereich entsprechenden Rahmenbedingungen. So wird bei Beurteilung der Ermüdungsresistenz mit dem Temperaturbereich zwischen 30 °C und 40 °C der durchschnittliche Temperaturbereich einer Fahrbahnoberfläche angenähert. Für die Verformungsbeständigkeit wird mit Auswertung der Messergebnisse im Bereich zwischen 50 °C und 60 °C der Temperaturbereich der Fahrbahnoberfläche im Sommer, der jahreszeitlichen Phase mit der höchsten Spurbildungsgefahr, simuliert. Da Einbau und Verdichtung von Asphaltbelägen bei Temperaturen von 90 °C und höher erfolgen, wird für die Bewertung der Gebrauchseigenschaft Verdichtbarkeit näherungsweise der Temperaturbereich zwischen 80 °C und 90 °C angesetzt.

In der folgenden Tabelle 3.4 sind die Gebrauchseigenschaften mit den relevanten Temperaturbereichen dargestellt. Dabei sind auch die Beurteilungsgrößen Verlustmodul G'' und Speichermodul G' sowie deren beeinflussende, gemessene rheologische Kenngrößen komplexer Schermodul G^* und Phasenverschiebungswinkel δ abgebildet.

Tabelle 3.4: Zusammenstellung der gewählten Bedingungen bei der Beurteilung der Asphaltmörteleigenschaften (unterstrichene Werte sind die maßgebenden Werte)

Gebrauchseigenschaft	Temperaturbereich	Beurteilungsgrößen	Komplexer Schermodul G^*	Phasenverschiebung δ
Ermüdungsresistenz	<u>30 °C</u> – 40 °C	Verlustmodul G'' niedrig	verformbar  G^* niedrig	elastisch  δ niedrig
Verformungsbeständigkeit	50 °C – <u>60 °C</u>	Speichermodul G' hoch	steif  G^* hoch	elastisch  δ niedrig
Verdichtbarkeit	80 °C – <u>90 °C</u>	Speichermodul G' niedrig	verformbar  G^* niedrig	viskos  δ hoch

Bei jeder Gebrauchseigenschaft des Asphaltmörtels ist im Sinne einer möglichst dauerhaften Asphalttschicht für eine Optimierung ein möglichst hoher Wert anzustreben. Um dies zu erreichen, sind die in Tabelle 3.4 dargestellten Zielniveaus des komplexen Schermoduls G^* und des Phasenverschiebungswinkels δ , symbolisiert mit einfachen Pfeilen, anzustreben.

Innerhalb der Temperaturbereiche werden für die eindeutige Beurteilung maßgebende Werte definiert, die für die Ermüdungsresistenz und die Verformungsbeständigkeit an der unteren Grenze und für die Verdichtbarkeit an der oberen Grenze des jeweiligen Temperaturbereiches liegen.

Da insbesondere bei Asphaltmörtelmischungen, die mit Wachsen oder anderen Zusätzen zur Viskositätsveränderung versehen sind, deren spezifische Wirkung auf die rheologischen Kenngrößen zumindest in einem Temperaturbereich von 90 °C bis 120 °C zu erwarten sind, sollte bei Weiterentwicklung dieses Verfahrens auch in diesem Tempera-

turbereich geprüft werden. Die Gerätesteifigkeit, die Leistungsfähigkeit sowie die Zuverlässigkeit des bei den Untersuchungen verwendeten Prüfgerätes (Abschnitt 2.3.2) waren zu Beginn der Untersuchungen hinreichend bekannt.

3.3.2 Bewertung der Streckenrezepturen

In den folgenden zwei Diagrammen sind die Ergebnisse der Asphaltmörteluntersuchung mit dem DSR aus den Asphaltrezepturen der Strecken 8, 9, 11, 12 und 13 abgebildet. Die Zuordnung der Variantenbezeichnungen zu den Strecken kann Tabelle 3.3 entnommen werden.

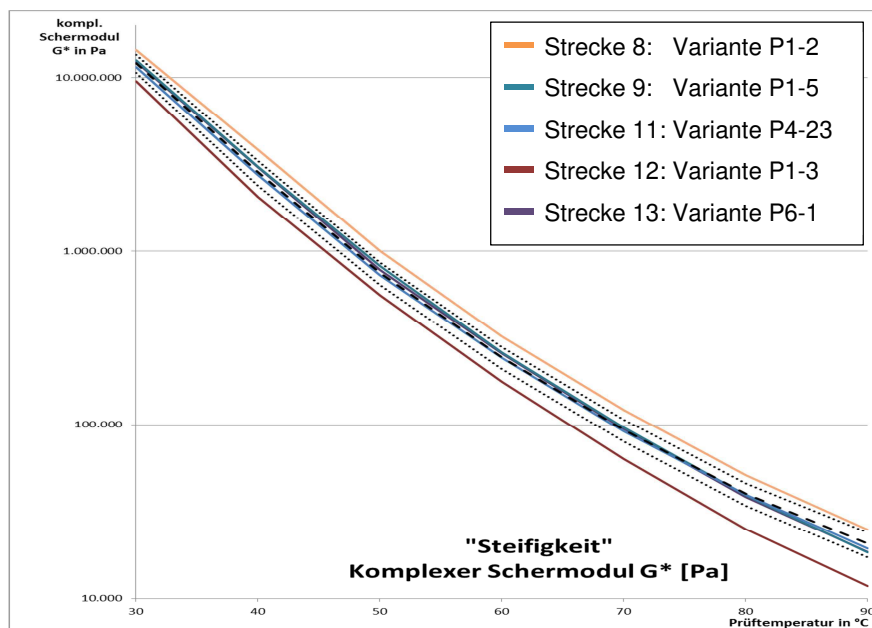


Abbildung 3.1a: Darstellung der komplexen Schermoduln G^* der Asphaltmörtel der Strecken 8, 9, 11, 12 und 13 über der Prüftemperatur als Isochronen.

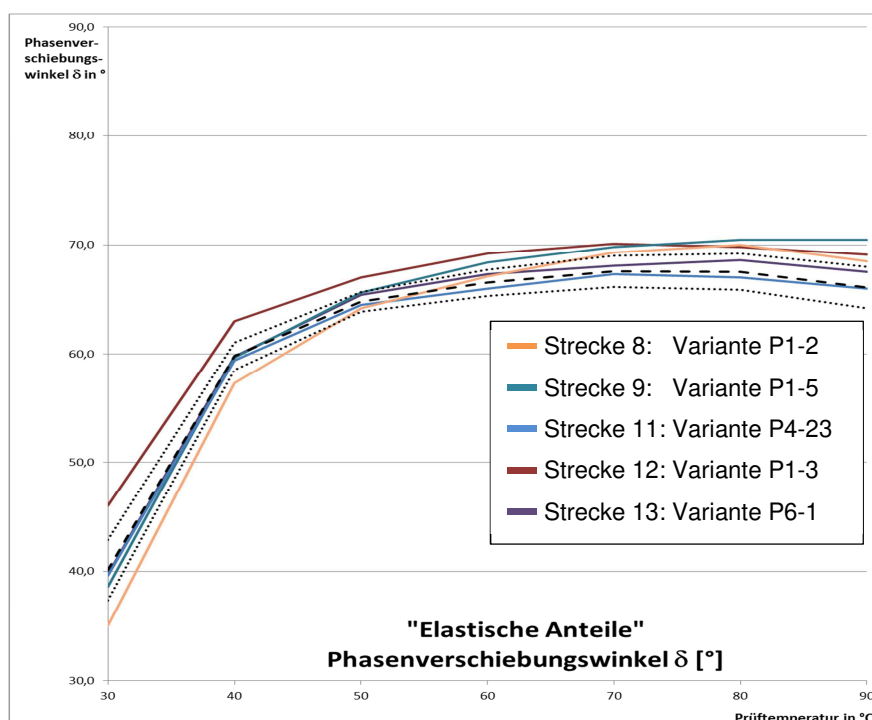


Abbildung 3.1b: Darstellung der Phasenverschiebungswinkel δ der Asphaltmörtel der Strecken 8, 9, 11, 12 und 13 über der Prüftemperatur als Isochronen.

Es fällt auf, dass die Graphen in den Abbildungen 3.1a und 3.1b über den gesamten Temperaturbereich relativ kompakt liegen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Mörtelrezepturen realen Asphaltmischungen entstammen, die auf umfangreichen Erfahrungen der Hersteller beruhen und offenbar auch hinsichtlich guter Gebrauchseigenschaften konzipiert wurden. Gleichwohl fällt auf, dass sich Strecke 8 und Strecke 12 in Bezug auf die Steifigkeit signifikant unterscheiden. Bei Betrachtung der elastischen Anteile über den Phasenverschiebungswinkel δ der einzelnen Asphaltmörtel fällt auf, dass im unteren Temperaturbereich die Rezeptur von Strecke 12 mit eingesetztem Haftverbesserer mehr viskose Anteile zeigt, wohingegen Strecke 8 in diesem Bereich tendenziell mehr elastische Anteile vorweist. Die Strecken 9, 11 und 13 zeigen im unteren Temperaturbereich der Prüfung durchschnittliches Verhalten. Bei ansteigender Prüftemperatur entwickeln alle Streckenvarianten mit Ausnahme der Strecke 11 ein tendenziell viskoserer Verhalten der Asphaltmörtel. Strecke 8, 9 und 12 nehmen dabei einen deutlich überdurchschnittlichen Phasenverschiebungswinkel ein.

Zur Bewertung der Gebrauchseigenschaften der untersuchten Asphaltmörtelvarianten werden nun aus den Ergebnisdaten der DSR-Untersuchung, aus dem komplexen Schermodul G^* und dem Phasenverschiebungswinkel δ , wie in Abschnitt 2.1.4 beschrieben, die rheologischen Größen Verlustmodul G'' und Speichermodul G' entwickelt. Anhand dieser Größen können dann über die im Rahmen der Variantenuntersuchung definierte Bewertungsmatrix in Tabelle 3.5 die Gebrauchseigenschaften Ermüdungsresistenz, Verformungsbeständigkeit und Verdichtbarkeit bewertet werden. Letztendlich können so aus diesen rheologischen Kenngrößen der Asphaltmörtel der Strecken 8, 9, 11, 12 und 13 wichtige Einschätzungen zu den daraus hergestellten Asphaltmischungen abgeleitet werden. Für die vergleichende Beurteilung der rheologischen Kenngrößen hat sich die Darstellung in drei spezifischen Graphen (s. Abbildung 3.2a, 3.2b, 3.2c) der einzelnen Gebrauchseigenschaften, im jeweils einschlägigen Temperaturbereich (30 °C - 40 °C, 50 °C - 60 °C und 80 °C - 90 °C), bewährt.

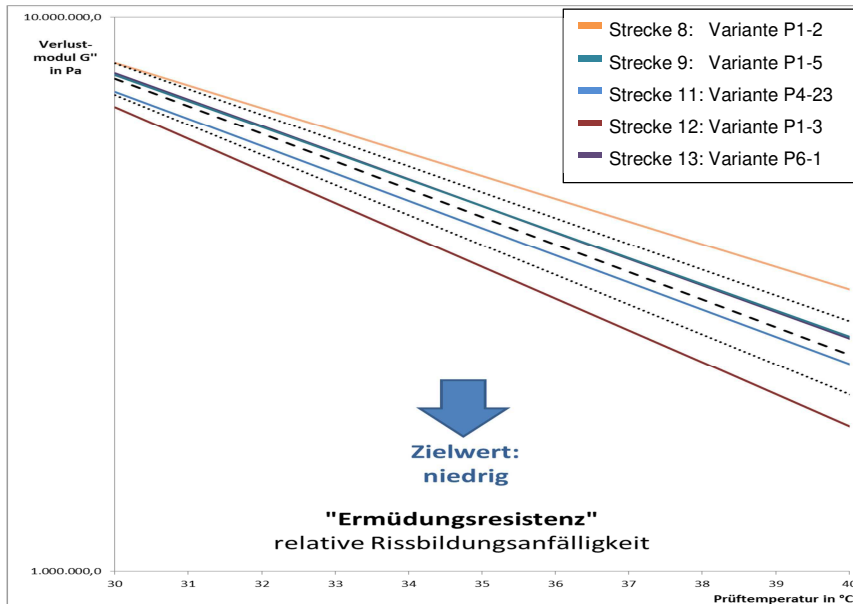


Abbildung 3.2a: Darstellung des Verlustmoduls G'' der Asphaltmörtel der Strecken 8, 9, 11, 12 und 13 im Bereich der für die Ermüdungsresistenz relevanten Temperatur von 30 °C - 40 °C.

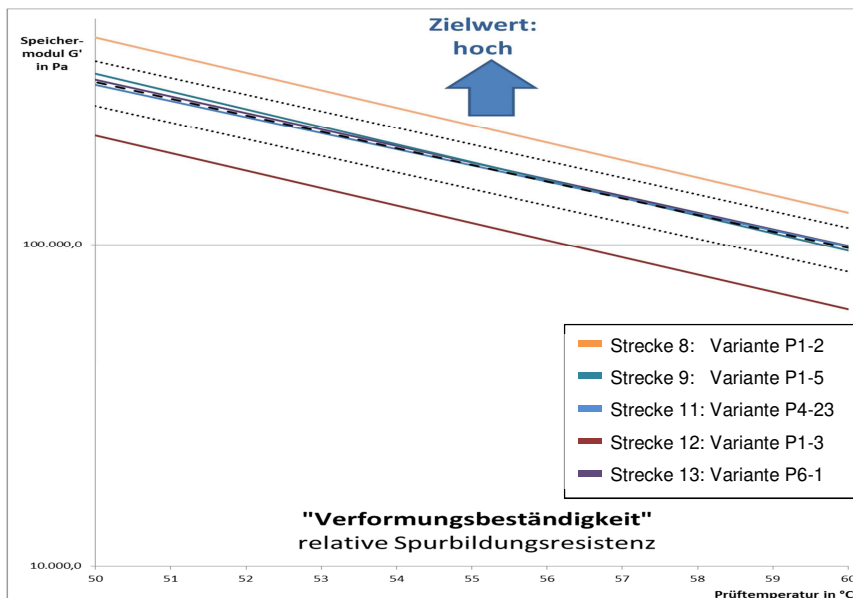


Abbildung 3.2b: Darstellung des Speichermoduls G' der Asphaltmörtel der Strecken 8, 9, 11, 12 und 13 im Bereich der für die Verformungsbeständigkeit relevanten Temperatur von 50 °C - 60 °C.

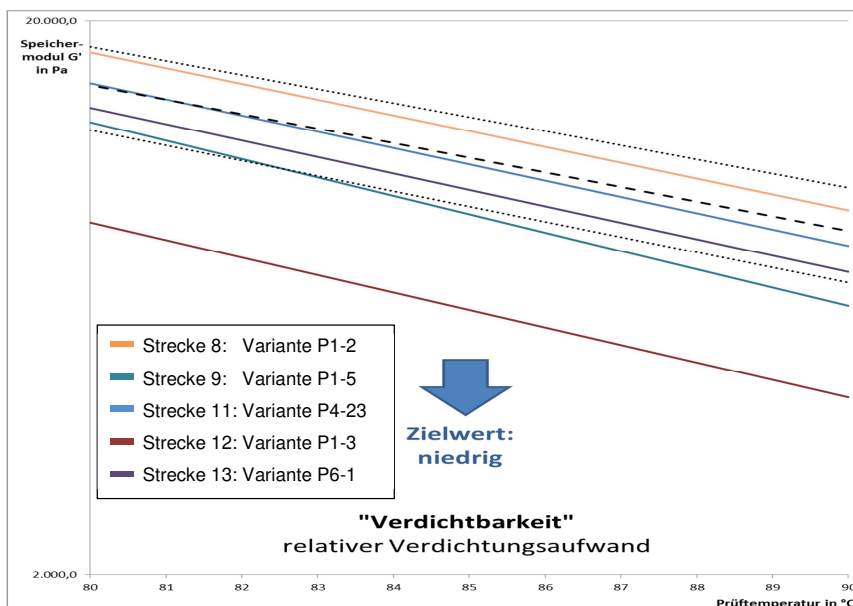


Abbildung 3.2c: Darstellung des Speichermoduls G' der Asphaltmörtel der Strecken 8, 9, 11, 12 und 13 im Bereich der für die Verdichtbarkeit relevanten Temperatur von 80 °C - 90 °C.

Die Darstellung der drei Gebrauchseigenschaften bestätigt bei den ausgewählten Asphaltmörteln der Strecken 8, 9, 11, 12 und 13 die Konkurrenzsituation, in der die Eigenschaften zueinander stehen. Betrachtet man nun erneut die Strecken 8 und 12 näher, so ist festzustellen, dass hier die Asphaltmörtelrezeptur offenbar auf eine bzw. zwei der Gebrauchseigenschaften hin optimiert wurde. Die Strecken 9, 11 und 13 sind scheinbar relativ identisch konzipiert worden, wobei dabei, verglichen mit dem Durchschnittswert aller mit PmB 25/55-55 hergestellten Varianten, insbesondere eine gute Verdichtbarkeit zu erwarten ist. Eine besonders gute Verdichtbarkeit bei zugleich besonders guter Ermüdungsresistenz lässt Strecke 12 (Variante P1-3 mit PmB 25/55-55 + Haftverbesserer) erwarten, bei der jedoch die Gefahr einer Spurbildung in Folge einer relativ geringen Verformungsbeständigkeit im Temperaturbereich zwischen 50 °C und 60 °C besteht. Die Verformungsbeständigkeit erscheint bei Strecke 8, zumindest die Rezeptur der Erstprüfung betreffend, sehr ausgeprägt.

Ausgelöst durch Erfahrungen aus der Baupraxis wird hier auf die immer wieder zu beobachtenden Abweichungen zwischen Theorie und Praxis hingewiesen, die sich auch bei diesem Forschungsprojekt zeigt. Im Rahmen der Untersuchungen der einzelnen Baustoffkomponenten der Strecke 8 machte sich bemerkbar, dass die Bitumeneigenschaften zu einem PmB 25/55-55 mit Haftverbesserer passen, und nicht zu dem in der Erstprüfung genannten Bitumen PmB 25/55-55. Aus praktischen Erwägungen heraus ist dieser Wechsel des Bitumens in der Praxis nachvollziehbar, aber wie die weiteren Untersuchungen noch zeigen werden, nicht ganz unerheblich. Daher ist beispielsweise ein späterer direkter Vergleich der Asphaltmörtelanalyse der Strecke 8 mit Bohrkernen oder mit an der Mischanlage entnommenem Mischgut fehlerbehaftet. Alternativ könnte bzw. müsste dafür richtigerweise eine entsprechend andere Mörtelvariante (P5-2 anstatt P1-2, vgl. Abschnitt 3.3.3.1) herangezogen werden.

Es ist bei Betrachtung dieser Asphaltmörtelauswahl, welche per se, da reale Asphaltrezepturen zugrunde liegen, keine großen Spreizungen der Ergebnisse erwarten lassen, durchaus festzustellen, dass das Verfahren die untersuchten Asphaltmörtel differenziert und die Gebrauchseigenschaften zumindest tendenziell ableiten lässt. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse sollen nun im Weiteren diese „Grundrezepturen“ durch Austausch einzelner Komponenten oder deren Anteile zielgerichtet verändert werden.

3.3.3 Bewertung der Varianten

Die Untersuchungen von Asphaltmörtel mit dem DSR lassen Aussagen zu den Wirkungen einzelner Komponenten im Asphaltmörtel zu, da auch das bekannte aber bislang nicht abschließend erforschte, gleichwohl signifikante, gegenseitige Beeinflussen der Komponenten abgebildet werden kann. Dies wird in Form der folgenden Variantenuntersuchung aufgezeigt.

Die **Varianten**, bezeichnet mit den Kürzeln P1-1 bis P6-1, und die daraus generierte Prüfmatrix ist unter Abschnitt 3.1.5 dargestellt. Bei sehr komplexen Systemen kann nur durch die Betrachtung, Gegenüberstellung und einfache systematische Wertung einzelner **Variationen** (Austausch einzelner Komponenten und Anteile) der Grad eventueller Einflüsse herausgestellt werden. Es wird versucht, die Einflüsse möglichst aller als relevant betrachteten **Variationsebenen**, die im Rahmen dieser Arbeit als



definiert sind, anzusprechen und dabei auch das Vorherrschen von systematischen Zusammenhängen zu analysieren. Zu diesem Zweck ist es Ziel dieser Variantenuntersuchung, durch geeignete Kombinationen eine möglichst repräsentative und aussagekräftige Variantenanzahl, die mit überschaubarem Aufwand beprobt und ausgewertet werden können, zu erhalten. Anhand dieser Varianten soll anschließend eine Bewertung von Einflüssen einzelner Varianten innerhalb der Variationsebenen erfolgen.

Aufgrund fehlender Bewertungshintergründe für Aussagen zu den Gebrauchseigenschaften von Asphaltmörteln im Rahmen rheologischer Untersuchungen erfolgt hilfsweise die Bildung des Mittelwertes aus den Ergebnissen aller Varianten innerhalb einer Bindemittelart (B bzw. PmB), der dann als relative Beurteilungsmöglichkeit für die Einzelvarianten herangezogen wird. Somit findet für die Ermittlung der Einflussnahme einzelner Variationen eine relative Beurteilung statt, die in fünf Stufen vorgenommen wird. Als Orientierungswert wird neben dem Mittelwert die Standardabweichung gewählt und damit die Bewertung nach Tabelle 3.5 in fünf Stufen vorgenommen.

Tabelle 3.5: Definition der Stufen einer möglichen Einflussnahme von Variationen auf die verschiedenen Asphaltmörtelproben (Bewertungsmatrix)

Definition:	Bewertung:
über Durchschnitt, außerhalb Standardabweichung	++ sehr positiv
über Durchschnitt, innerhalb Standardabweichung	+ positiv
am Durchschnitt	o mäßig
unter Durchschnitt, innerhalb Standardabweichung	- negativ
unter Durchschnitt, außerhalb Standardabweichung	-- sehr negativ

Da diese Variantenuntersuchung insbesondere durch Vergleichen verschiedener Varianten bzw. deren Variationen durch Abschätzung ein Gespür für die Einflussnahme einzelner Variationen erzeugt, wurde zur einfachen und schnellen Wahrnehmbarkeit in den

Bewertungstabellen eine plakative Darstellung von Tendenzen bei Änderung einzelner Komponenten und Mengen in drei Stufen und zwei Qualitäten gewählt:

- 3 Stufen:
1. Stufe keine signifikante Einflussnahme, kein Symbol,
 2. Stufe moderate Einflussnahme, Symbol: schmaler Pfeil ↓,
 3. Stufe deutliche Einflussnahme, Symbol: breiter Pfeil ⇩ und
- 2 Qualitäten: begünstigender Einfluss auf die Gebrauchseigenschaft, Pfeilfarbe **Grün**,
verschlechternder Einfluss auf die Gebrauchseigenschaft, Pfeilfarbe **Rot**.

Der Einfluss einer Variablen der einzelnen Varianten, hier als „Spur“ bezeichnet, die quasi die einzelnen Varianten graduell variiert und durch eine Variationsebene leitet, wird dadurch deutlich, dass sich Änderungen der Bewertungskriterien von Variante zu Variante innerhalb einer Variation nachweisen lassen. Jede Variation ist in einer eigenen Tabelle mit vergleichbaren Varianten, im folgenden Vergleichsfeld genannt, dargestellt.

Die Variantenuntersuchung soll Auskunft geben, ob innerhalb eines Vergleichsfeldes eine signifikante Einflussnahme durch Variation auf die dortigen Varianten vorherrscht. Dies gibt dann Auskunft über die Einflussnahme oder auf eine theoretische Möglichkeit einer Einflussnahme auf einzelne Gebrauchseigenschaften von Asphaltmörtel.

Anmerkung zur Lesbarkeit der folgenden Diagramme:

Aus Gründen der Übersichtlichkeit und Vergleichbarkeit der Kenngrößen kann die Beschriftung von Abszisse und Ordinate nur in kleiner Schriftgröße dargestellt werden. Beispielhaft wird in Abbildung 3.3 die Beschriftung der Diagramme der folgenden Seiten in gut lesbarer Größe vorangestellt.

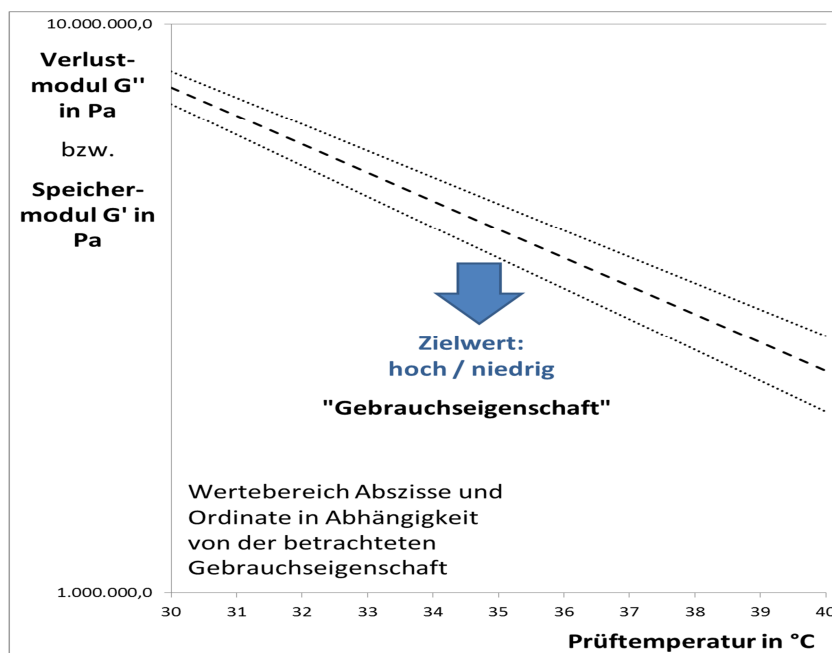


Abbildung 3.3:
Beschriftung der
Diagramme in
Abschnitt 3.3.3
(exemplarisch)

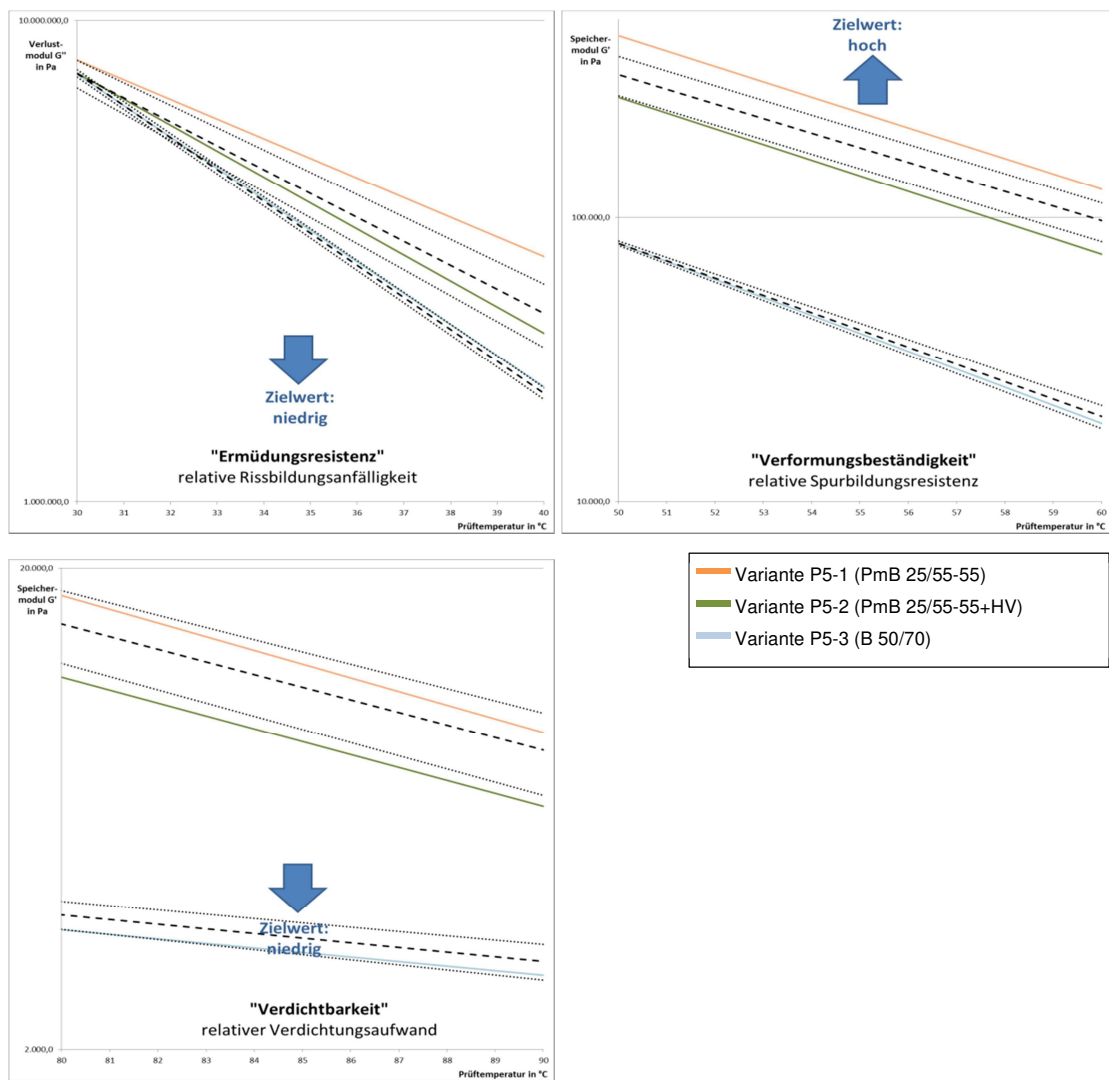
3.3.3.1 Einzelbewertung und Interpretation Einfluss Bindemittel



Mit Ausnahme des in der Variation vorgenommenen Wechsels des Bindemittels bleiben zur eindeutigen Identifikation des Einflusses auf die gemessenen Eigenschaften alle weiteren Bedingungen der gegenübergestellten Varianten identisch. Die Varianten folgen den in den dazugehörigen Bewertungstabellen beschriebenen Spuren.

Aus dem nachfolgenden Diagramm der Gegenüberstellung der Varianten mit den dazugehörigen Bewertungstabellen zur Variation „Bindemittel“ erfolgt die anschließende Interpretation:

- Die Änderung des Bindemittels nimmt signifikant Einfluss auf das Ermüdungs-, Verformungs- und Verdichtungsverhalten.
- Scheinbar reduziert der haftungsverbessernde Zusatz im Bindemittel die Steifigkeit, wohingegen die viskosen Anteile im Asphaltmörtel im unteren Temperaturbereich erhöht und im oberen Temperaturbereich tendenziell reduziert werden. Ermüdungsresistenz und Verdichtbarkeit werden dadurch positiv beeinflusst.
- In Bezug auf die Ermüdungsresistenz spielt der Einsatz von Polymeren im vorliegenden Fall eine eher untergeordnete Rolle. Bei dieser Gebrauchseigenschaft scheinen die rheologischen Kenngrößen des Grundbitumens (hier: B 50/70) neben dem Zusatz des Haftverbesserers die maßgebende Rolle zu spielen.



Variation: Bindemittel		Einfluss auf		
Variante ¹⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
P5-1	PmB 25/55-55	-	++	-
P5-2	PmB 25/55-55+HV	+	--	++

Variation: Bindemittel		Einfluss auf		
Variante ¹⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
P5-1	PmB 25/55-55	-	++	-
P5-3	B 50/70	+	--	++

¹⁾ bei allen Varianten erfolgt die Bewertung anhand des Durchschnittswerts aus PmB 25/55-55 Asphaltmörteln

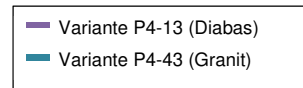
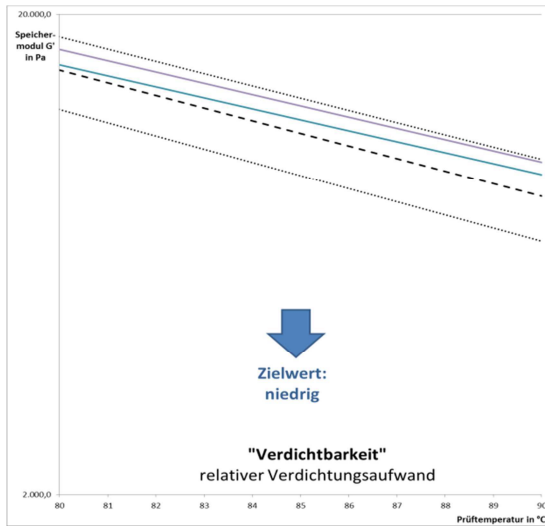
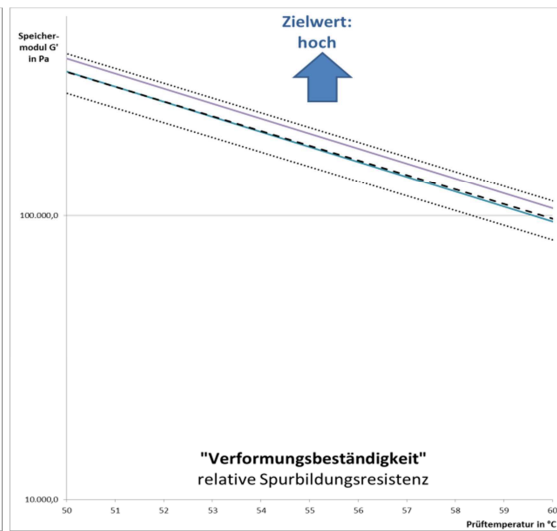
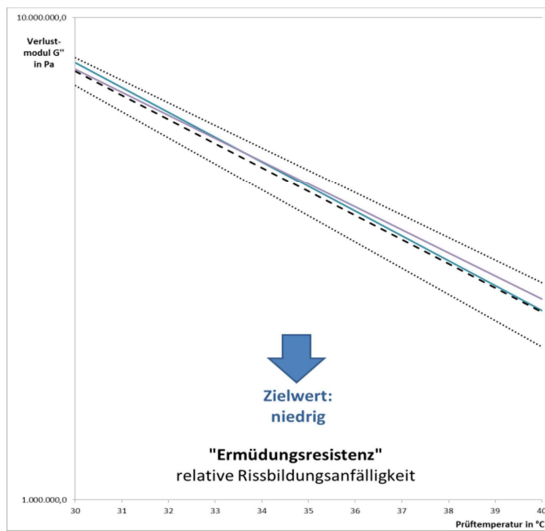
3.3.3.2 Einzelbewertung und Interpretation Einfluss Art fGK



Mit Ausnahme des in der Variation vorgenommenen Wechsels der Art der feinen Gesteinskörnungen bleiben zur eindeutigen Identifikation des Einflusses auf die gemessenen Eigenschaften alle weiteren Bedingungen der gegenübergestellten Varianten identisch. Die Varianten folgen der in der dazugehörigen Bewertungstabelle beschriebenen Spur.

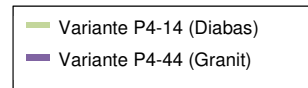
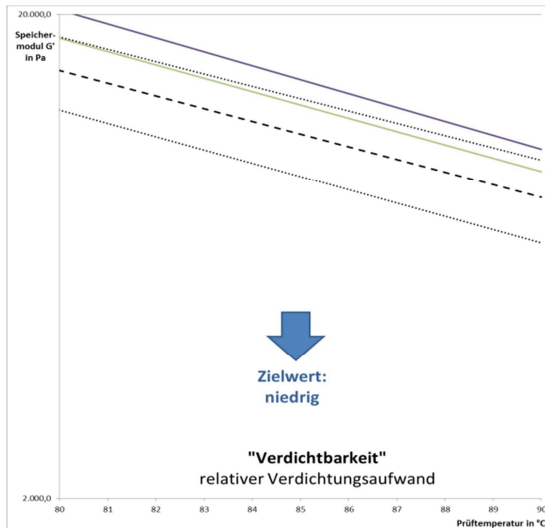
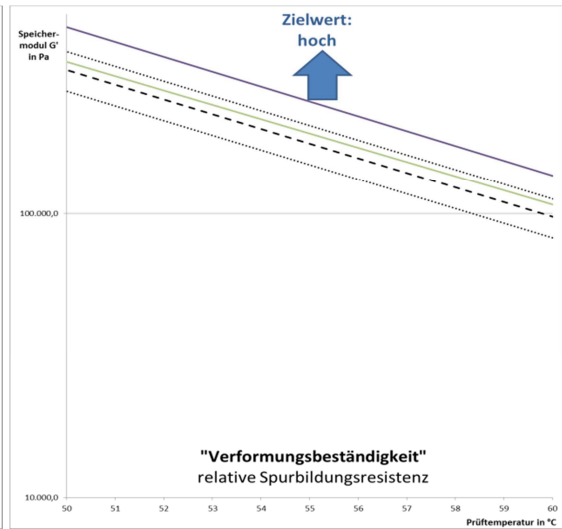
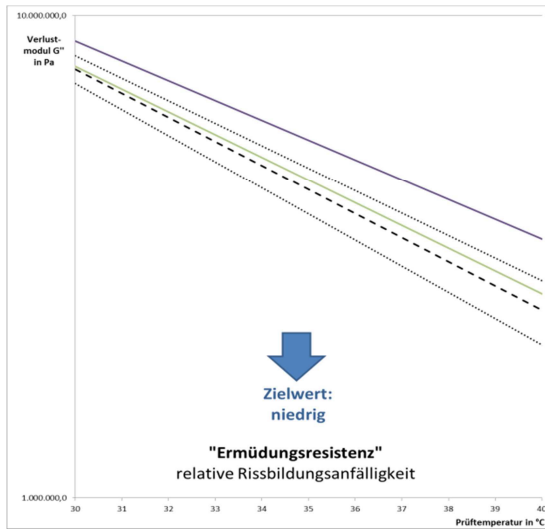
Aus den nachfolgenden Diagrammen einzelner Gegenüberstellungen vergleichbarer Varianten mit der jeweils dazugehörigen Bewertungstabelle zur Variation „Art der feinen Gesteinskörnungen“ erfolgt die anschließende Interpretation:

- Die Änderung der Art fGK nimmt nur vereinzelt Einfluss auf Verformungs- und Ermüdungsverhalten. Insgesamt liefern die Ergebnisse ein indifferentes Bild. Dies bestätigt die Annahme in Abschnitt 3.1.4.
- Der Einfluss der Art fGK wird offensichtlich vom Einfluss der Menge der Füllers und/oder vom Einfluss der Menge der fGK überlagert.



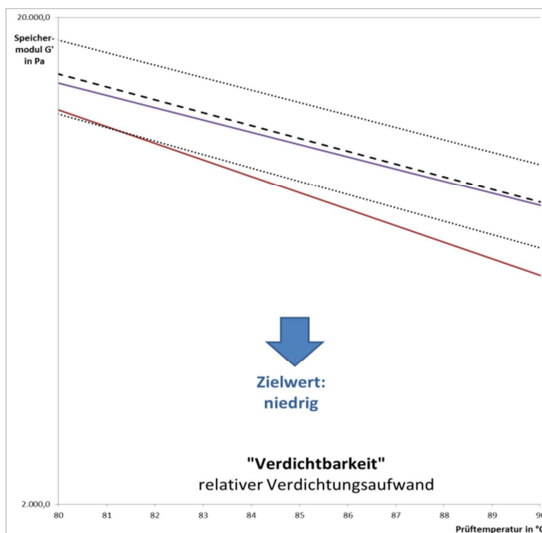
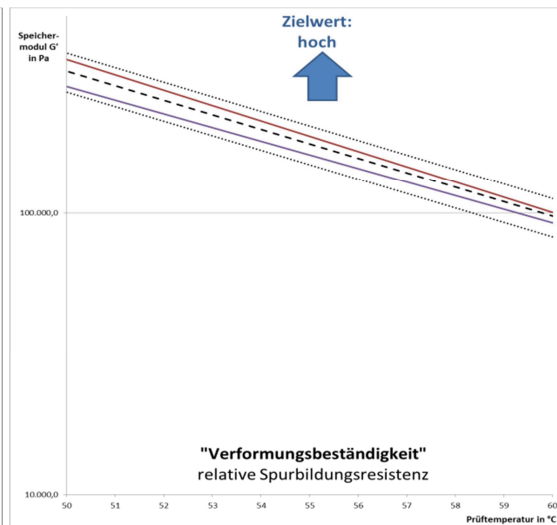
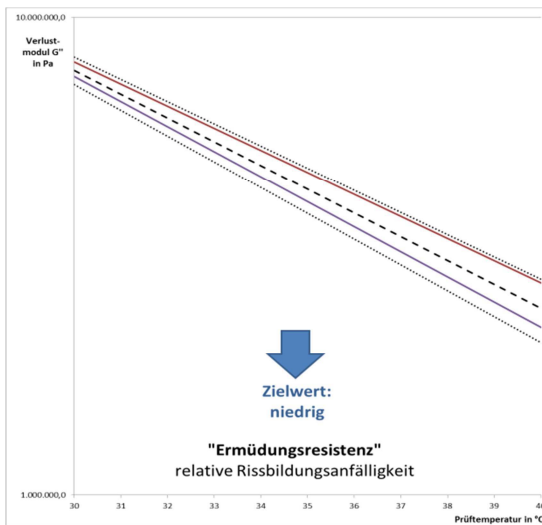
Variation: Art fGK		Einfluss auf		
Variante ¹⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
P4-13	Diabas	-	+ ↓	- ↓
P4-43	Granit	-	o ↓	- ↓

¹⁾ Varianten mit 180 g fGK, 80 g KSM 90 W-B



Variation: Art fGK		Einfluss auf		
Variante ²⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
P4-14	Diabas	-	+	-
P4-44	Granit	--	++	--

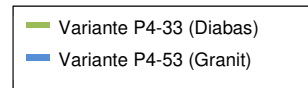
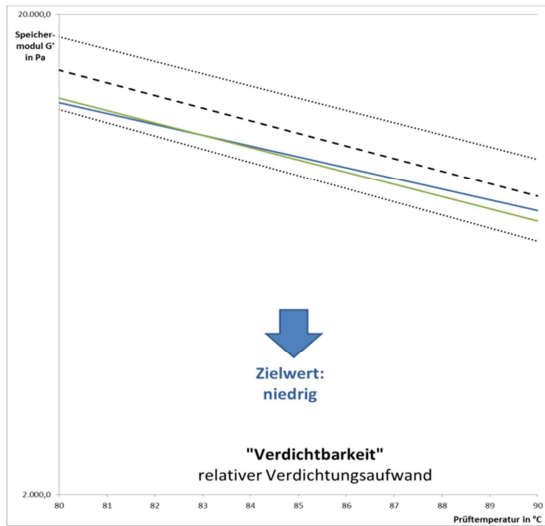
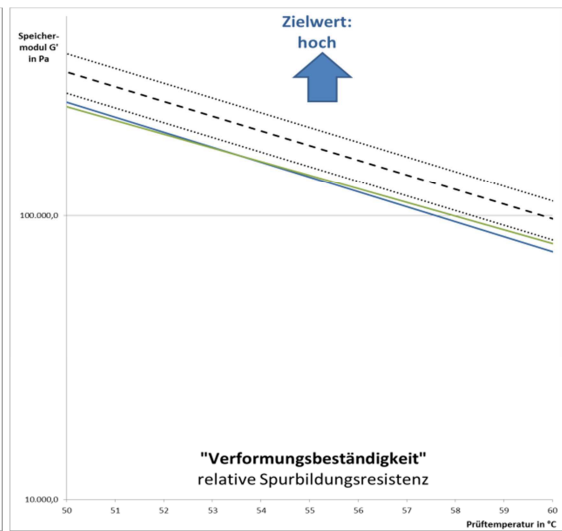
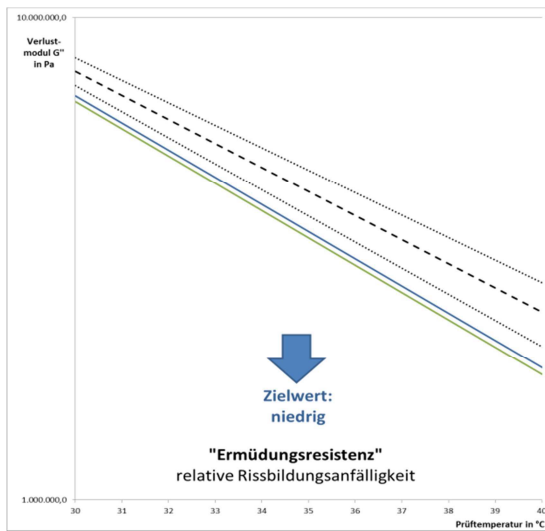
²⁾ Varianten mit 180 g fGK, 110 g KSM 90 W-B



— Variante P4-32 (Diabas)
— Variante P4-52 (Granit)

Variation: Art fGK		Einfluss auf		
Variante ³⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
P4-32	Diabas	+ 	- 	+
P4-52	Granit	- 	+ 	++

³⁾ Varianten mit 140 g fGK, 110 g KSM 90 W-A



Variation: Art fGK		Einfluss auf		
Variante ⁴⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
P4-33	Diabas	++	--	+
P4-53	Granit	++	--	+

⁴⁾ Varianten mit 140 g fGK, 80 g KSM 90 W-B

Die folgenden Variantenvergleiche geben ein ähnliches Bild wieder, weshalb sie nicht separat graphisch dargestellt werden. Die Größe des Einflusses in den Vergleichsfeldern P4-12, P4-42 und P4-31, P4-51 ist nur sehr schwach ausgeprägt.

Variation: Art fGK		Einfluss auf		
Variante ⁵⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
P4-11	Diabas	--	++	-
<i>P4-41</i>	<i>Granit</i>	- ⁶⁾	+	-

⁵⁾ Varianten mit 180 g fGK, 80 g KSM 90 W-A

⁶⁾ Aufgrund der Überschreitung der gewählten Grenze des Variationskoeffizienten ergeben sich Einschränkungen bei der Beurteilung der Ermüdungsresistenz

Variation: Art fGK		Einfluss auf		
Variante ⁷⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
<i>P4-12</i>	<i>Diabas</i>	-	+	- ⁸⁾
P4-42	Granit	-	+	-

⁷⁾ Varianten mit 180 g fGK, 110 g KSM 90 W-A

⁸⁾ Aufgrund der Überschreitung der gewählten Grenze des Variationskoeffizienten ergeben sich Einschränkungen bei der Beurteilung der Verdichtbarkeit

Variation: Art fGK		Einfluss auf		
Variante ⁹⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
<i>P4-31</i>	<i>Diabas</i>	+	- ¹⁰⁾	o ¹⁰⁾
<i>P4-51</i>	<i>Granit</i>	+	o ¹⁰⁾	o ¹⁰⁾

⁹⁾ Varianten mit 140 g fGK, 80 g KSM 90 W-A

¹⁰⁾ Aufgrund der Überschreitung der gewählten Grenze des Variationskoeffizienten ergeben sich Einschränkungen bei der Beurteilung von Verformungsbeständigkeit und Verdichtbarkeit

Variation: Art fGK		Einfluss auf		
Variante ¹¹⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
P4-34	Diabas	+	o	-
P4-54	Granit	+	-	+

¹¹⁾ Varianten mit 140 g fGK, 110 g KSM 90 W-B

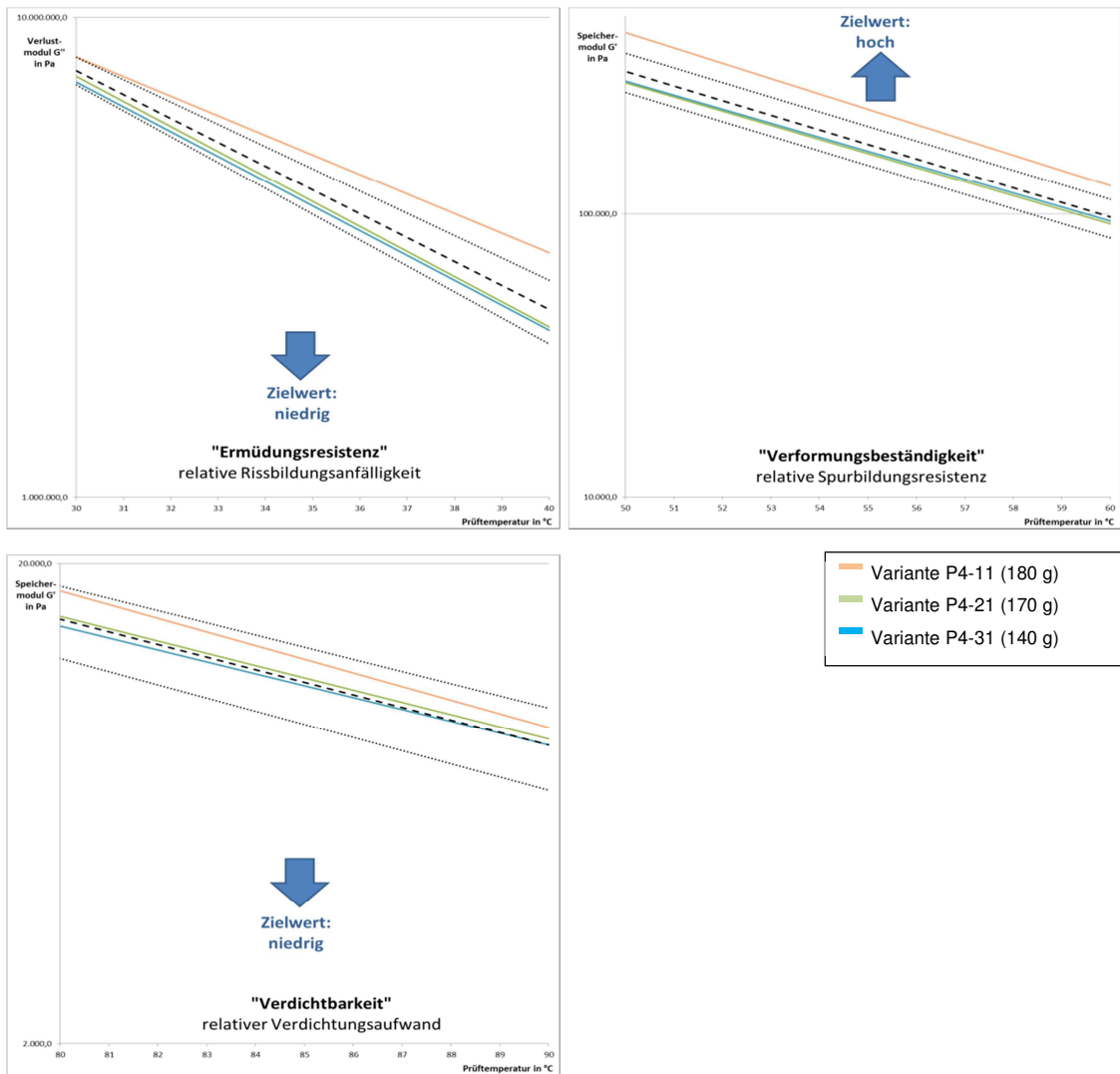
3.3.3.3 Einzelbewertung und Interpretation Einfluss Menge fGK



Mit Ausnahme des in der Variation vorgenommenen Wechsels der Menge der fGK bleiben zur eindeutigen Identifikation des Einflusses auf die gemessenen Eigenschaften alle weiteren Bedingungen der gegenübergestellten Varianten identisch. Die Varianten folgen der in der dazugehörigen Bewertungstabelle beschriebenen Spur.

Aus den nachfolgenden Diagrammen einzelner Gegenüberstellungen vergleichbarer Varianten mit der jeweils dazugehörigen Bewertungstabelle zur Variation „Menge fGK“ erfolgt die anschließende Interpretation:

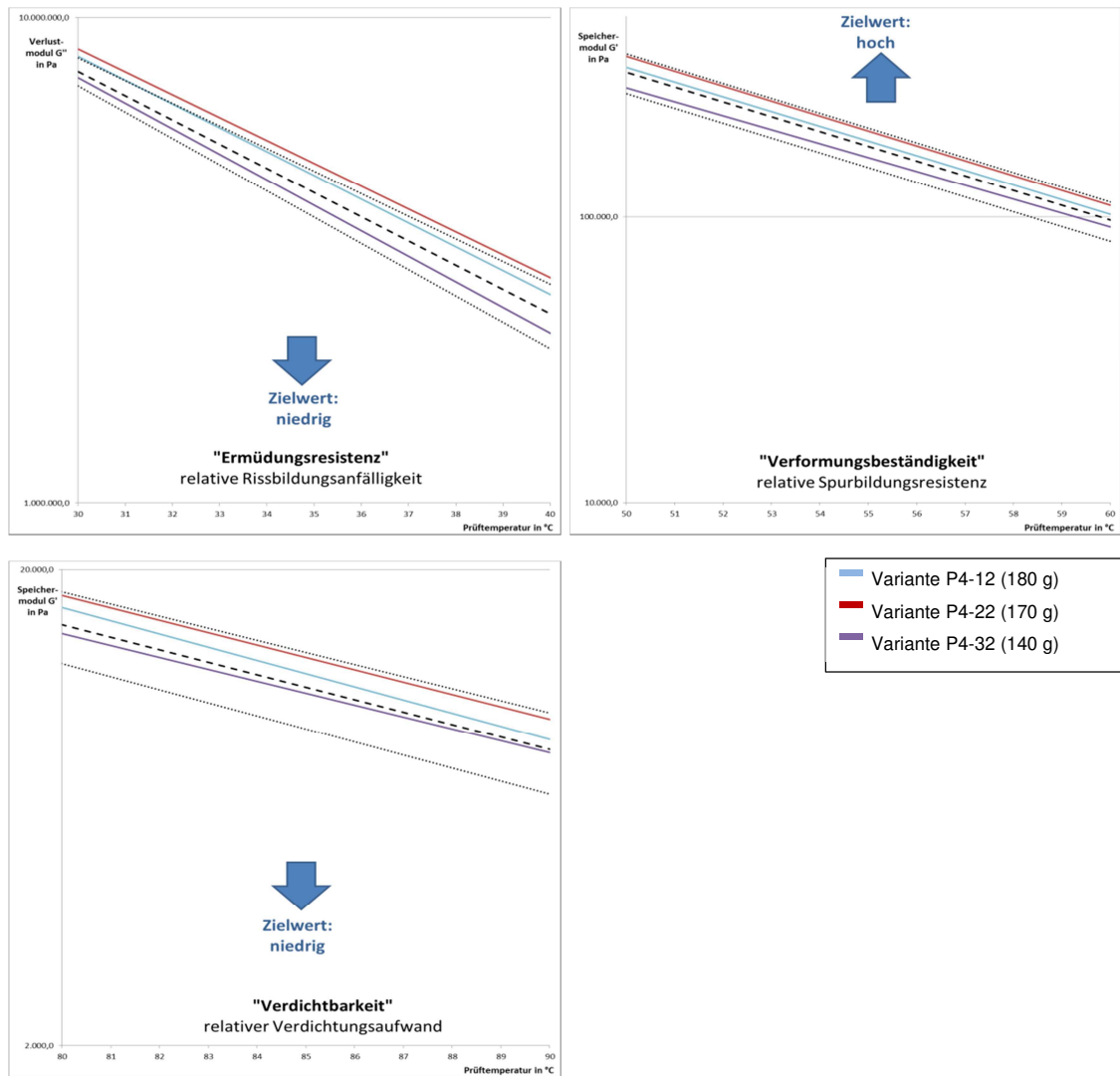
- Die Änderung der Menge fGK nimmt signifikant Einfluss auf die Gebrauchseigenschaften von Asphaltmörtel.
- Eine geringere Menge fGK wirkt sich primär positiv auf die Verdichtbarkeit aus
- Die gegenseitige Konkurrenzsituation der einzelnen Gebrauchseigenschaften stellt sich deutlich ausgeprägt dar.
- Teilweise wirkt sich diese Variation jedoch mit gegensätzlichem Einfluss auf die Gebrauchseigenschaften aus. Offensichtlich wird das System ab einer spezifischen Menge fGK resistent gegenüber weiteren Änderungen. Dies kann sich hinsichtlich möglicher beabsichtigter Optimierungsmaßnahmen ungünstig und als schwer prognostizierbar darstellen. Scheinbar wird eine Sensitivitätsgrenze bzw. eine Art „Mastixgrenze“ bei den Varianten mit 180 g fGK mit 110 g Füller erreicht, bei der die Fließfähigkeit der Asphaltmörtelprobe nicht mehr gegeben und eine aussagekräftige Prüfung mittels rheologischem Verfahren nicht mehr möglich ist.



Variation: Menge fGK		Einfluss auf		
Variante ¹⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
P4-11	180 g	--	++	-
P4-21	170 g	+	-	o
P4-31	140 g	+	- ²⁾	o ²⁾

¹⁾ Varianten mit Diabas, 80 g KSM 90 W-A

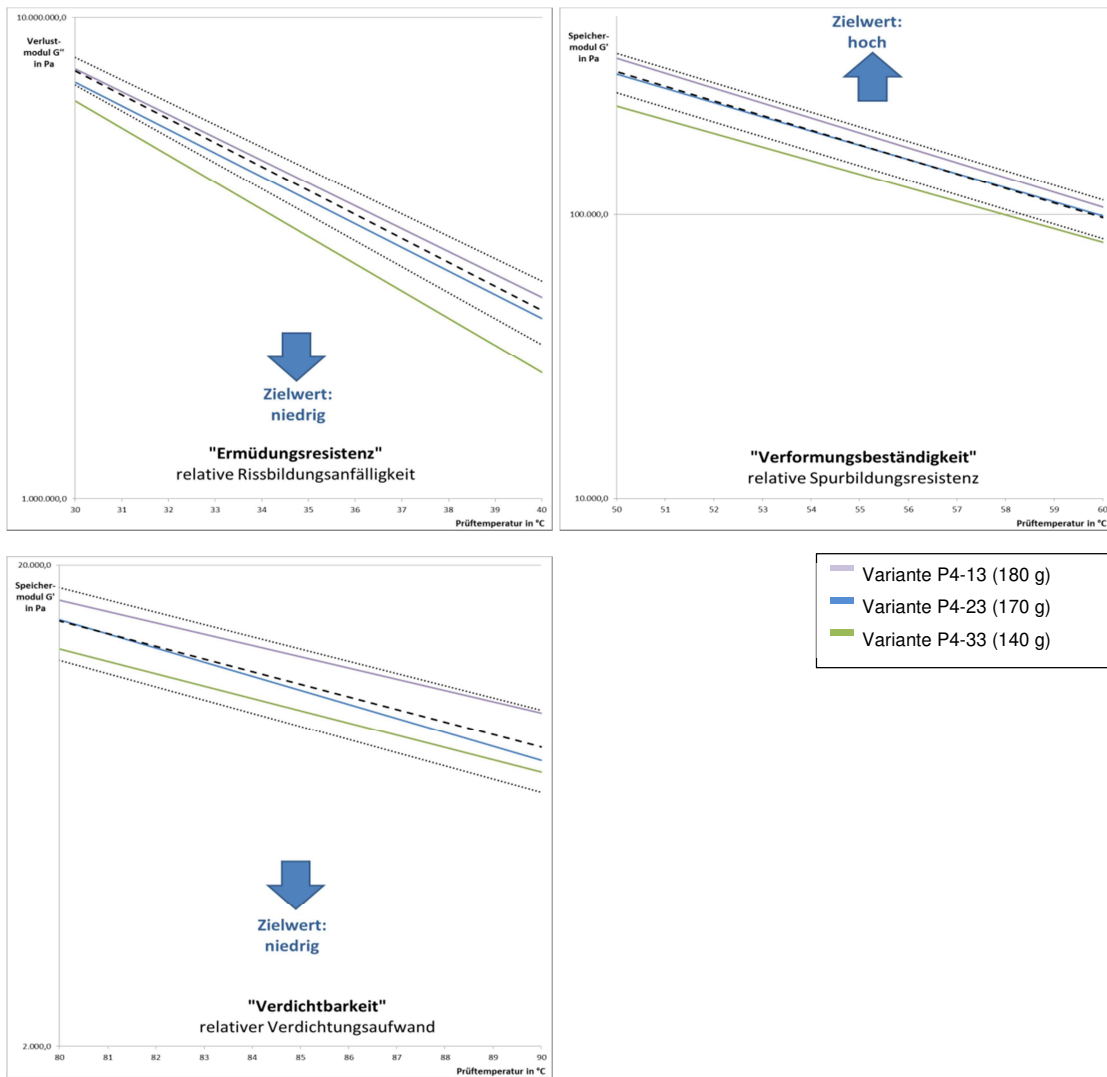
²⁾ Aufgrund der Überschreitung der gewählten Grenze des Variationskoeffizienten ergeben sich Einschränkungen bei der Beurteilung von Verformungsbeständigkeit und Verdichtbarkeit



Variation: Menge fGK		Einfluss auf		
Variante ³⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
P4-12	180 g	-	+ ⁴⁾	- ⁴⁾
P4-22	170 g	--	+	-
P4-32	140 g	+	-	+

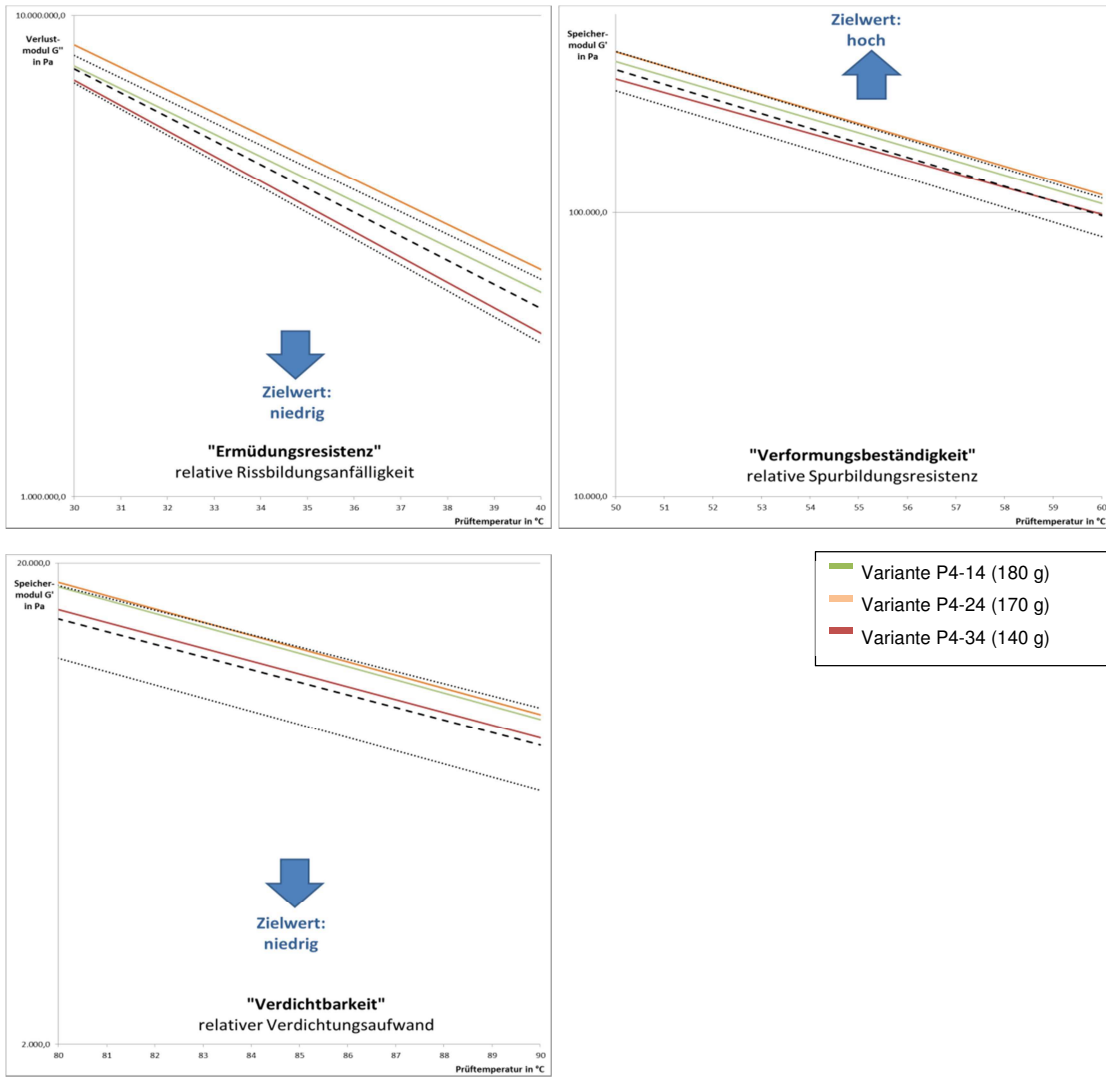
³⁾ Varianten mit Diabas, 110 g KSM 90 W-A

⁴⁾ Aufgrund der Überschreitung der gewählten Grenze des Variationskoeffizienten ergeben sich Einschränkungen bei der Beurteilung der Verformungsbeständigkeit und Verdichtbarkeit



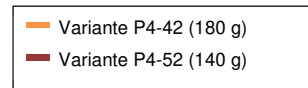
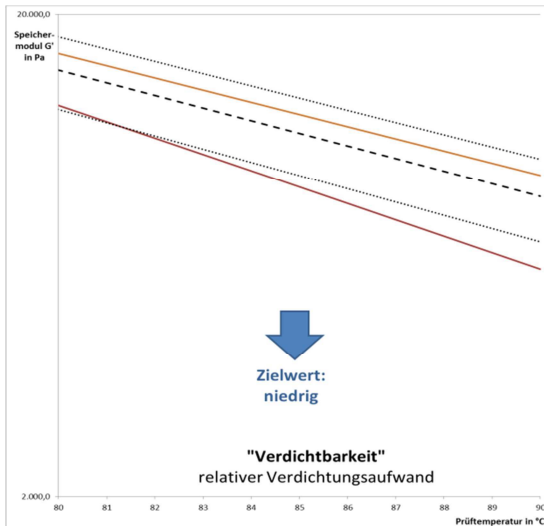
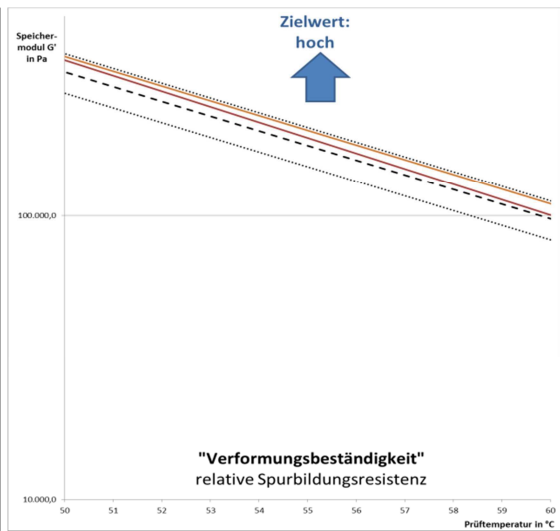
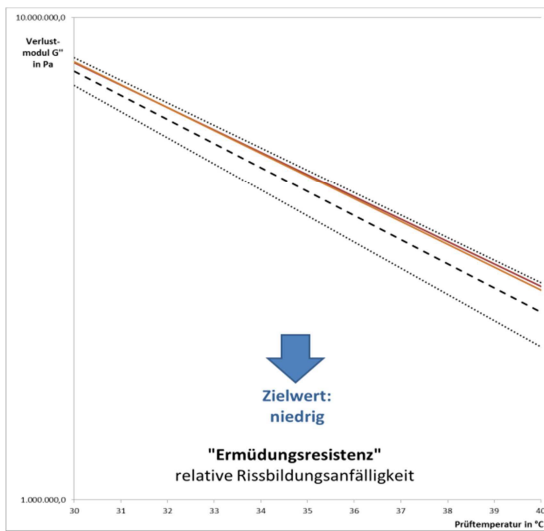
Variation: Menge fGK		Einfluss auf		
Variante ⁵⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
P4-13	180 g	-	+	-
P4-23	170 g	+	0	+
P4-33	140 g	++	--	+

⁵⁾ Varianten mit Diabas, 80 g KSM 90 W-B



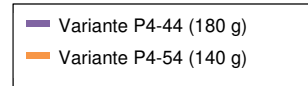
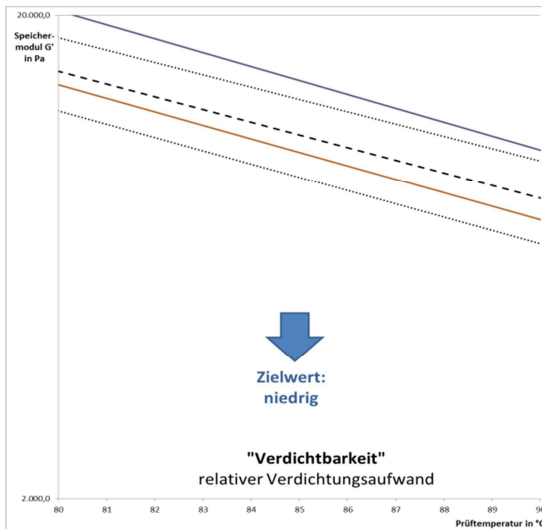
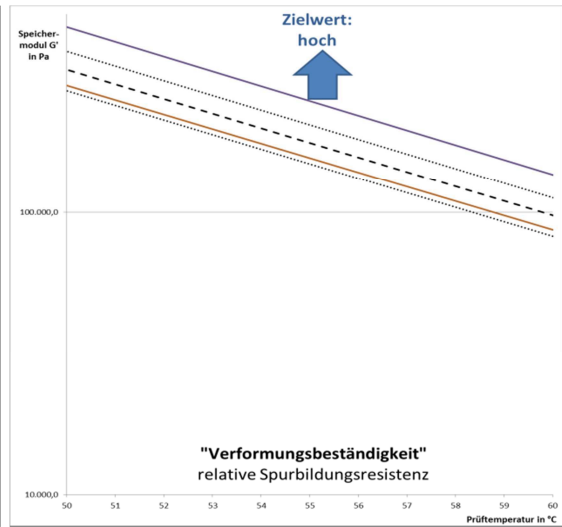
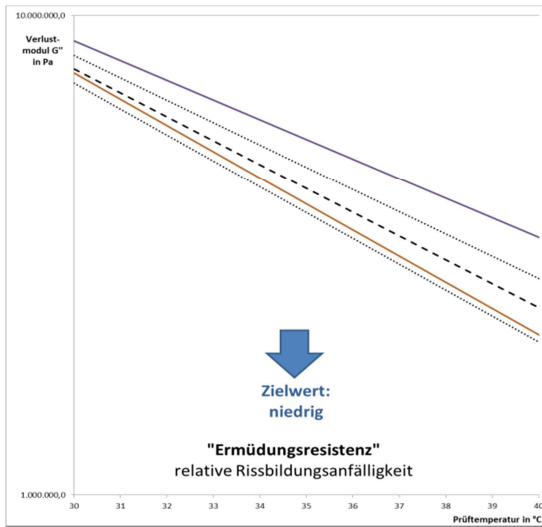
Variation: Menge fGK		Einfluss auf		
Variante ⁶⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
P4-14	180 g	-	+	-
P4-24	170 g	--	+	-
P4-34	140 g	+	o	-

⁶⁾ Varianten mit Diabas, 110 g KSM 90 W-B



Variation: Menge fGK		Einfluss auf		
Variante ⁷⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
P4-42	180 g	-	+	-
P4-52	140 g	-	+	++

⁷⁾ Varianten mit Granit, 110 g KSM 90 W-A



Variation: Menge fGK		Einfluss auf		
Variante ⁸⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
P4-44	180 g	-- ↓	++ ↓	-- ↓
P4-54	140 g	+ ↓	- ↓	+ ↓

⁸⁾ Varianten mit Granit, 110 g KSM 90 W-B

Die folgenden Variantenvergleiche zeigen ein ähnliches Bild, weshalb sie nicht graphisch dargestellt werden. Die Größe des Einflusses ist im Vergleichsfeld P4-41, P4-51 jedoch schwächer ausgeprägt.

Variation: Menge fGK		Einfluss auf		
Variante ⁹⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
P4-41	180 g	- ¹⁰⁾	+	-
P4-51	140 g	+	+ ¹¹⁾	- ¹¹⁾

⁹⁾ Varianten mit Granit, 80 g KSM 90 W-A

¹⁰⁾ Aufgrund der Überschreitung der gewählten Grenze des Variationskoeffizienten ergeben sich Einschränkungen bei der Beurteilung der Ermüdungsresistenz

¹¹⁾ Aufgrund der Überschreitung der gewählten Grenze des Variationskoeffizienten ergeben sich Einschränkungen bei der Beurteilung von Verformungsbeständigkeit und Verdichtbarkeit

Variation: Menge fGK		Einfluss auf		
Variante ¹²⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
P4-43	180 g	-	o	-
P4-53	140 g	++	--	+

¹²⁾ Varianten mit Granit, 80 g KSM 90 W-B

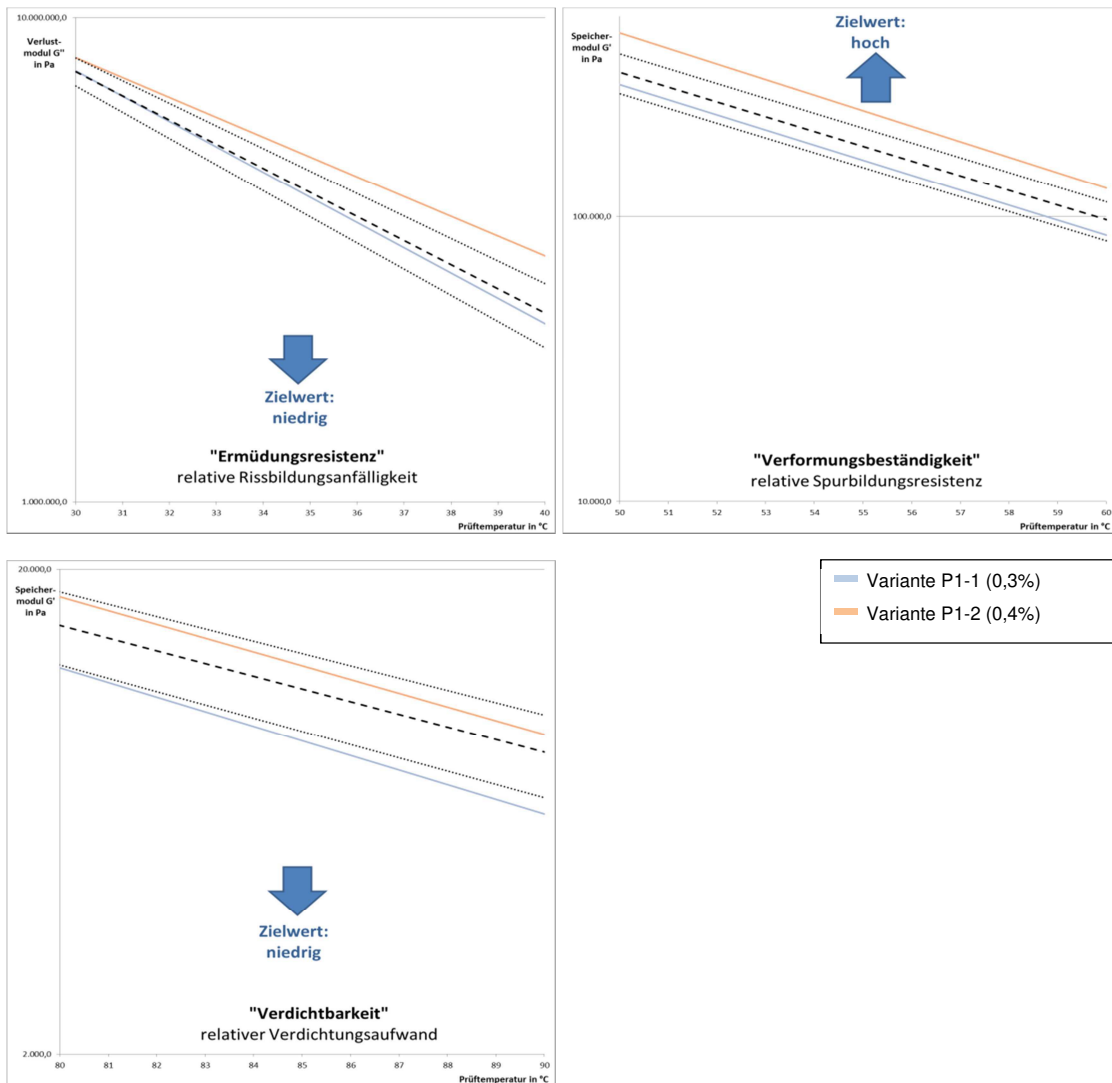
3.3.3.4 Einzelbewertung und Interpretation Einfluss Anteil Fasern



Mit Ausnahme des in der Variation vorgenommenen Wechsels des Anteils der Fasern bleiben zur eindeutigen Identifikation des Einflusses auf die gemessenen Eigenschaften alle weiteren Bedingungen der gegenübergestellten Varianten identisch. Die Varianten folgen der in der dazugehörigen Bewertungstabelle beschriebenen Spur.

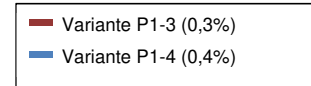
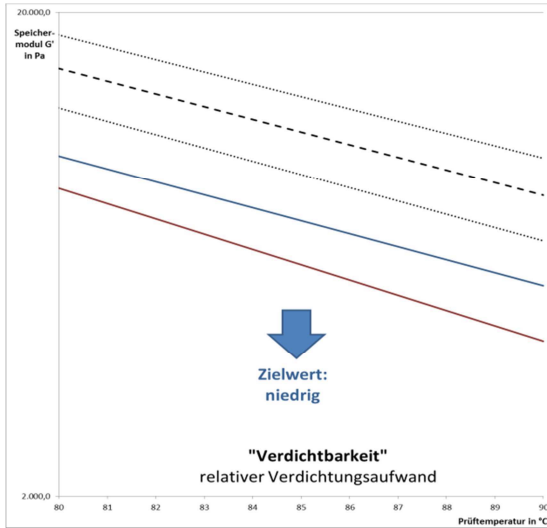
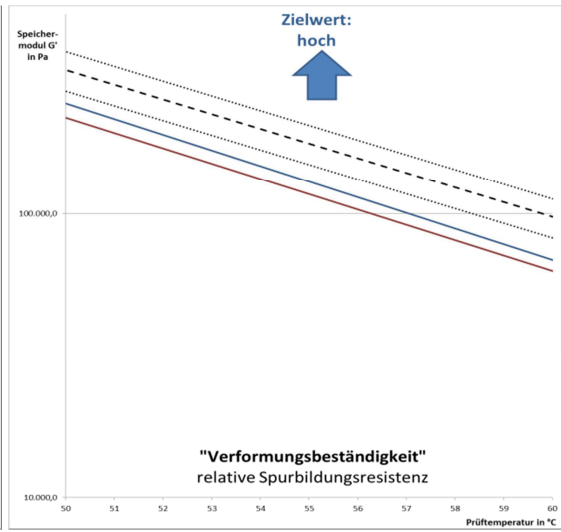
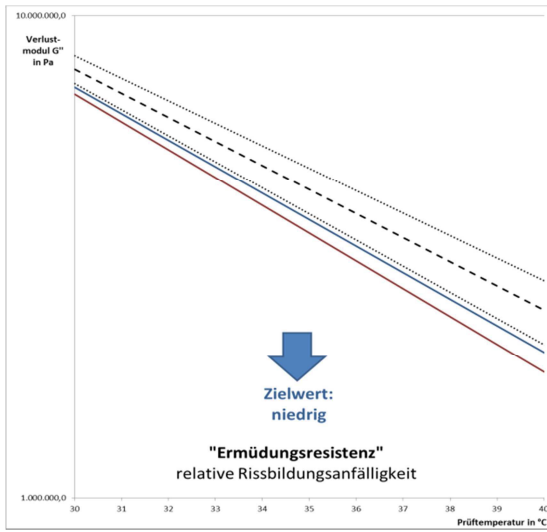
Aus den nachfolgenden Diagrammen einzelner Gegenüberstellungen vergleichbarer Varianten mit der jeweils dazugehörigen Bewertungstabelle zur Variation „Anteil Fasern“ erfolgt die anschließende Interpretation:

- Die Erhöhung des Faseranteils nimmt in Verbindung mit polymermodifiziertem Bindemittel positiv Einfluss auf die Verformungsbeständigkeit. Dagegen werden Ermüdungsresistenz und Verdichtbarkeit tendenziell negativ beeinflusst.
- Die Gegenüberstellung der Varianten zeigt, dass der Einfluss der Änderung des Faseranteils von einem anderen Kriterium überlagert wird, so dass die Einflussgröße zwischen den Vergleichsfeldern variiert. Nach Einschätzung des Verfassers ist dieser Einfluss in der Mörteltheorie bzw. im Mehrskalenmodell (Abschnitt 1.2.3) zu suchen. Es muss davon ausgegangen werden, dass es bei bestimmten Konstellationen von Polymernetzen im PmB, Füllerpartikeln und Fasern in Abhängigkeit von deren freier Bewegungsmöglichkeit, Größe und Struktur zu Einlagerungen bis hin zum „Blockieren“ der Polymernetze („cross-linking“) kommt. Das System verhält sich dadurch nicht mehr proportional. Aufgrund solcher Nichtlinearitäten ist eine Vorhersehbarkeit von Asphaltmörtel-eigenschaften bei Variation einzelner Komponenten nicht zuverlässig möglich.



Variation: Anteil Fasern		Einfluss auf		
Variante ¹⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
P1-1	0,3 %	0	-	++
P1-2	0,4 %	-	++	-

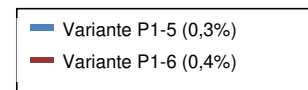
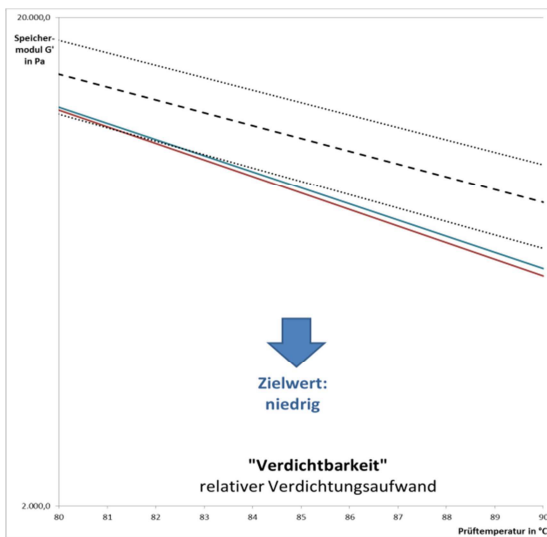
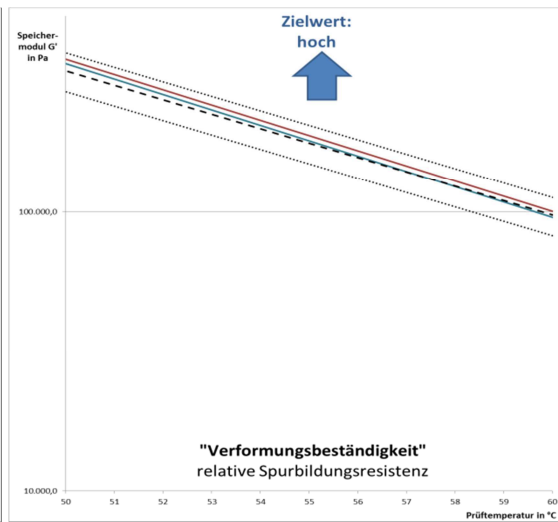
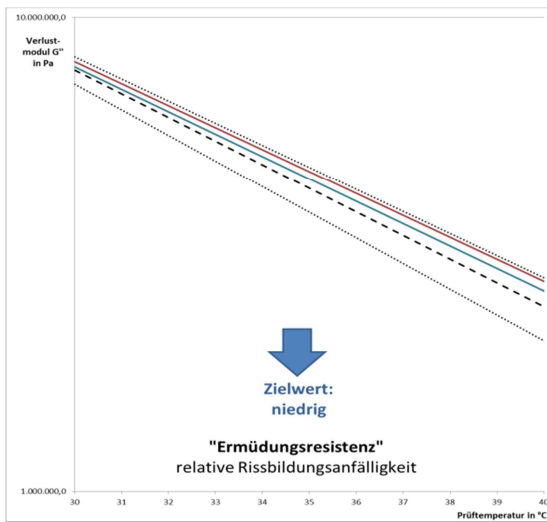
¹⁾ Varianten mit PmB 25/55-55, 180 g Diabas, 80 g KSM 90 W-A



Variation: Anteil Fasern		Einfluss auf		
Variante ²⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
P1-3	0,3 %	++	--	++ ³⁾
P1-4	0,4 %	++	--	++

²⁾ Varianten mit PmB 25/55-55 mit Haftverbesserer, 125 g Kies A (gebrochen), 95 g KSM 90 W-A

³⁾ weitere besonders deutliche Verbesserung



Variation: Anteil Fasern		Einfluss auf		
Variante ⁴⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
P1-5	0,3 %	-	o	++
P1-6	0,4 %	-	o	++

⁴⁾ Varianten mit PmB 25/55-55, 140 g Granit, 110 g KSM 90 W-A

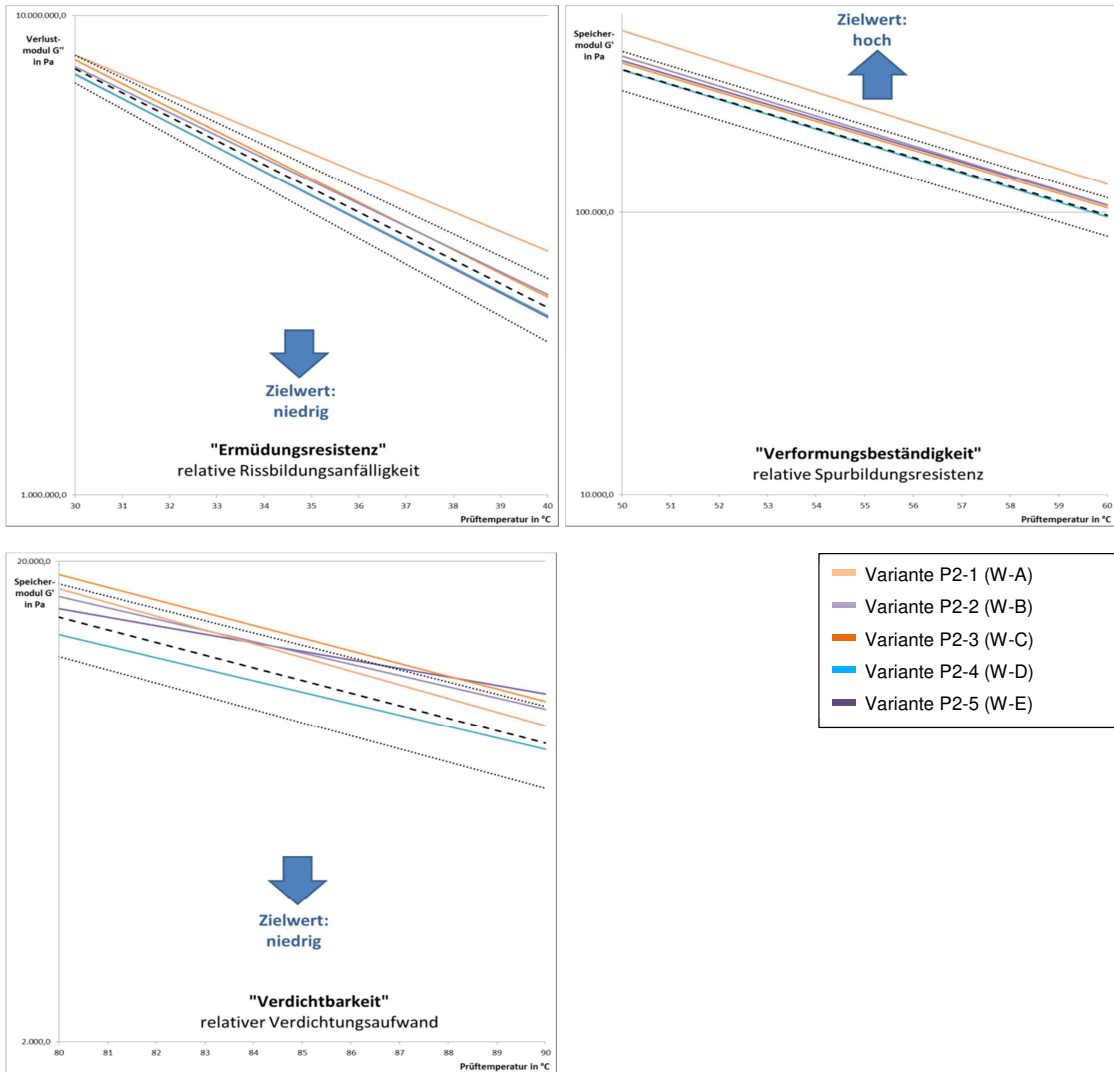
3.3.3.5 Einzelbewertung und Interpretation Einfluss Art Füller



Mit Ausnahme des in der Variation vorgenommenen Wechsels der Art des Füllers bleiben zur eindeutigen Identifikation des Einflusses auf die gemessenen Eigenschaften alle weiteren Bedingungen der gegenübergestellten Varianten identisch. Die Varianten folgen der in der dazugehörigen Bewertungstabelle beschriebenen Spur.

Aus dem nachfolgenden Diagramm der Gegenüberstellung der Varianten mit der dazugehörigen Bewertungstabelle zur Variation „Art Füller“ erfolgt die anschließende Interpretation:

- Die Änderung der Art des Füllers nimmt signifikant Einfluss auf die Gebrauchseigenschaften.
- Die unterschiedlichen Füller zeigen unterschiedlich wirkende und unterschiedlich stark ausgeprägte Wirkungen.
- Der Füller der Variante P2-5 (Hersteller W-E) zeigt eine überproportional deutlich negative Einflussnahme auf die Verdichtbarkeit des Asphaltmörtels. Die Ursache des nicht quantifizierbaren Einflusses kann in der Mörteltheorie bzw. im Mehrskalmodell (Abschnitt 1.2.3) gesehen werden. Es scheint plausibel, dass es bei bestimmten Konstellationen von Polymernetzen im PmB, Füllerpartikeln und Fasern in Abhängigkeit von deren freier Bewegungsmöglichkeit, Größe und Struktur zu Einlagerungen bis hin zum „Blockieren“ der Polymernetze („cross-linking“) kommen kann. Das System wird dadurch unkalkulierbar. Möglicherweise lassen sich dadurch die auffälligen Werte in Variante P2-5 erklären.
- Die gegenseitige Konkurrenzsituation der einzelnen Gebrauchseigenschaften stellt sich deutlich dar.
- Das Ermüdungsverhalten und das Verdichtungsverhalten werden durch die hier verwendeten Kalksteinmehle (P2-1, P2-2, P2-3) ungünstig, durch den Eigenfüller (P2-4) hingegen relativ günstig beeinflusst.
- Die Verformungsbeständigkeit wird durch die Kalksteinmehle tendenziell günstig, durch den Eigenfüller scheinbar ungünstig beeinflusst.



Variation: Art Füller		Einfluss auf		
Variante ¹⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
P2-1	Hersteller W-A	-	++	-
P2-2	Hersteller W-B	-	+	-
P2-3	Hersteller W-C	-	+	--
P2-4	Hersteller W-D	+	-	+
P2-5	Hersteller W-E	+	+	-

¹⁾ Varianten mit PmB 25/55-55, 180 g Diabas, 80 g Füller

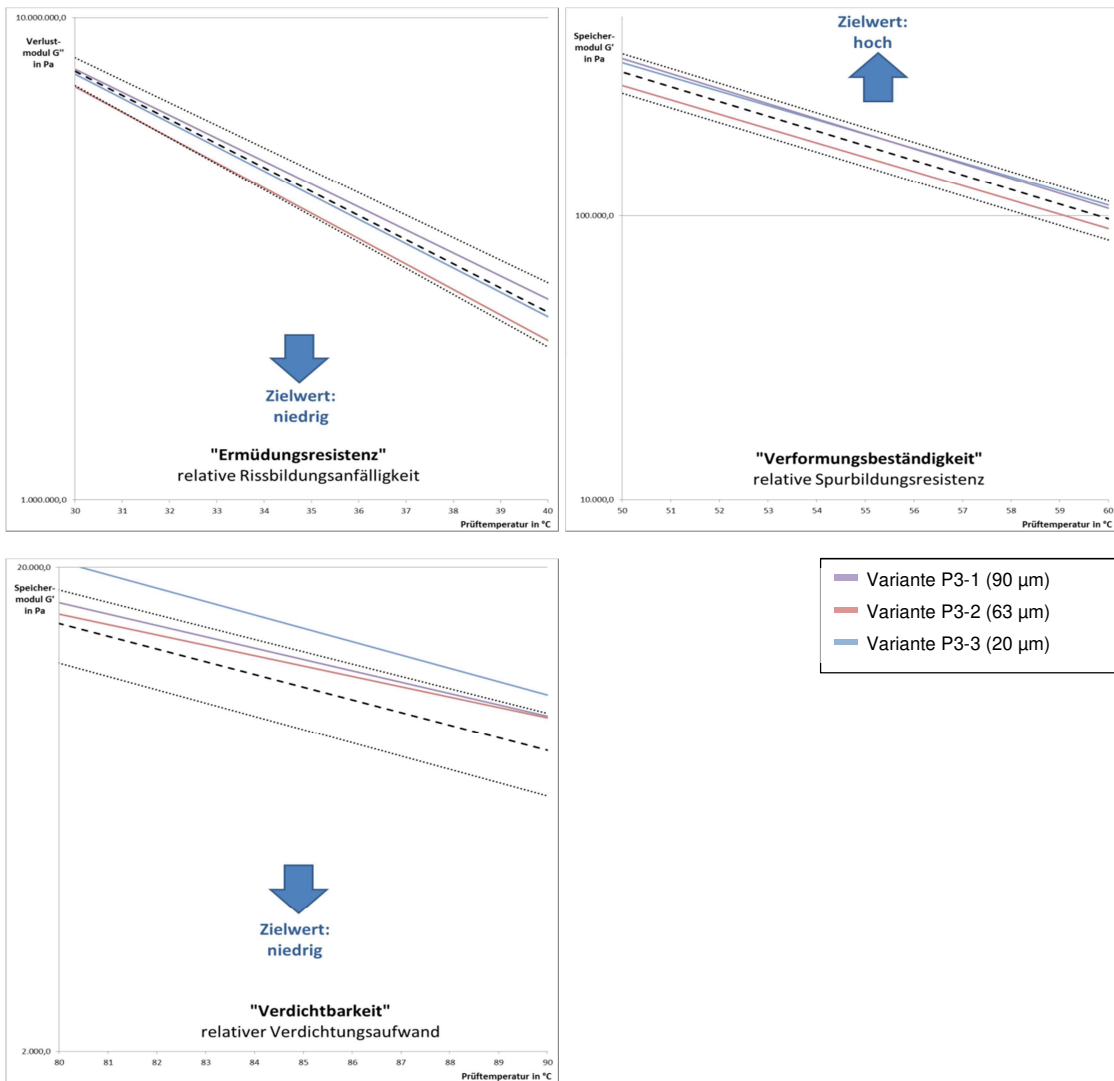
3.3.3.6 Einzelbewertung und Interpretation Einfluss Mahlfeinheit Füller



Mit Ausnahme des in der Variation vorgenommenen Wechsels der Mahlfeinheit des Füllers bleiben zur eindeutigen Identifikation des Einflusses auf die gemessenen Eigenschaften alle weiteren Bedingungen der gegenübergestellten Varianten identisch. Die Varianten folgen der in der dazugehörigen Bewertungstabelle beschriebenen Spur.

Aus den nachfolgenden Diagrammen einzelner Gegenüberstellungen vergleichbarer Varianten mit der jeweils dazugehörigen Bewertungstabelle zur Variation „Mahlfeinheit Füller“ erfolgt die anschließende Interpretation:

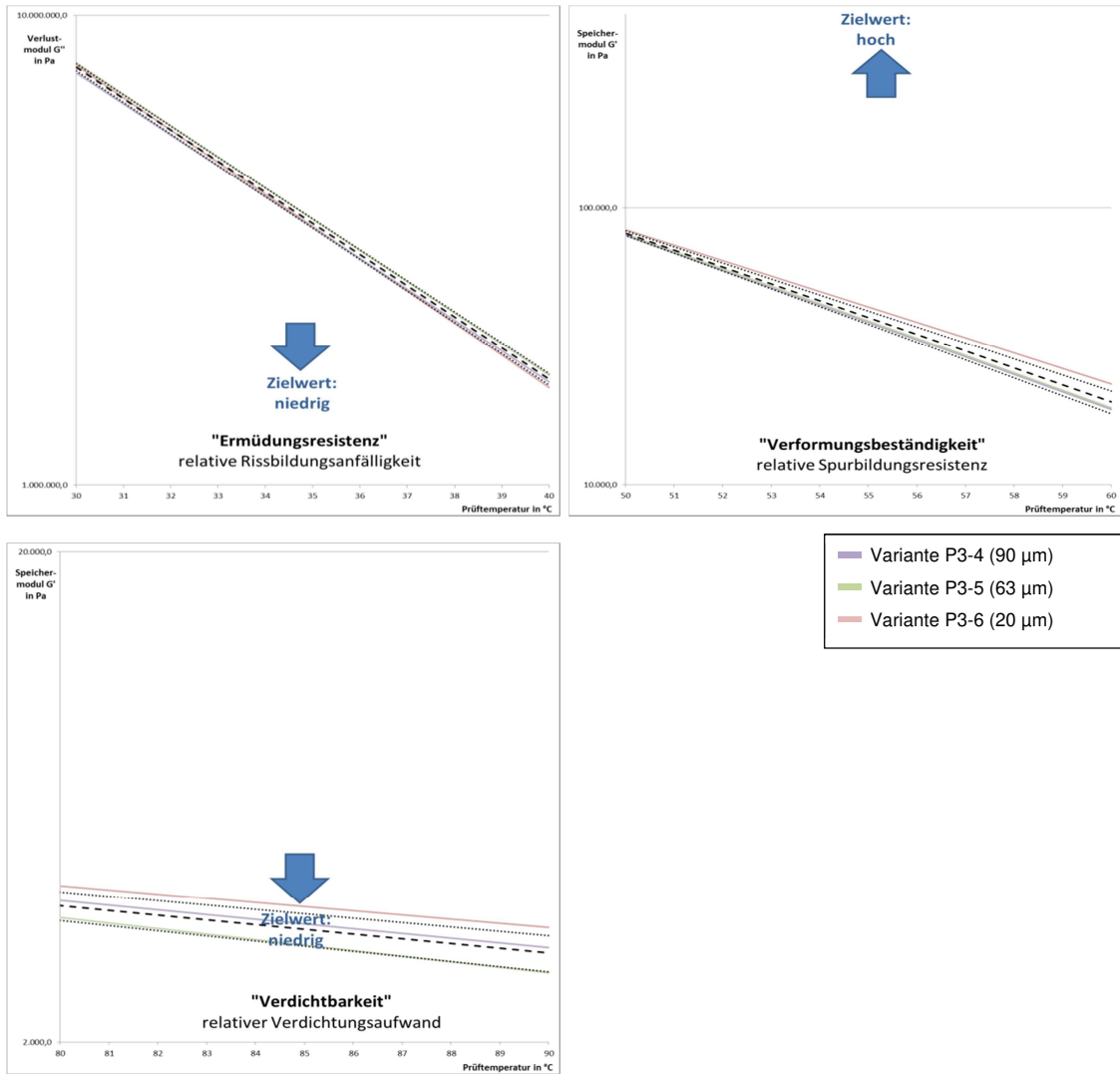
- Eine Änderung der Mahlfeinheit des Füllers nimmt signifikant Einfluss auf die Gebrauchseigenschaften.
- Die gegenseitige Konkurrenzsituation der einzelnen Gebrauchseigenschaften stellt sich deutlich dar.
- Art und Ausmaß der Einflussnahme der Variation bei der Mahlfeinheit des Füllers wird von der Art des Bindemittels überlagert.
- Die Größe der Einflussnahme erscheint nicht linear zur Mahlfeinheit des Füllers. Es wird ein nicht quantifizierbarer Einfluss in der Mörteltheorie bzw. im Mehrskalenmodell (Abschnitt 1.2.3) vermutet. Es scheint plausibel, dass es bei bestimmten Konstellationen von Polymernetzen im PmB, Füllerpartikeln und Fasern, in Abhängigkeit von deren freien Bewegungsmöglichkeit, Größe und Struktur, zu Einlagerungen bis hin zum „Blockieren“ der Polymernetze („cross-linking“) kommen kann. Das System wird dadurch unkalkulierbar. Die kleineren Partikelgrößen bei Variante P3-3 führen dabei schon bei niedrigeren Temperaturen zum Erstarren des Systems, wohingegen die Varianten P3-1 und P3-2 erst bei Erreichen einer bestimmten Weichheit des Polymernetzes ein Erstarren zulassen. Als indirekter Beweis dafür kann angeführt werden, dass gerade dieses Phänomen bei den Varianten im Vergleichsfeld mit Straßenbaubitumen B 50/70 nicht auftritt.



Variation: Mahlfeinheit Füller		Einfluss auf		
Variante ¹⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
P3-1	90 µm	-	+	-
P3-2	63 µm	++	-	-
P3-3	20 µm	+ ²⁾	+	--

¹⁾ Varianten mit Bindemittel PmB 25/55-55

²⁾ Aufgrund der Überschreitung der gewählten Grenze des Variationskoeffizienten ergeben sich Einschränkungen bei der Beurteilung der Ermüdungsresistenz



Variation: Mahlfineheit Füller		Einfluss auf		
Variante ³⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
P3-4	90 µm	++	-	-
P3-5	63 µm	-	-	++
P3-6 ⁴⁾	20 µm	-	++	--

³⁾ Varianten mit Bindemittel B 50/70 (Bewertung des Einflusses am Durchschnittswert aus B50/70 Asphaltmörtel)

⁴⁾ Beurteilungsparameter statistisch nicht abgesichert

3.3.3.7 Einzelbewertung und Interpretation Einfluss Menge Füller



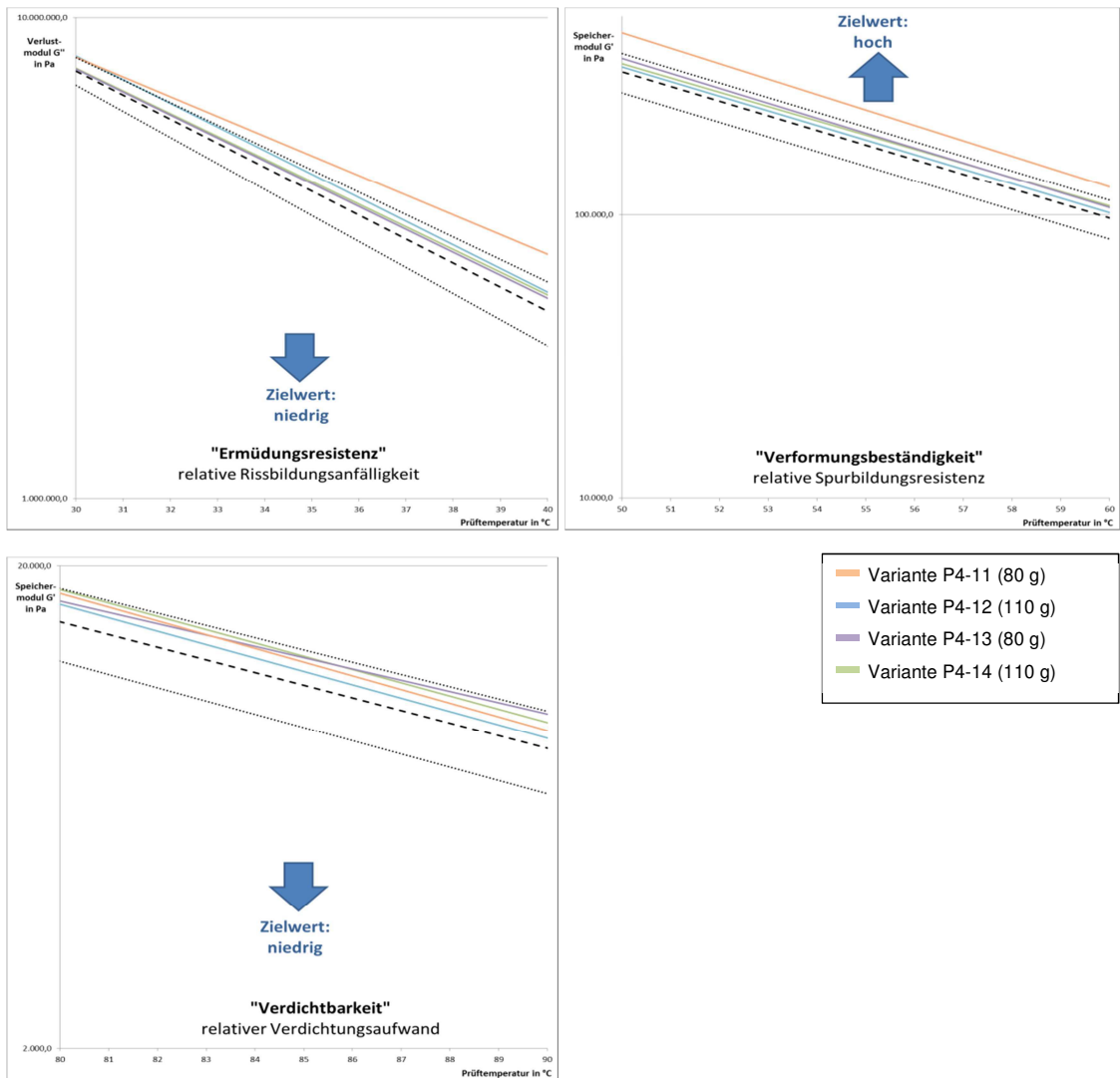
Mit Ausnahme des in der Variation vorgenommenen Wechsels der Menge des Füllers bleiben zur eindeutigen Identifikation des Einflusses auf die gemessenen Eigenschaften alle weiteren Bedingungen der gegenübergestellten Varianten identisch. Die Varianten folgen den in den dazugehörigen Bewertungstabellen beschriebenen Spuren.

Aus den nachfolgenden Diagrammen einzelner Gegenüberstellungen vergleichbarer Varianten mit den jeweils dazugehörigen Bewertungstabellen zur Variation „Menge des Füllers“ erfolgt die anschließende Interpretation:

- Diese Gegenüberstellung von Varianten ergibt kein klares Bild. Teilweise scheint die Menge Füller keinen Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften der entsprechenden Gemische zu nehmen, teilweise jedoch einen sehr deutlichen. Scheinbar wird der Einfluss der Füllermenge noch von einem anderen Kriterium, wie hier der Menge der fgK oder der Art des Füllers, überlagert. Die Änderung der Menge Füller nimmt also bedingt signifikant Einfluss auf die Gebrauchseigenschaften der Asphaltmörtel.
- Eine Erhöhung der Füllermenge wirkt sich erwartungsgemäß meist positiv auf die Verformungsbeständigkeit aus, was jedoch immer zu Lasten der Ermüdungsresistenz geht. Auch hier zeigt sich die Konkurrenzsituation der Gebrauchseigenschaften zueinander deutlich.

Die Vergleichsfelder: P4-11, P4-12 und P4-13, P4-14,
 P4-21, P4-22 und P4-23, P4-24,
 P4-31, P4-32 und P4-33, P4-34,
 P4-41, P4-42 und P4-43, P4-44,
 P4-51, P4-52 und P4-53, P4-54

werden zur direkten Vergleichbarkeit in einer gemeinsamen Graphik dargestellt. Dies bestätigt die gute Differenzierbarkeit der Ergebnisse hinsichtlich der Variation der Füllermenge, die sich bei beiden Füllern unterschiedlicher Hersteller auf die Gebrauchseigenschaften von Asphaltmörtel vergleichbar auswirkt. Zugleich liefert diese Darstellung Indizien für die Einflussnahme der Qualität der beiden hier verwendeten Kalksteinmehle (Hersteller W-A und W-B, vgl. Abschnitt 3.3.3.5).



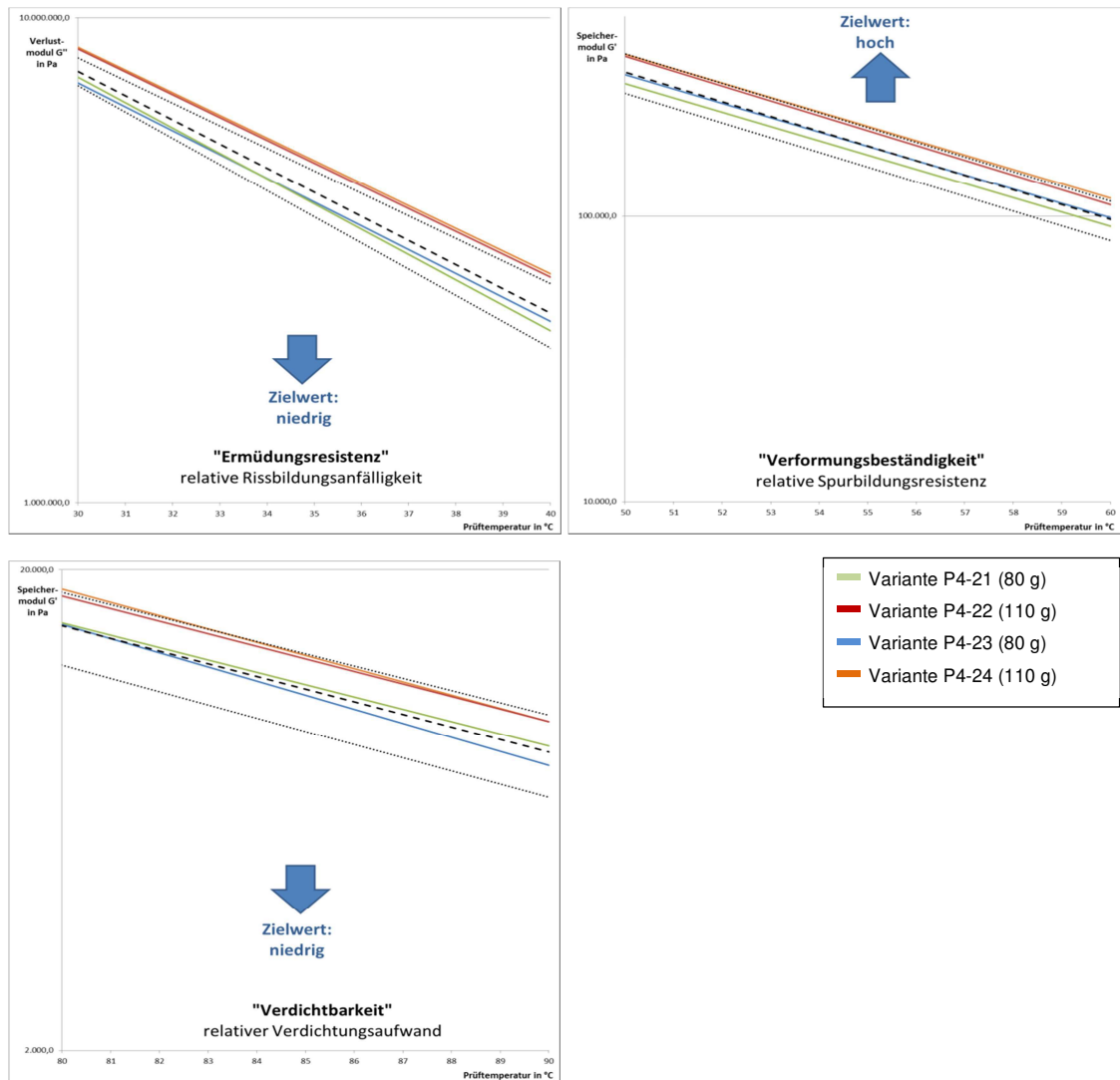
Variation: Menge Füller		Einfluss auf		
Variante ¹⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
P4-11	80 g	--	++	-
P4-12	110 g	-	+	- ²⁾

¹⁾ Varianten mit 180 g Diabas, KSM 90 W-A

²⁾ Aufgrund der Überschreitung der gewählten Grenze des Variationskoeffizienten ergeben sich Einschränkungen bei der Beurteilung der Verdichtbarkeit

Variation: Menge Füller		Einfluss auf		
Variante ³⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
P4-13	80 g	-	+	-
P4-14	110 g	-	+	-

³⁾ Varianten mit 180 g Diabas, KSM 90 W-B

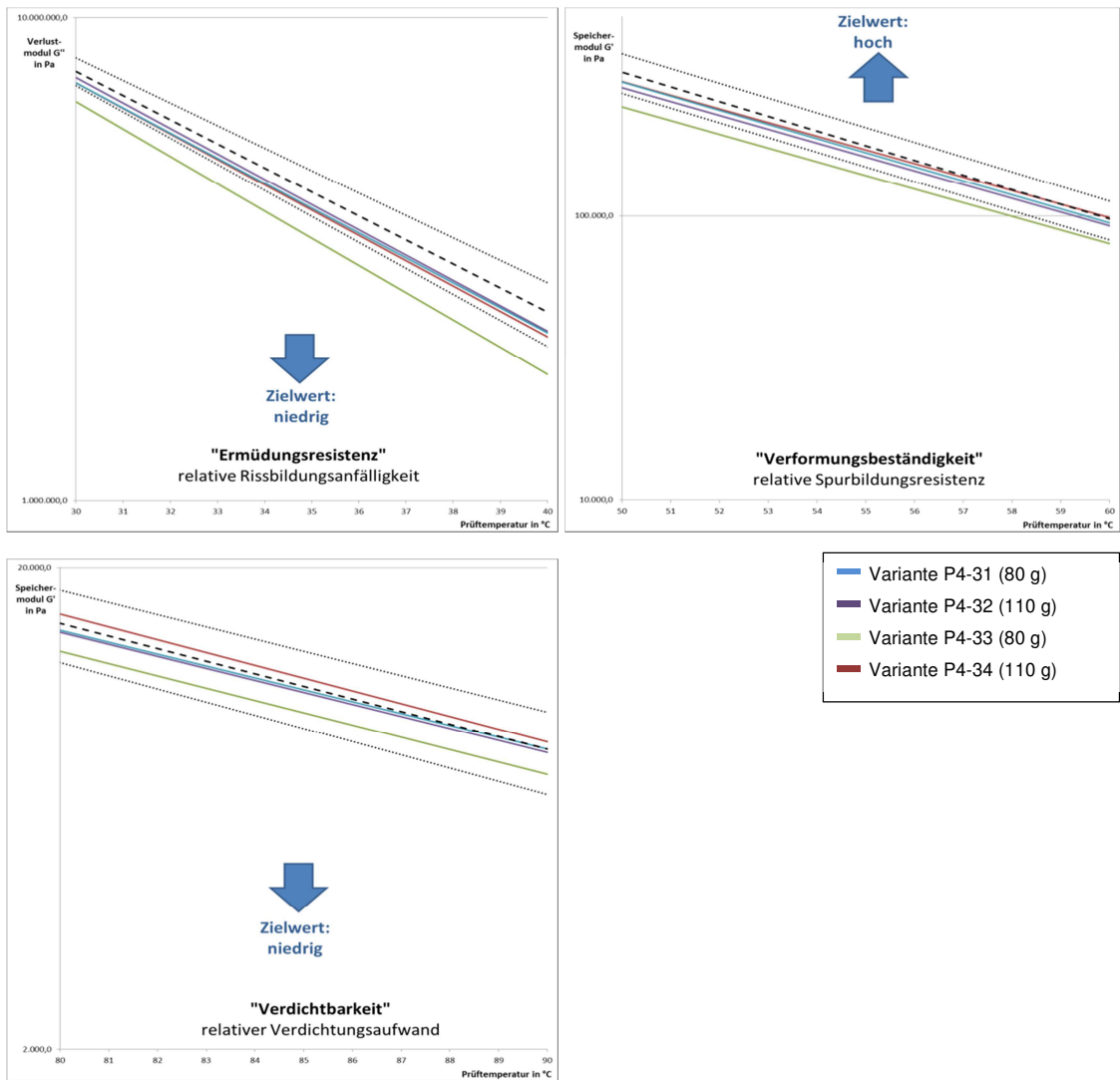


Variation: Menge Füller		Einfluss auf		
Variante ⁴⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
P4-21	80 g	+	-	-
P4-22	110 g	--	+	-

⁴⁾ Varianten 170 g Diabas, KSM 90 W-A

Variation: Menge Füller		Einfluss auf		
Variante ⁵⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
P4-23	80 g	+	o	+
P4-24	110 g	--	++	-

⁵⁾ Varianten 170 g Diabas, KSM 90 W-B



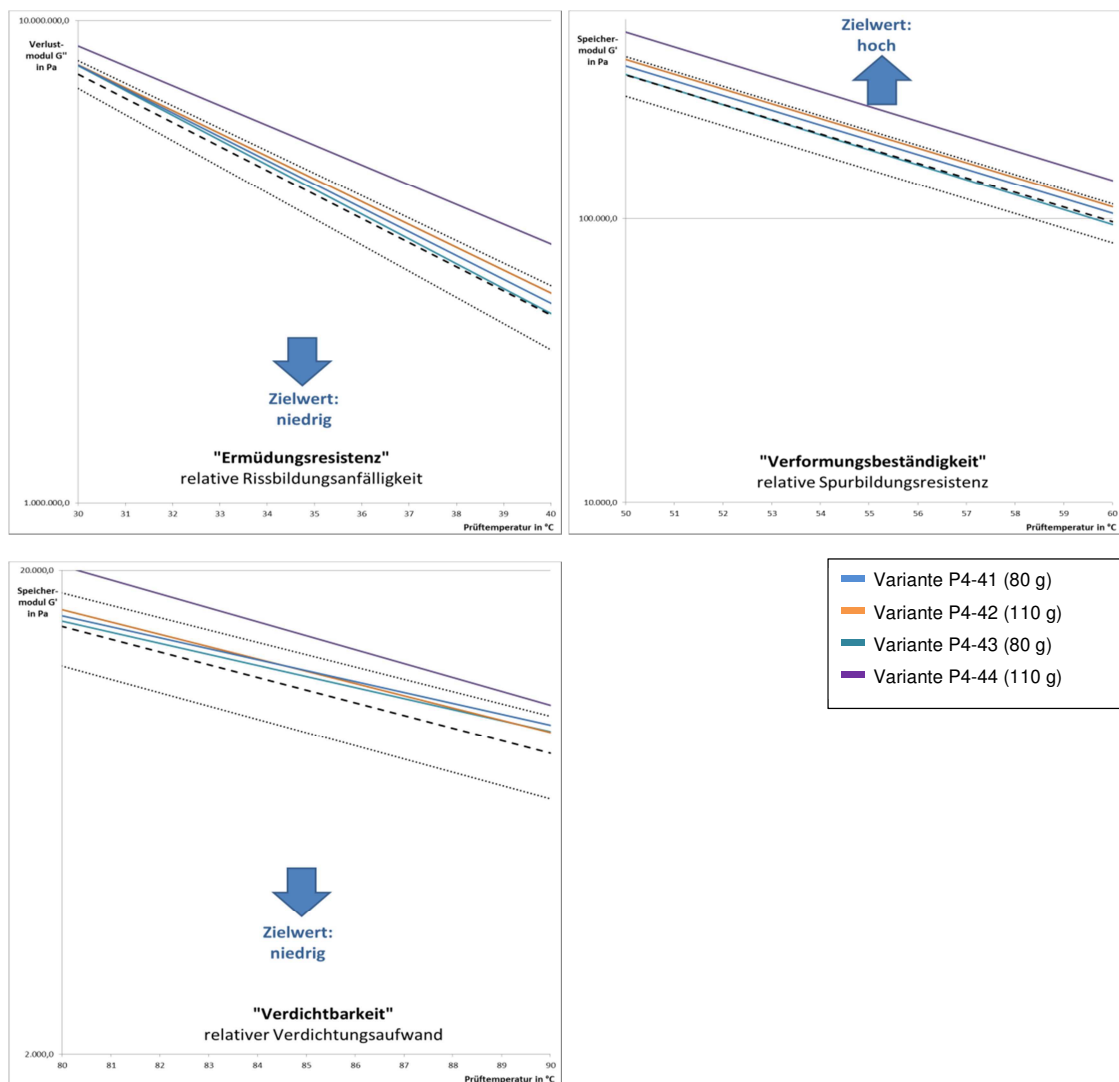
Variation: Menge Füller		Einfluss auf		
Variante ⁶⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
P4-31	80 g	-	- ⁷⁾	+ ⁷⁾
P4-32	110 g	-	-	+

⁶⁾ Varianten mit 140 g Diabas, KSM 90 W-A

⁷⁾ Aufgrund der Überschreitung der gewählten Grenze des Variationskoeffizienten ergeben sich Einschränkungen bei der Beurteilung von Verformungsbeständigkeit und Verdichtbarkeit

Variation: Menge Füller		Einfluss auf		
Variante ⁸⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
P4-33	80 g	++	--	+
P4-34	110 g	+	o	-

⁸⁾ Varianten mit 140 g Diabas, KSM 90 W-B



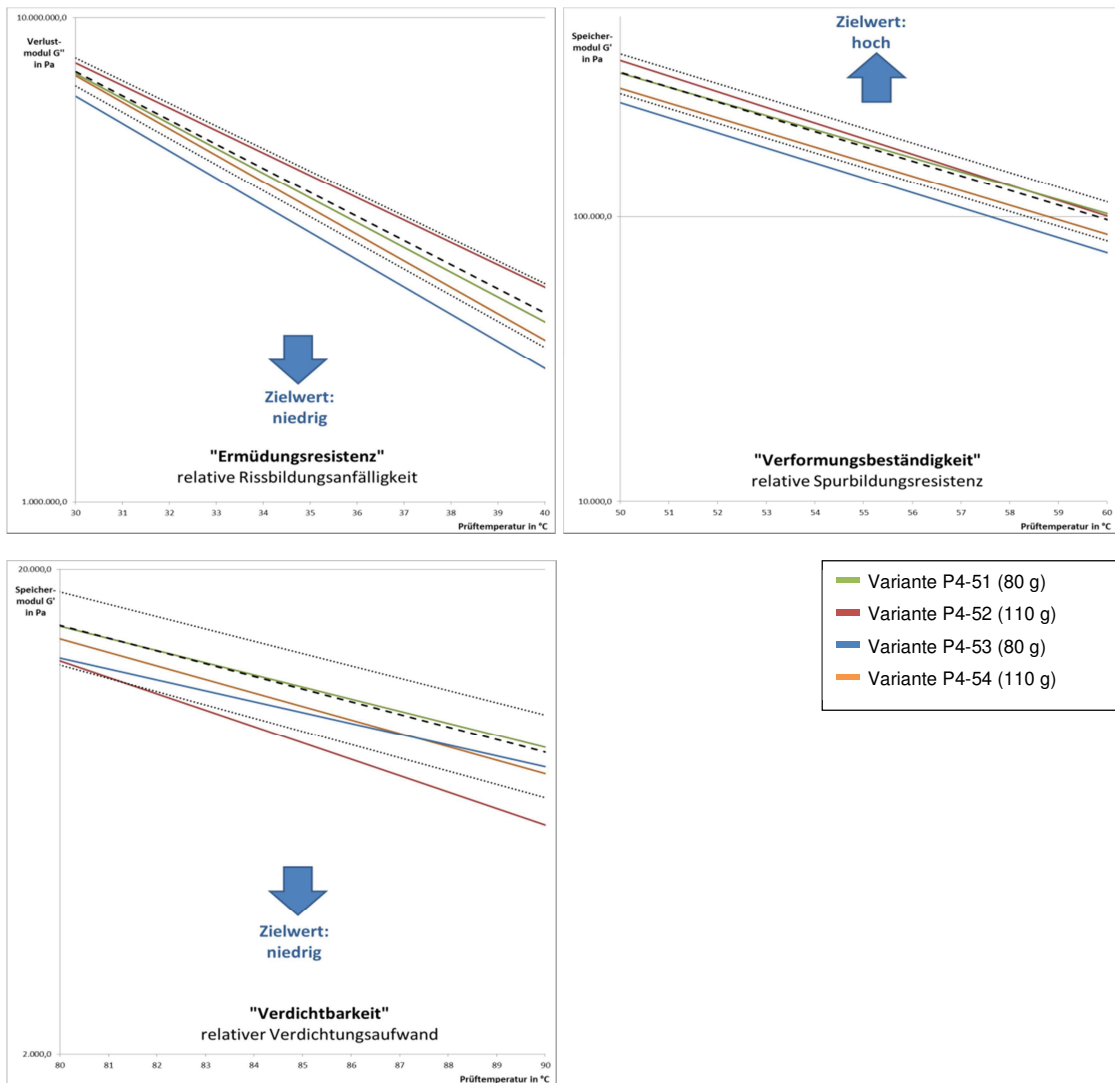
Variation: Menge Füller		Einfluss auf		
Variante ⁹⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
P4-41	80 g	- ¹⁰⁾	+	-
P4-42	110 g	-	+	-

⁹⁾ Varianten mit 180 g Granit, KSM 90 W-A

¹⁰⁾ Aufgrund der Überschreitung der gewählten Grenze des Variationskoeffizienten ergeben sich Einschränkungen bei der Beurteilung der Ermüdungsresistenz

Variation: Menge Füller		Einfluss auf		
Variante ¹¹⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
P4-43	80 g	-	o	-
P4-44	110 g	--	++	--

¹¹⁾ Varianten mit 180 g Granit, KSM 90 W-B



Variation: Menge Füller		Einfluss auf		
Variante ¹²⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
P4-51	80 g	o	+ ¹³⁾	o ¹³⁾
P4-52	110 g	-	+	++

¹²⁾ Varianten mit 140 g Granit, KSM 90 W-A

¹³⁾ Aufgrund der Überschreitung der gewählten Grenze des Variationskoeffizienten ergeben sich Einschränkungen bei der Beurteilung von Verformungsbeständigkeit und Verdichtbarkeit

Variation: Menge Füller		Einfluss auf		
Variante ¹⁴⁾	Spur	Ermüdung	Verformung	Verdichtung
P4-53	80 g	++	--	+
P4-54	110 g	+	-	+

¹⁴⁾ Varianten mit 140 g Granit, KSM 90 W-B

3.3.4 Zusammenfassung der Einzelanalysen

In Abschnitt 3.2.1 wurden die Ergebnisdaten verifiziert und singuläre auffällige Werte eliminiert. Für die Untersuchung der Asphaltmörtel lag eine ausreichende und zuverlässige Bewertungsgrundlage vor.

Im Rahmen der umfangreichen Studie wurde an insgesamt 35 Varianten mit bis zu sieben variierenden Parametern anhand der Messwerte der komplexe Schermodul G^* und der Phasenverschiebungswinkel δ ermittelt. Daraus wurden die rheologischen Kenngrößen Verlustmodul G'' und Speichermodul G' abgeleitet, woraus sich einige interessante Erkenntnisse ergeben. Es kann unterstellt werden, dass durch eine günstige Baustoffauswahl und durch die vorgenommene Variantenbildung ein großes Spektrum an realitätsnahen Asphaltmörteln abgebildet wurde.

Aus der Variantenanalyse lassen sich folgende Ergebnisse ableiten:

1. Die jedem Asphaltmörtel eigenen Gebrauchseigenschaften Ermüdungsresistenz, Verformungsbeständigkeit und Verdichtbarkeit stellen sich grundsätzlich und fast ausnahmslos als konkurrierende Eigenschaften dar.
2. Die Gebrauchseigenschaften der untersuchten Asphaltmörtel mit Straßenbaubitumen und mit polymermodifiziertem Bitumen unterscheiden sich wesentlich voneinander hinsichtlich des Verformungsverhaltens (Verformungsbeständigkeit und Verdichtbarkeit). Der Einfluss hinsichtlich der Ermüdungsresistenz ist jedoch nicht wesentlich.
3. Haftverbesserer bewirkt eine Erhöhung der viskosen Anteile im unteren Untersuchungstemperaturbereich. Mit Haftverbesserern wird eine erhöhte Adhäsion zwischen Bindemittel und Gestein angestrebt. Offensichtlich führt Haftverbesserer jedoch darüber hinaus zu einer zusätzlichen, deutlichen Verbesserung der Ermüdungsresistenz.
4. Die Art der in den untersuchten Varianten gewählten fGK nimmt nur vereinzelt und indifferent Einfluss auf die Gebrauchseigenschaften von Asphaltmörtel.
5. Die Menge der in den untersuchten Varianten verwendeten fGK nimmt zwar Einfluss auf die Gebrauchseigenschaften von Asphaltmörtel, eine eindeutige Prognose daraus ist jedoch aufgrund von Nichtlinearitäten schwierig.
6. Der Anteil der Fasern nimmt bei polymermodifizierten Bindemitteln signifikant Einfluss auf die Gebrauchseigenschaften von Asphaltmörtel.
7. Die Art des Füllers nimmt signifikant Einfluss auf die Gebrauchseigenschaften von Asphaltmörtel. Die Tendenz der Wirkung ist bei den verwendeten Füllerar-

ten verschieden, so dass sich mit dieser Komponente angestrebte Eigenschaften durch Austausch gezielt ansteuern lassen. Für die Art und Weise des Austausches und der damit einhergehenden Wirkung ist jedoch ein für jedes Asphaltkonzept spezifischer Bewertungshintergrund notwendig. Mit diesem lassen sich in einem bestimmten Rahmen, d.h. bis zum Erreichen eventuell auftretender Phänomene, richtungweisende Tendenzen abbilden. Einzelne Gebrauchseigenschaften können dadurch gezielt beeinflusst bzw. verbessert werden.

8. Über die Mahlfeinheit des Füllers können die rheologischen Kenngrößen und damit die Gebrauchseigenschaften von Asphaltmörtel gezielt gesteuert werden. Dabei spielt jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit gerade auch die Art des verwendeten Bindemittels, bzw. dessen Polymernetzstruktur, eine Rolle. Die beiden Einflussfaktoren interagieren, weshalb eine Aussage nur über eine Untersuchung der Asphaltmörteleigenschaften mit dem neuen Prüfverfahren möglich ist.
9. Eine Erhöhung der Menge Füller wirkt sich positiv auf die Verformungsbeständigkeit und negativ auf die Ermüdungsresistenz aus.
10. Art und Weise der Füller- und Fasereinflüsse sind bei PmB nicht eindeutig feststellbar, was sich nur durch Nichtlinearitäten erklären lässt. Bei Erreichen einer bislang nicht definierten Grenze „erstarrt“ das System, was mit einer hohen Verformungsbeständigkeit und einer ungünstigen Verdichtbarkeit einhergeht. Die Gebrauchseigenschaften können unter diesen Umständen nicht mehr eindeutig angesprochen werden. Dieses Phänomen ist theoretisch zwar bereits bekannt, wird jedoch in der Praxis häufig übersehen, was unweigerlich zu ungünstigen Zusammensetzungen von Asphaltgemischen führen kann, mit der Folge unzureichender Dauerhaftigkeit der daraus hergestellten Fahrbahn.
11. Asphaltmörtel können nur auf höchstens zwei Gebrauchseigenschaften hin optimiert werden. Diese Tatsache ist oft auch in der Praxis deutlich erkennbar.

Generell konnten mit den vorgenommenen rheologischen Untersuchungen der ausgewählten Asphaltmörtel deutliche Einflüsse in fast allen betrachteten Bereichen festgestellt werden. Dies spricht für die Wichtigkeit der Asphaltmörteluntersuchung und damit für die hohe Bedeutung dieses neuen Prüfverfahrens. Insbesondere aufgrund der erkannten Nichtlinearitäten ist eine zutreffende Ermittlung der Gebrauchseigenschaften des Asphaltmörtels ausschließlich in einer Gesamtbetrachtung unter Einbeziehung aller rezeptierten Komponenten in Art und Menge mittels Analyse am Dynamischen Scherrheometer möglich. Die Kenntnis des Zusammenwirkens, die Kenntnis der Mörtel-eigenschaften anhand der rheologischen Kenngrößen komplexer Schermodul G^* und Phasenverschiebungswinkel δ , sind unabdingbare Grundlagen bei der Entwicklung von As-

phaltrezepturen. Eine Wahrnehmung der oben beschriebenen Phänomene ist ebenfalls wichtig, da sie mit großer Sicherheit sowohl die Asphaltherstellung (Mischen), den Asphalteinbau (Verdichtung) und die Gebrauchseigenschaften (Spurbildung, Rissbildung, Kornausbrüche, Griffigkeit durch strukturelle Umlagerungen etc.) maßgeblich beeinflussen können. Die Mörteluntersuchung sollte aus dieser Erfahrung heraus fester Bestandteil der Asphaltforschung und Asphaltkonzeption werden.

Auch für die Wahl des Vorgehens bei der Optimierung von Asphaltmörtelrezepturen können die Beobachtungen aus der Variantenuntersuchung herangezogen werden. Dabei ist festzuhalten, dass die Variationen einen unterschiedlich starken und unterschiedlich gut prognostizierbaren Einfluss auf die Asphaltmörteleigenschaften ausüben. Die Gebrauchseigenschaften von Asphaltmörtel können unter Kenntnis der oben dargestellten Wirkungen **primär** gezielt über Variationen von Art, Mahlfeinheit und Menge des Füllers beeinflusst werden. Nur **sekundär** lassen sich die Gebrauchseigenschaften des Asphaltmörtels über die Menge der feinen Gesteinskörnungen und den Anteil der Fasern beeinflussen. Da in der Regel die Art des Bindemittels bauvertraglich vorgegeben und die Art der fGK regional bedingt ist, kann das System durch die beiden letztgenannten Parameter nicht generell, sondern nur mit zusätzlichen Aufwendungen angepasst werden.

Daraus ergibt sich die in nachstehender Abbildung 3.4 dargestellte Reihenfolge, die zweckmäßigerweise bei Erstellung der Variationen im Zuge des Optimierungsprozesses von Asphaltmörtel zugrunde gelegt werden sollte.

Abbildung 3.4: Darstellung einer empfohlenen Variationsstrategie

Optimieren durch	Variation	Variabilität
primär	Art Füller	Eigenfüller berücksichtigen
	Mahlfeinheit Füller	soweit verfügbar
	Menge Füller	frei ¹⁾
sekundär	Menge fGK	frei ¹⁾
	Anteil Fasern	frei ¹⁾
	<i>Bindemittel</i>	<i>In der Regel bauvertraglich vorgegeben</i> ²⁾
	<i>Art fGK</i>	<i>Regional vorgegeben</i>

¹⁾ im Rahmen der vertraglichen Anforderungen (TL Asphalt-StB)

²⁾ Zusatz eines Haftverbesserer optional

3.4 Vergleich mit Ergebnissen aus Asphaltuntersuchungen

3.4.1 Allgemeines

Um die in dieser Arbeit entwickelte Untersuchungsmethodik zur Beschreibung des Baustoffes Asphaltmörtel hinsichtlich Zuverlässigkeit der Aussagekraft zu verifizieren, soll in diesem Abschnitt ein Vergleich der gewonnenen Ergebnisse mit Ergebnissen aus Asphaltuntersuchungen durchgeführt werden. Dabei kann auf die Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt FE 07.0253/2011/ERB „Repräsentative Ermittlung der performance-relevanten Asphalteeigenschaften als Grundlage neuer Vertragsbedingungen“ zurückgegriffen werden, da dabei Asphalte mit vergleichbaren Asphaltmörteln hergestellt, analysiert und ausgewertet wurden. Daraus können Rückschlüsse auf das neue Verfahren und die dafür gewählten Rahmenbedingungen gewonnen werden. Im Forschungsprojekt FE 07.0253/2011/ERB wurden die performance-relevanten Asphalteeigenschaften in drei Phasen ermittelt:

- Erstprüfung (EP)
- Entnommenes Mischgut an der Mischanlage (MW)
- Entnommene Bohrkerne aus der fertigen Strecke (BK)

Da die Asphaltmörteluntersuchungen an Asphaltmörteln vorgenommen wurden, die anhand der Erstprüfungen der entsprechenden Rezepturen hergestellt wurden, erfolgt der Vergleich der Ergebnisse aus den Asphaltmörteluntersuchungen mit den Ergebnissen der Phase EP des Forschungsprojektes. Dies ist daher besonders bedeutsam, da bei den Asphaltuntersuchungen signifikante Abweichungen der Mischgutzusammensetzungen zwischen den drei Phasen festgestellt werden mussten.

3.4.2 Forschungsprojekt Performance-relevante Asphalteeigenschaften

Das Forschungsprojekt FE 07.0253/2011/ERB, welches sich intensiv mit der repräsentativen Ermittlung der performance-relevanten Asphalteeigenschaften befasst, wurde, wie es [Roos 2015] zusammenfasst, mit den folgenden Zielen initiiert:

- Anwendung der im Rahmen der europäisch harmonisierten Asphaltspezifikationen eingeführten Prüfverfahren, die eine Bewertbarkeit der Performance (Gebrauchverhalten) von Asphalt mit Laborversuchen anstreben,
- Erstellung eines Bewertungshintergrundes für bauvertragliche Anforderungswerte und Dimensionierungsparameter.

Für den Vergleich der Ergebnisse aus der Asphaltmörteluntersuchung sind dabei die folgenden Asphaltprüfverfahren für die Asphaltdeckschichten relevant:

- „Druck-Schwellversuch“ nach DIN EN 12697-25,

- „Steifigkeit“ nach DIN EN 12697-26 und
- „Widerstand gegen Kälterisse und Tieftemperaturverhalten bei einaxialen Zugversuchen“ nach DIN EN 12697-46.

Die performance-relevanten Kennwerte an Asphaltprobekörpern wurden anhand von insgesamt 21 Baumaßnahmen systematisch erfasst und ausgewertet. Sieben dieser Asphaltrezepturen (Strecke 8-14) wurden in Bayern bei Bauprojekten verwendet. Von diesen sieben Asphaltrezepturen wurden in den Jahren 2012 und 2013 fünf Asphaltrezepturen für Splittmastixasphalt-Deckschichten SMA 8 S auf hochbelasteten Bundesfernstraßen eingebaut. Diese Strecken sind zu Vergleichszwecken in dieser Arbeit analog der Bezeichnung im Forschungsprojekt FE 07.0253/2011/ERB als Strecke 8, 9, 11, 12, 13 bezeichnet.

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der als relativ aufwendig einzustufenden und nur von entsprechend ausgestatteten und fachkundigen Prüfstellen durchführbaren Performance-Prüfungen an Asphaltprobekörpern mit den Ergebnissen der neuen und relativ einfachen Asphaltmörtelprüfungen mittels DSR verglichen.

3.4.3 Zusammenstellung der relevanten Prüfergebnisse

3.4.3.1 Gebrauchseigenschaften und Prüfverfahren

Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurden als Gebrauchseigenschaften Ermüdungsresistenz, Verformungsbeständigkeit und Verdichtbarkeit definiert. Im Rahmen des Forschungsprojektes FE 07.0253/2011/ERB wurden der Druck-Schwellversuch, die Überprüfung der Steifigkeit und des Widerstands gegen Kälterisse (Tieftemperaturverhalten bei einaxialen Zugversuchen) durchgeführt. Es erscheint dem Autor als sinnvoll, für den Ergebnisvergleich die in Tabelle 3.6 zusammengestellten Beziehungen anzusetzen.

Da die Prüfung des Widerstands gegen Kälterisse (einaxialer Zug- und Abkühlversuch) der Beschreibung des Risswiderstands von Asphalt bei tiefen Temperaturen dient, kann sie hilfsweise zu einer Aussage hinsichtlich der Ermüdungsresistenz des Baustoffgemisches herangezogen werden. Zur Abbildung der in Abschnitt 1.3.6 beschriebenen Ansätze von [Bommert 2017] werden die Ergebnisse der Prüfung des Widerstands gegen Kälterisse auch den Ergebnissen zur Verformungsbeständigkeit gegenübergestellt. Der einaxiale Druck-Schwellversuch beschreibt ein Verfahren zur Bestimmung des Widerstands von Walzasphalt gegen bleibende Verformungen und ist daher für eine Aussage zur Verformungsbeständigkeit geeignet. Das Verfahren zur Ermittlung der Steifigkeit dient der Beschreibung der Steifigkeit von Heißasphalt und lässt daher ebenfalls eine Aussage zur Verformungsbeständigkeit und, nach Einschätzung des Autors, zumindest ansatzweise auch zur Verdichtbarkeit zu.

Tabelle 3.6: Beziehung der zu vergleichenden Ergebnisse aus den vorliegenden Prüfverfahren

Ergebnisse aus dem Prüfverfahren an Asphaltmörtel zur Gebrauchseigenschaft:	Ergebnisse an Asphaltprobekörpern nach dem Prüfverfahren:
<p>Ermüdungsresistenz bei 30°C</p> <p>Verformungsbeständigkeit bei 50°C</p> <p>Verdichtbarkeit bei 90°C</p>	<p>Widerstand gegen Kälterisse (Tiefemperaturverhalten bei einaxialen Zugversuchen) bei -10°C</p> <p>Druck-Schwellversuch bei 50°C</p> <p>Steifigkeit bei 10 Hz, bei 20°C</p> <p>Steifigkeit bei 1 Hz, bei 20°C</p>

3.4.3.2 Performance-Prüfungen an Asphalt

Aus dem Forschungsprojekt FE 07.0253/2011/ERB werden für die Strecken 8, 9, 11, 12, 13 die in Tabelle 3.7 zusammengestellten Untersuchungsergebnisse gewonnen.

Tabelle 3.7: Zusammenstellung vergleichsrelevanter Untersuchungsergebnisse aus rheologischen Prüfverfahren an Asphalt

	Zugfestigkeit bei -10°C [MPa]	Dehnungsrate bei 50°C [‰ · 10 ⁻⁴ /n]	Steifigkeitsmodul bei 20°C, 10 Hz [MPa]	Steifigkeitsmodul bei 20°C, 1 Hz [MPa]
Strecke 8	5,1	1,5	5.753	3.092
Strecke 9	5,6	1,8	5.657	3.025
Strecke 11	6,1	2,0	5.435	3.034
Strecke 12	6,4 ¹⁾	1,7 ²⁾	5.612 ³⁾	2.855 ³⁾
Strecke 13	6,2 ¹⁾	2,7 ²⁾	4.603 ³⁾	2.359 ³⁾

¹⁾ Die Werte der Strecke 12 und der Strecke 13 wurden im Abschnitt 7.4.1 des Forschungsprojekt FE 07.0253/2011/ERB als 100%-ige Ausreißer identifiziert.

²⁾ Die Werte der Strecke 12 und der Strecke 13 wurden im Abschnitt 7.5.1 des Forschungsprojekt FE 07.0253/2011/ERB als 100%-ige Ausreißer identifiziert.

³⁾ Die Werte der Strecke 12 und der Strecke 13 wurden im Abschnitt 7.2.1 des Forschungsprojekt FE 07.0253/2011/ERB als 100%-ige Ausreißer identifiziert.

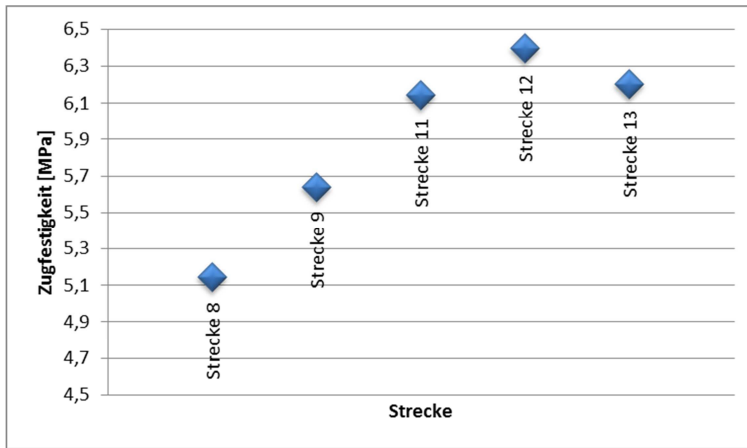


Abbildung 3.5a:
Zugfestigkeit
bei -10°C

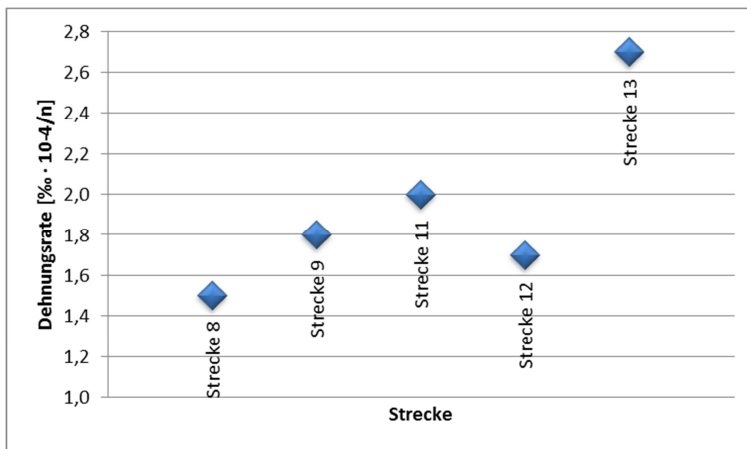


Abbildung 3.5b:
Dehnungsrate
bei 50°C

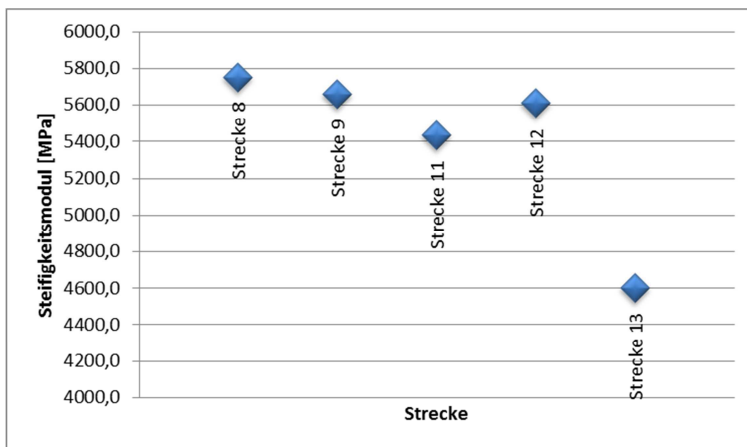


Abbildung 3.5c:
Steifigkeitsmodul
bei 20°C, 10 Hz

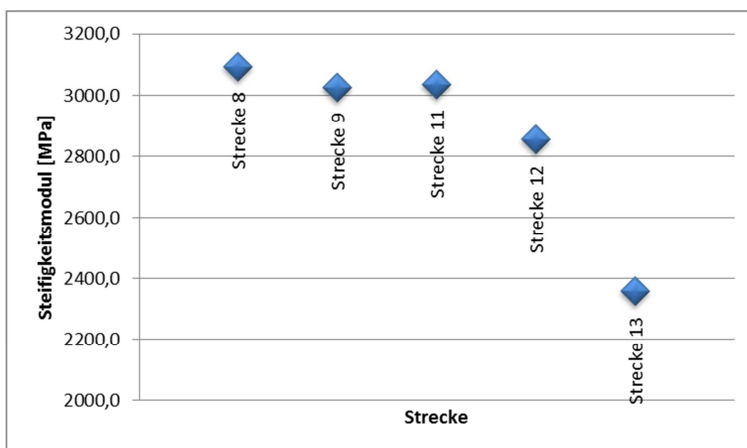


Abbildung 3.5d:
Steifigkeitsmodul
bei 20°C, 1 Hz

3.4.3.3 Performance-Prüfungen an Asphaltmörtel

Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurden für die Strecken 8, 9, 11, 12, 13 mit rheologischen Untersuchungen Materialparameter ermittelt, die im jeweils für die entsprechende Gebrauchseigenschaft relevanten Temperaturbereich in Tabelle 3.8 zusammengestellt sind.

Tabelle 3.8: Zusammenstellung vergleichsrelevanter Untersuchungsergebnisse aus rheologischen Prüfverfahren an Asphaltmörtel

	Ermüdungsresistenz bei 30°C [MPa]	Verformungsbeständigkeit bei 50°C [MPa]	Verdichtbarkeit bei 90°C [kPa]
Strecke 8	8,3	0,438	9,12
Strecke 9	7,9	0,339	6,13
Strecke 11	7,3	0,313	7,86
Strecke 12	6,9	0,218	4,18
Strecke 13	7,9	0,325	7,06

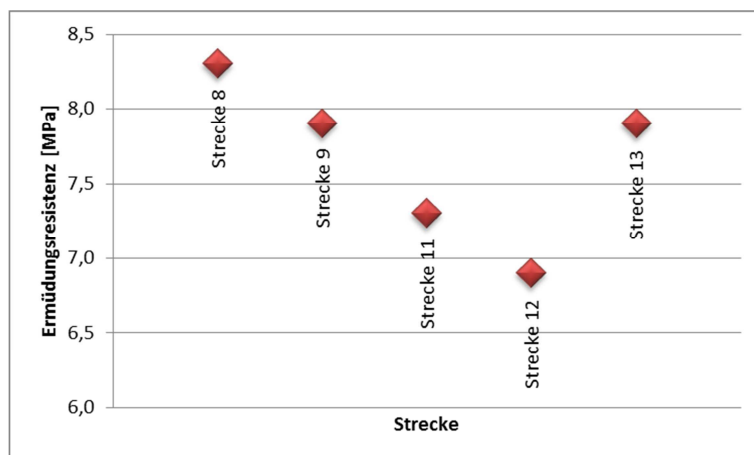


Abbildung 3.6a:
Ermüdungsresistenz
bei 30°C

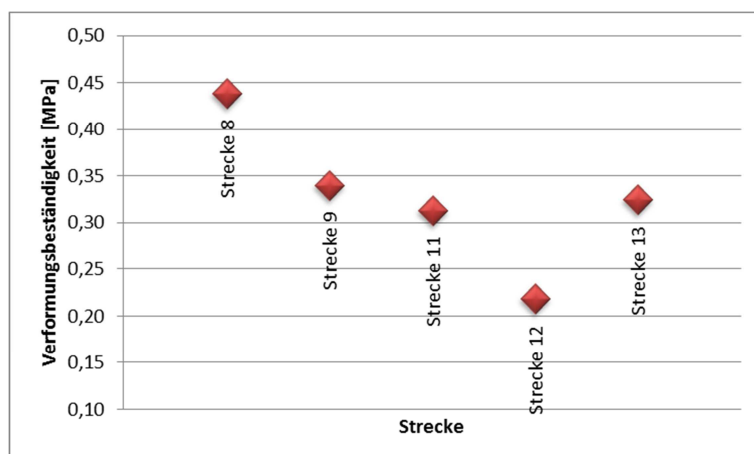


Abbildung 3.6b:
Verformungsbeständigkeit
bei 50°C

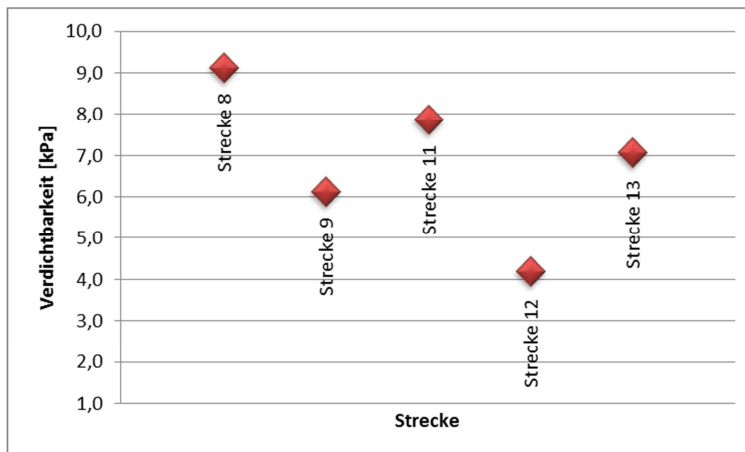


Abbildung 3.6c:
Verdichtbarkeit
bei 90°C

3.4.4 Gegenüberstellung der Ergebnisse

Aus der in Abschnitt 3.3.1 entwickelten Bewertungsmethodik ergibt sich, dass eine hohe Ermüdungsresistenz einen niedrigen Verlustmodul voraussetzt. Abbildung 3.6a weist also bei Strecke 8 die scheinbar ungünstigste und bei Strecke 12 die scheinbar günstigste Ermüdungsresistenz aus. Dies ist bei einem Vergleich der Abbildung 3.5a mit Abbildung 3.6a zu berücksichtigen, da die Graphen in Bezug auf die Materialeigenschaften sich auf den ersten Blick gegenläufig darstellen.

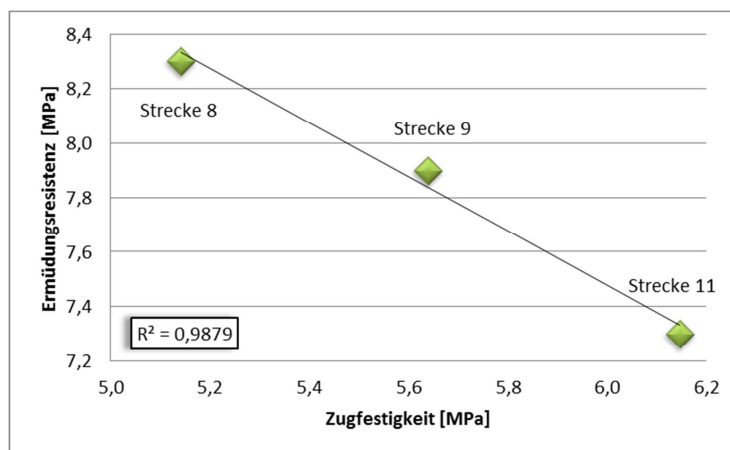
Aus der in Abschnitt 3.3.1 entwickelten Bewertungsmethodik ergibt sich auch, dass eine hohe Verformungsbeständigkeit einen hohen Speichermodul voraussetzt, was in Abbildung 3.6b entsprechend dargestellt wird. Abbildung 3.6b weist also bei Strecke 8 die scheinbar günstigste und bei Strecke 12 die scheinbar ungünstigste Verformungsbeständigkeit aus. Die Vergleichsgröße der Zugfestigkeit am entsprechenden Asphaltprobekörper in Abbildung 3.5a weist hingegen bei niedrigem Wert der Dehnungsrate auf eine hohe Verformungsbeständigkeit hin. Dies ist bei einem Vergleich der Abbildung 3.5a mit Abbildung 3.6b zu berücksichtigen, da die Graphen in Bezug auf die Materialeigenschaften sich auf den ersten Blick gegenläufig darstellen.

Aus der in Abschnitt 3.3.1 entwickelten Bewertungsmethodik ergibt sich weiterhin, dass eine hohe Verformungsbeständigkeit einen hohen Speichermodul voraussetzt, was in Abbildung 3.6b entsprechend dargestellt wird. Abbildung 3.6b weist also bei Strecke 8 die scheinbar günstigste und bei Strecke 12 die scheinbar ungünstigste Verformungsbeständigkeit aus. Die Vergleichsgröße der Dehnungsrate am entsprechenden Asphaltprobekörper in Abbildung 3.5b weist hingegen bei niedrigem Wert der Dehnungsrate auf eine hohe Verformungsbeständigkeit hin. Dies ist bei einem Vergleich der Abbildung 3.5b mit Abbildung 3.6b zu berücksichtigen, da die Graphen in Bezug auf die Materialeigenschaften sich auf den ersten Blick gegenläufig darstellen.

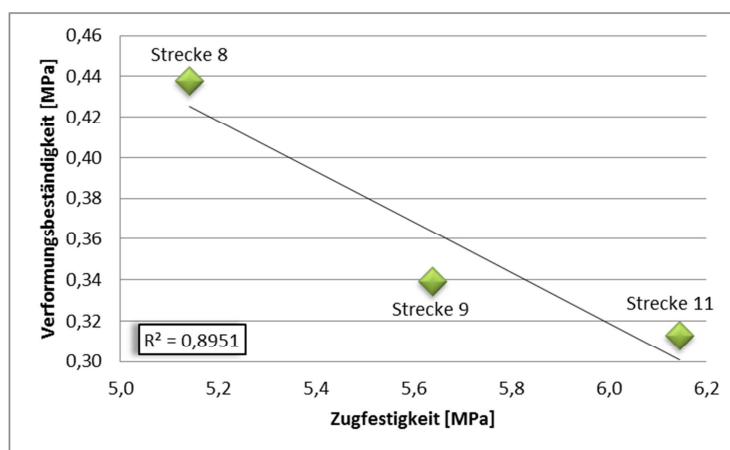
Ein qualitativer Vergleich der Verformungsbeständigkeit in Abbildung 3.6b mit der Steifigkeit in Abbildung 3.5c kann aufgrund der in Abschnitt 3.3.1 entwickelten Bewertungsmethodik durch einen direkten Vergleich der Graphen vorgenommen werden.

Ebenso kann ein qualitativer Vergleich der Verdichtbarkeit in Abbildung 3.6c mit der Steifigkeit in Abbildung 3.5d aufgrund der in Abschnitt 3.3.1 entwickelten Bewertungsmethodik durch einen direkten Vergleich der Graphen vorgenommen werden.

Zur Beurteilung der Relation der zu vergleichenden Prüfergebnisse wurden die Ergebnisse beider Prüfverfahren ohne die identifizierten Ausreißer einer Korrelationsanalyse unterzogen. Die Ergebnisse einschließlich Bestimmtheitsmaß der linearen Korrelationsfunktion R^2 sind in den folgenden Graphen dargestellt.



*Abbildung 3.7a:
Korrelation von
Zugfestigkeit bei
-10°C und Er-
müdungsresis-
tenz bei 30°C*



*Abbildung 3.7b:
Korrelation von
Zugfestigkeit bei
-10°C und Ver-
formungsbe-
ständigkeit bei
50°C*

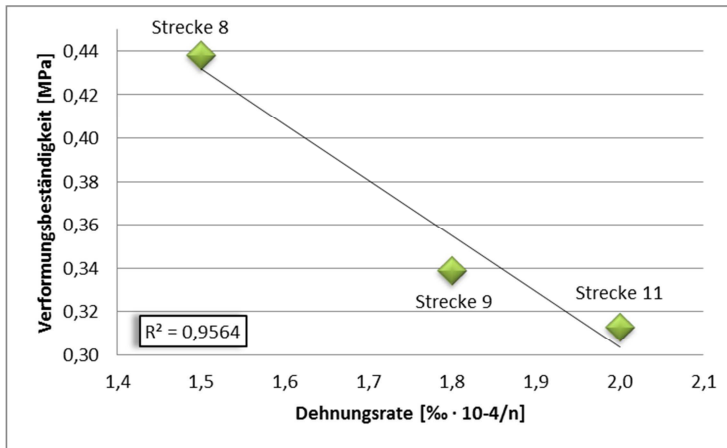


Abbildung 3.7c:
Korrelation von
Dehnungsrate
bei 50°C und
Verformungsbe-
ständigkeit bei
50°C

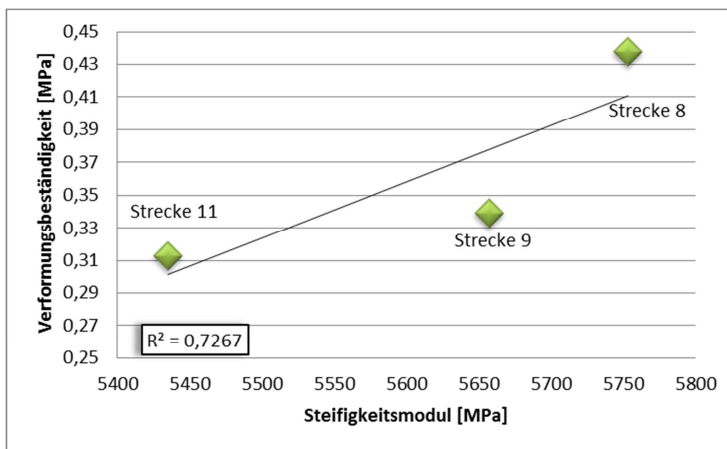


Abbildung 3.7d:
Korrelation von
Steifigkeit bei
20°C, 10Hz und
Verformungsbe-
ständigkeit bei
50°C

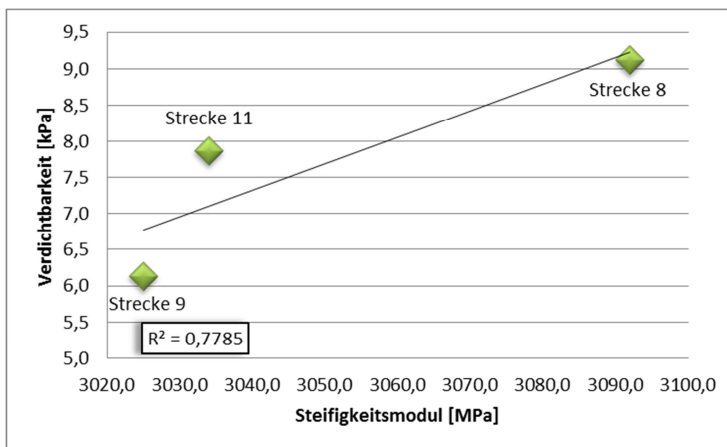


Abbildung 3.7e:
Korrelation von
Steifigkeit bei
20°C, 1Hz und
Verdichtbarkeit
bei 90°C

3.4.5 Bewertung der Gegenüberstellung

Zur Beurteilung der Aussagekraft der Ergebnisse aus den Untersuchungen aus der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Prüfung der Gebrauchseigenschaften von Asphaltmörtel mit dem Dynamischen Scherrheometer wurden ausgewählte Werte aus rheologischen Untersuchungen an Asphaltprobekörpern aus dem in Abschnitt 3.4.2 vorgestellten Forschungsprojekt gegenübergestellt. Dabei können gute bis sehr gute Korrelationen festgestellt werden.

Bei Gegenüberstellung der Zugfestigkeit bei -10°C und der Ermüdungsresistenz bei 30°C (vgl. Abbildung 3.7a) ergibt sich eine sehr gute Abhängigkeit der Untersuchungsergebnisse der beiden Prüfverfahren mit einem Bestimmtheitsmaß von nahezu 99%. Dies weist darauf hin, dass allein mit der Asphaltmörteluntersuchung eine sehr gute Abschätzung der Ermüdungsresistenz getroffen werden kann.

Bei Gegenüberstellung der Zugfestigkeit bei -10°C und der Verformungsbeständigkeit bei 50°C (vgl. Abbildung 3.7b) ergibt sich eine gute Abhängigkeit der Untersuchungsergebnisse der beiden Prüfverfahren mit einem Bestimmtheitsmaß von fast 90%. Wie in Abschnitt 1.3.6 beschreiben, wurde bei [Bommert 2017] der Korrelation der Prüfgrößen aus Kälteversuchen (Zugretardationsversuch) an Asphaltmörteln und Verformungsversuchen (einaxialer Druck-Schwellversuch) an Asphaltprobekörpern bereits in anderen Forschungsarbeiten eine hohe Bedeutung attestiert. Die hier ermittelte Korrelation weist also in besonderer Weise darauf hin, dass allein mit der Asphaltmörteluntersuchung eine sehr gute Abschätzung der Verformungsbeständigkeit getroffen werden kann.

Bei Gegenüberstellung der Dehnungsrate bei 50°C und der Verformungsbeständigkeit bei 50°C (vgl. Abbildung 3.7c) ergibt sich eine sehr gute Abhängigkeit der Untersuchungsergebnisse der beiden Prüfverfahren mit einem Bestimmtheitsmaß von knapp 96%. Auch dies weist darauf hin, dass anhand der Asphaltmörteluntersuchung eine sehr gute Abschätzung der Verformungsbeständigkeit getroffen werden kann.

Bei Gegenüberstellung der Steifigkeit bei 20°C , 10Hz und der Verformungsbeständigkeit bei 50°C (vgl. Abbildung 3.7d) ergibt sich eine gute Abhängigkeit der Untersuchungsergebnisse der beiden Prüfverfahren mit einem Bestimmtheitsmaß von circa 73%. Auch dies weist darauf hin, dass anhand der Asphaltmörteluntersuchung eine Abschätzung der Verformungsbeständigkeit getroffen werden kann. Das im Vergleich zur Korrelation der Dehnungsrate bei 50°C zur Verformungsbeständigkeit bei 50°C niedrigere Bestimmtheitsmaß kann darauf zurückzuführen sein, dass eine bei 20°C ermittelte Steifigkeit eine untergeordnete Aussagekraft in Bezug auf das Verformungsverhalten von Asphalt bei 50°C hat und möglicherweise die Ergebnisse der Asphaltmörteluntersuchung eine bessere Praxisrelevanz vorweisen, zumal bei diesem Verfahren auch im Abschnitt 3.3.4 Nichtlinearitäten, welche sich im Stoffverhalten bei höheren Temperaturen zeigten, aufgedeckt wurden.

Bei Gegenüberstellung der Steifigkeit bei 20°C , 1Hz und der Verdichtbarkeit bei 90°C (vgl. Abbildung 3.7e) ergibt sich eine signifikante Abhängigkeit der Untersuchungsergebnisse der beiden Prüfverfahren mit einem Bestimmtheitsmaß von fast 78%. Auch dies weist darauf hin, dass anhand der Asphaltmörteluntersuchung eine Abschätzung der Verdichtbarkeit getroffen werden kann. Bei dieser Gegenüberstellung kann angemerkt werden, dass eine bei 20°C ermittelte Steifigkeit eine untergeordnete Aussagekraft

in Bezug auf die Verdichtbarkeit von Asphalt bei 90°C hat und auch hier die Ergebnisse der Asphaltmörteluntersuchung möglicherweise eine bessere Praxisrelevanz besitzen, zumal bei diesem Verfahren auch im Abschnitt 3.3.4 Nichtlinearitäten, welche sich im Stoffverhalten bei höheren Temperaturen zeigten, aufgedeckt wurden.

Um das aus dem relativ einfachen Burgers-Modell abgeleitete Prüf- und Bewertungsverfahren auf die Aussagekraft der so ermittelten rheologischen Stoffparameter und um die gewählten Beurteilungsfunktionen für eine Aussage zu den Gebrauchseigenschaften des jeweils untersuchten Asphaltmörtels bestätigen zu können, wurden Vergleiche der so ermittelten Ergebnisse mit an Asphaltprobekörpern ermittelten performance-relevanten Ergebnissen aus bekannten Prüfverfahren durchgeführt. Diese Vergleiche weisen auf eine hohe Qualität des Prüfverfahrens hin. Auf diesem Weg lässt sich die Richtigkeit der im Rahmen der Entwicklung des Prüfverfahrens getroffenen Annahmen und Randbedingungen feststellen.

Generell lässt sich aus diesen Gegenüberstellungen konstatieren, dass die Ergebnisse aus den mit geringem Prüfaufwand und unter Verwendung geringster Materialmengen durchführbaren Asphaltmörteluntersuchungen sowohl nachvollziehbare als auch auf Asphaltuntersuchungen übertragbare Werte liefern. Dies attestiert dem neu entwickelten Prüfverfahren eine sehr gute Aussagekraft der Ergebnisse und eine hohe Zuverlässigkeit des Prüfverfahrens.

4 Zusammenfassung

4.1 Allgemeines

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines neuen Ansatzes zur Beurteilung von Asphaltmörtel in Bezug auf dessen Gebrauchseigenschaften durch rheologische Untersuchungen mit dem Dynamischen Scherrheometer. Dazu wurden erste experimentelle Ansätze entwickelt, auf ein bekanntes Prüfverfahren übertragen und die Ergebnisse hinsichtlich Aussagekraft und Aussageinhalt hinterfragt.

Aus der Idee des Autors von seiner langjährigen praktischen Tätigkeit als Abteilungsleiter und verantwortlicher Bauherr im Asphaltstraßenbau am Staatlichen Bauamt Passau gelang es, an der Technischen Universität München eine Methodik zu entwickeln, welche in ein Verfahren zur Untersuchung von rheologischen Prüfgrößen überführt werden konnte. Nach der erfolgreichen Bewertung des neu entwickelten Prüfverfahrens anhand einiger praxisrelevanter Rezepturen konnte am Ende die Bedeutung dieses Verfahrens manifestiert werden.

Die Arbeit lässt sich in die folgenden Entwicklungsstufen unterteilen:

Idee \longrightarrow Methode \longrightarrow Verfahren \longrightarrow Prüfung \longrightarrow Bewertung \longrightarrow Bedeutung

Für die Annäherung der Idee und der Methode über das Prüfverfahren an die Bewertung und Bedeutung wurden im Zuge dieser Arbeit die in Tabelle 4.1 dargestellten Schritte durchgeführt.

Da bei der rheologischen Modellbildung aufgrund bislang fehlender Ansätze und verschiedener anderer beschriebener Gründe das relativ einfache Burgers-Modell gewählt wurde und da bei der Modifikation des aus den Bitumenuntersuchungen bekannten Prüfverfahrens Annahmen und Rahmenbedingungen getroffen wurden, war es angemessen, das Prüfverfahren einer Plausibilitätsprüfung einschließlich Bewertung der daraus gewonnenen Ergebnisse zu unterziehen. Dadurch sollte Aussagekraft und Zuverlässigkeit des Verfahrens verifiziert werden. Aufgrund der evidenten Praxistauglichkeit kommt dem Verfahren in der abschließenden Bewertung eine hohe Bedeutung zu.

Tabelle 4.1: In der Forschungsarbeit durchgeführte Schritte und deren Resultate

Schritt		Resultat	Ab-schnitt	Darstellung
1	Beobachtung Notwendigkeit	Idee	1.1.1, 1.3.6	
2	Rheologie, andere Ansätze	Rheologisches Modell, Untersuchungs- methodik	2.1.1, 2.1.2, 2.1.3,	
3	Modifikation, Rahmen- bedingungen	Prüfverfahren	2.3.1	
4	Rezepturen, Varianten- bildung	Prüfschema	3.1.1, 3.1.5	
5	Unter- suchungen, Auswertungen	Prüfresultate	3.3.1, 3.3.2, 3.3.3	
6	Gegenüberstel- lung der Ergeb- nisse (Asphalt- Asphaltmörtel)	Bewertung	3.4.3, 3.4.4	
7	Zusammen- fassung	Bedeutung	3.4.5, 4.2	

4.2 Bewertung und Beurteilung des Prüfverfahrens

Die Bewertung der Zuverlässigkeit des neu entwickelten Prüfverfahrens zur Bestimmung der rheologischen Kenngrößen und der Gebrauchseigenschaften des Asphaltmörtels mit dem Dynamischen Scherrheometer, sowie die Bewertung der Aussagekraft der Ergebnisse erfordern eine Gesamtschau auf die erfolgten Studien und Analysen.

Durch die neue Art der Asphaltmörtelanalyse können die bislang nicht immer eindeutig erklärbaren Ergebnisse zurückliegender Forschungsarbeiten nachvollziehbar gemacht werden. Der Einfluss von planmäßigen und unplanmäßigen Variationen an Asphaltmörtelrezepturen wird in der Praxis häufig unterschätzt oder gar übersehen. Es lässt sich nun jedoch darstellen, dass bereits geringe Abweichungen zwischen Erstprüfungen im Labor und den hergestellten Asphaltmörteln signifikante, teils überproportional auftretende Änderungen bewirken können. Sind diese Einflüsse dem Ersteller von Asphaltrezepturen jedoch bekannt, können ungünstige Einflüsse durch andere, entsprechend nutzbringende Einflüsse kompensiert werden. Mit dem neuen Prüfverfahren wird die Gesetzmäßigkeit der widerstreitenden, konkurrierenden Eigenschaften sehr zuverlässig abgebildet. Überdies hinaus gibt das neue Prüfverfahren nachvollziehbare Auskünfte hinsichtlich auftretender Nichtlinearitäten oder hinsichtlich sich gegenseitig beeinflussender Parameter.

Allein die Tatsache, dass die Änderung der Menge fGK signifikanten Einfluss auf Verformungs- und Ermüdungsverhalten darstellt, bestätigt die Notwendigkeit der Einbeziehung der fGK in die Mörtelanalyse für eine Optimierung der Konzeption von Asphaltmischgut. Erstmals können mit Ausnahme der groben Gesteinskörnungen sämtliche im Asphalt wirkenden Einflüsse qualifiziert dar- und gegenübergestellt werden. Damit wird eine schrittweise Optimierung von Asphaltmörtelgemischen möglich. So können auch Fasern und weitere Bestandteile der Asphaltmörtel Ebene in die Beurteilung der rheologischen Eigenschaften des Asphaltmörtels einbezogen werden. Insbesondere könnten damit auch Gummipartikel angesprochen werden. Die derzeitigen Prüfverfahren und Prüfmethode lassen eine exakte Bestimmung aufgrund der unterschiedlichen Stufen des Übergangs von der festen in die gelöste Form von Gummi, diese sind mitunter auch verfahrens- oder herstellerabhängig, nicht wirklich zu. Diesen bislang bekannten Unsicherheiten kann nun mit der Bestimmung der rheologischen Kenngrößen des Asphaltmörtels am Dynamischen Scherrheometer abgeholfen werden. Ähnlich verhält es sich mit heutzutage standardmäßig eingesetztem Asphaltgranulat, dessen Einflüsse auf die Gebrauchseigenschaften des Asphaltes mit den aktuellen Prüfverfahren nur bedingt festgestellt werden können.

Abschließend sei angemerkt, dass unter Beachtung der gegenseitigen Beeinflussung von Asphaltkomponenten mehrerer Ebenen im Mehrskalmodell und gegebener Nichtline-

aritäten bei Erreichen spezifischer Konstellationen im Asphaltmörtel in diesem hochkomplexen System eine Homogenisierung oder Transformation auf andere Ebenen nicht zuverlässig gelingen wird. Das im Rahmen dieser Arbeit zur Ermittlung der rheologischen Kenngrößen des Asphaltmörtels entwickelte Verfahren löst dieses Problem.

Aus einer Gesamtschau ist es aus Sicht des Autors letztlich unabdingbar, die Analyse der Gebrauchseigenschaften des Asphaltmörtels mit allen dort zum Einsatz kommenden Komponenten mit dem neu entwickelten Verfahren mit dem Dynamischen Scherrheometer durchzuführen.

Da sich dieses Verfahren mit einer rheologischen Prüfung von Asphaltmörtel zur Feststellung dessen Eigenschaften und dessen Rezeptur bzw. dessen Einstellung beschäftigt, wird als Bezeichnung für das Verfahren „Rheologischer Asphaltmörtel Setting Test (rheological asphalt mortal setting test)“ kurz „RAMST“ vorgeschlagen.

4.3 Optionen und weiterer Forschungsbedarf

Die Auswertungen zeigen neben der Sinnhaftigkeit und Zuverlässigkeit des neuen Prüfverfahrens auch die innovative Möglichkeit, über geschickte Materialauswahl einzelne Gebrauchseigenschaften von Asphaltmörtel mehr oder weniger zu betonen. Dazu ist lediglich ein hersteller- bzw. mischanlagenspezifischer Datenpool nötig. Durch schrittweises Anpassen des Asphaltmörtels kann dann die Optimierung elegant über die theoretischen Variantenvergleiche mit einem EXCEL-Auswerteprogramm erfolgen. Eine Art skaliertes Performance-Indikator könnte sich dabei als behilflich erweisen.

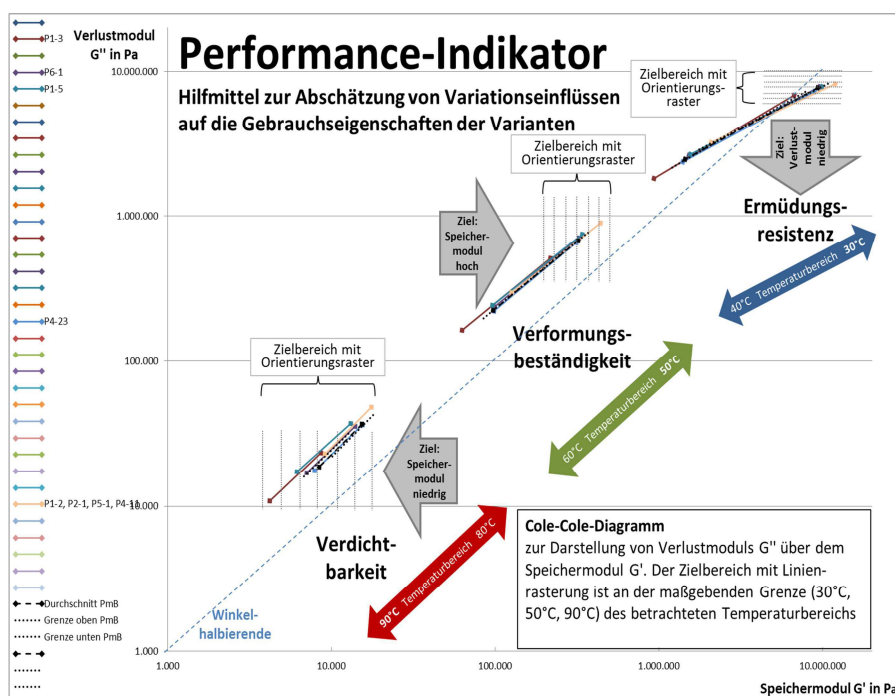


Abbildung 4.1: Mit Hilfe einer plakativen Graphik kann die Einflussnahme einzelner Variationen auf die Gebrauchseigenschaften gezeigt und der Optimierungsprozess unterstützt werden.

Mit Hilfe einer Darstellung, wie in Abbildung 4.1 gezeigt, können die Einflüsse auf die Performance des Asphaltmörtels bzw. auf die Eigenschaften Ermüdungsresistenz, Verformungsbeständigkeit und Verdichtbarkeit am Asphaltmörtel visuell dargestellt werden. Die hier gewählte Gegenüberstellung der Performance der fünf Streckenrezepturen (Strecke 8, 9, 11, 12, 13) zeigt, dass diese insgesamt in einem brauchbaren Bereich liegen, was auch so zu erwarten war, da es sich um reale und bewährte Mischungsrezepturen handelt. Dennoch lassen sich hier Unterschiede in den Eigenschaften ableiten.

Gelingt es, dieses Prüfverfahren zu etablieren, damit neue Komponenten zielsicher gesetzt und Asphaltkonzepte zugleich robuster gestalten werden, so besteht auch die Möglichkeit durch geringere Schichtdicken Energie einzusparen und Ressourcen zu schonen. Auf jeden Fall ist mit dem neuen Prüfverfahren eine bedarfsgerechtere Asphaltkonzeption möglich, da man Asphaltmörtel spezifisch hinsichtlich der Randbedingungen wie Steigungen, Temperaturen, vorhandene Gesteinsarten, Zusätze, aktuell vorhandenes Asphaltgranulat etc. kurzfristig optimieren kann. Zudem werden die eingesetzten Zusätze kontrollierbar und deren Wirksamkeit auf den jeweiligen Fall bezogen nachvollziehbar.

Nach Schaffung eines entsprechenden Bewertungshintergrundes lässt sich durch das neue Prüfverfahren eine Reduktion der derzeit umfangreichen fundamentalen Prüfungen an Asphalt erwarten, indem Teile der bisherigen Prüfungen durch performanceorientierte Asphaltmörteluntersuchungen substituiert werden können. Dies hätte wirtschaftliche Vorteile für Asphalthersteller und für Bauherren.

Auch im Zuge von Schadensanalysen könnte die Bestimmung der rheologischen Eigenschaften des Asphaltmörtels mit dem Dynamischen Scherrheometer große Bedeutung erlangen, wenn auf einen aussagekräftigen Bewertungshintergrund zurückgegriffen werden kann.

Ein weiterer Vorteil der Analyse der rheologischen Eigenschaften des Asphaltmörtels könnte in der rechnerischen Dimensionierung von Asphaltüberbauten gesehen werden, bei der die rheologischen Kenngrößen als Eingangsparameter zugrunde gelegt werden könnten.

Auch wenn die Ergebnisse dieser Arbeit für die oben aufgeführten Einsatzbereiche des neuen Prüfverfahrens eine richtungweisende Grundlage zur Verfügung stellen, besteht weiterer wichtiger Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Für die von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (FGSV) vorgesehenen Forschungsprojekte auf dem Gebiet der Mörtelforschung kann diese Arbeit als Basis dienen.

4.4 Ausblick

Das neue Verfahren lässt Aussagen zur Qualität der Verformungsbeständigkeit und der Verdichtbarkeit von Asphaltmörtel auf der einen Seite und zur Ermüdungsresistenz von Asphaltmörtel auf der anderen Seite zu. Durch die Sammlung eigener Daten könnte es Mischgutherstellern gelingen, eigene Rezepturen noch anforderungsgerechter auszurichten und damit den Asphaltmörteln die optimale Rezeptur zukommen zu lassen. Anhand performance-orientierter Anforderungen an Asphaltgemische könnten dadurch zukünftig Bauverträge noch ziel- und rechtssicherer gestaltet und die gebaute Qualität maßgeblich verbessert werden.

„panta rhei“ – Alles ist in Fluss, alles wandelt sich. So brachte der griechische Philosoph Heraklit seine Beobachtungen zum Ausdruck. Wenn wir nun in unserer hochtechnisierten Zeit in die Lage versetzt werden, nachzuvollziehen, wie die Dinge sich wandeln, bewegen und fließen, dann sind wir einen großen Schritt weiter. Wir können entsprechend agieren oder zumindest reagieren. Ein Ansatz für den besonderen und doch so wichtigen Bereich des Asphaltstraßenbaus wurde in dieser Arbeit aufgezeigt. So kann mit dem zuversichtlichen Gedanken, die Bestimmung der rheologischen Größen am Asphaltmörtel könne die Asphaltbauweise der Zukunft deutlich verbessern, geschlossen werden.

Die Rheologie bringt´s!

Literaturverzeichnis

Regelwerke, Normen

- [AL DSR 2014] Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im Dynamischen Scherrheometer (DSR) - Durchführung im Temperatursweep, AL DSR-Prüfung (T-Sweep), Ausgabe 2014, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe "Asphaltbauweisen"
- [DIN EN 14770] DIN EN 14770 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel — Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels – Dynamisches Scherrheometer (DSR), Ausgabe August 2012
- [TL Asphalt 2007] Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen, TL Asphalt-StB, Ausgabe 2007/Fassung 2013
- [TL Gestein 2004] Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau, TL Gestein-StB, Ausgabe 2004/Fassung 2007
- [TP Asphalt 2016] Technische Prüfvorschriften für Asphalt, TP Asphalt-StB, Ausgabe November 2016
- [TP Gestein 2016] Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Stand: Juni 2016

Veröffentlichungen

- [Arand 1971] Arand, W.:
Grenzen des Mörtelbereichs in hohlraumhaltigen Asphaltgemischen, Bitumen 7/1971
- [Arand 1981] Arand, W., Kiekenap, P.:
Fließindex-Entwicklung und Erprobung eines Prüfverfahrens zur Beurteilung der stabilisierenden Wirkung von Sanden. Abschlussbericht zum Forschungsauftrag Nr. FA 7.084 G 79 E, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig, Lehrstuhl für Straßenwesen, Braunschweig, 1981

- [Arand 1998] Arand, W.:
Zur Strukturviskosität von Bitumen
Bitumen 3/1998
- [Bahia 1999] Bahia, H.; Zhai, H.; Bonetti, K.; Kose, S.:
Non-linear viscoelastic and fatigue properties of asphalt binders, Asphalt Paving Technologie 1999,
Journal of Asphalt Paving Technologists, Volume 68,
Chicago 1999
- [Blab 2005] Blab, R.; Eberhardsteiner J.:
Methoden der Strukturoptimierung flexibler Straßenbefestigungen – Tätigkeitsbericht des Christian Doppler Labors 2002 bis 2005, Mitteilungen des Instituts für Straßenbau und Straßenerhaltung, Heft 17, 2005
- [Blab 2014] Blab, R.; Eberhardsteiner, L.; Hofko, B.:
Bitumenalterung auf mikrostruktureller Ebene, Seminar Probleme der Straßenbeläge im alpinen Raum Autonome Provinz Bozen, Oktober 2014
- [Bommert 2017] Bommert, F.:
Ansprache des Kälteverhaltens von Bitumen und Asphaltmörtel mit dem Zugretardationsversuch, Vortrag Asphaltstraßentagung 2017
- [Cooley 1998] Cooley, L.A.; Stroup-Gardiner, M.; Brown, E.R., Hanson, D.I., Fletcher, M.O.:
Characterization Of Asphalt-Filler Mortars With Superpave Binder Tests, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume: 67, 1998
- [Cost 1999] COST 333:
Development of new bituminous pavement design method: final report of the action, European Commission. Directorate General Transport, Luxembourg, 1999
- [Delaporte 2009] Delaporte, B.; Di Benedetto, H.; Chaverot, P.; Gauthier, G.:
Linear Viscoelastic Properties of Bituminous Materials Including New Products Made with Ultrafine Particles, Road Materials and Pavement Design. Volume 10 – No. 1/2009, page 7 to 38
- [Eckers 2004] Eckers, G.; Kukies, P.:
Bestimmung des Fließkoeffizienten feiner Gesteinskörnungen und deren Auswirkungen auf den Verformungswiderstand im Asphalt.

- Mitteilungen der BASt, in Straße und Autobahn, Heft 1/2004, S. 43-46
- [Feix 1979] Feix, R.:
Untersuchungen von Sanden zur Ermittlung der auf die Qualität bituminöser Mörtel wirksamen Einflussfaktoren, FGSV Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“ Heft 275/1979
- [Findley 1976] Findley, W.N.; Lai, J.S.; Onaran, K.:
Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials with an Introduction to Linear Viscoelasticity. Amsterdam, New York, Oxford: North-Holland Publishing Company, 1976
- [Goos 1999] Goos, D.:
Rheology of Binders and of Asphalt mixes „visualised“ fort ho civil engineer
Vortrag Eurobitume Rheology workshop Luxemburg 1999
- [Graf 2007] Graf, K.; Vassiliou, K.:
Auswirkungen der Eigenschaften von Sand und Füller auf den Mörtel von Walzasphalt (Splittmastixasphalt/Asphaltbeton), FGSV Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“ Heft 964/2007
- [Grönninger 2014] 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
- [Hagner 2003] Hagner, T.:
Untersuchung und Bewertung von bitumenhaltigen Bindemitteln für Asphalt mittels Dynamischem Scher-Rheometer, Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2003
- [Haist 2009] Haist, M.:
Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen, Dissertation, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie - MPA Karlsruhe, Heft 66, März 2009
- [Hase 2003] Hase, M.; Oelkers, C.:
Forschungsbericht FE 07.196/2001/BGB, Optimie-

- rung der versuchstechnischen Rahmenbedingungen für die Durchführung und Auswertung performanceorientierter Bitumenuntersuchungen mittels Dynamischem Scher-Rheometer, August 2003
- [Hase 2011] Hase, M.; Oelkers, C.; Schindler, K.:
Forschungsbericht FE 07.225/2008/BGB, Einfluss von Qualitätsunterschieden polymermodifizierter bitumenhaltiger Bindemittel gleicher Sorte auf das mechanische Verhalten von Asphalten – Teil 1: Verformungsverhalten bei Wärme, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1067, 2011
- [Hase 2017] Hase, M.; Oelkers, C.; Schröter, A.; Zumsande, K.:
FE 07.0235/2009/BGB Einfluss von Qualitätsunterschieden polymermodifizierter bitumenhaltiger Bindemittel gleicher Sorte auf das mechanische Verhalten von Asphalten – Teil 2: Kälte-, Ermüdungs- und Steifigkeitsverhalten, 2017
- [Hirsch 2001] Hirsch, V.; Beer, F.; Krotmann, E.; Frieml-Göttlich, B.; Peters, A.:
Zusammensetzung und Eigenschaften von polymermodifizierten Bitumen
Bitumen 63. Jahrgang, Heft 3, September 2001
- [Hirsch 2014] Hirsch, V.; Mayerl-Rampp, L.:
Ansprache von Bindemitteln mit chemischen Untersuchungsverfahren, Straße und Autobahn 1/2014
- [Jäger 2004] Jäger, A.; Lackner, R.; Eisenmenger-Sittner, C.; Blab, R.:
"Identification of Four Material Phases in Bitumen by Atomic Force Microscopy (AFM)"; Road Materials and Pavement Design 5/2004, S. 9-24
- [Jongepier 1969] Jongepier, R.; Kuilman, B.; Schmidt, R.; Puzinauskas, V.; Rostler, F.:
Characterization of the rheology of bitumens.
Proceeding of the association of asphalt paving technologists, Vol. 38, 1969
- [Kalkhydrat 2011] D'Hooghe, B. et al.:
Ein bewährter Zusatzstoff für den dauerhaften und nachhaltigen Asphaltstraßenbau – Eine Literaturobwertung, Europäischer Kalkverband (EuLA), Dezember 2011
- [Karcher 2005] Karcher, C.:
Prognose und Bewertung des Verformungsverhaltens

- von Asphalten mit dem Druckschwellversuch am Beispiel des Splittmastixasphaltes, Dissertation, Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe (TH), Heft 54, 2005
- [Kränkel 2017] Kränkel, Th.:
Ein rheologischer Modellansatz zur Prognose des Langzeittragverhaltens von Verbunddübeln, Dissertation, Technische Universität München, 2017
- [Krass 1990] Krass, K.:
Beurteilung der versteifenden Wirkung von Sanden in Asphalt anhand der Fließzahl. Abschlussbericht zum Forschungsauftrag Nr. 07.132 G 87 E, Institut für Straßenwesen und Eisenbahnbau (Federführung), Ruhruniversität Bochum, Bochum, 1990
- [Krawietz 1986] Krawietz, A.:
Materialtheorie - Mathematische Beschreibung des phänomenologischen thermomechanischen Verhaltens. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1986
- [Kriz 2016] Kriz, P.; Grant, D.; Boussad, N.; Gausson, D.; Cointe, F.; Toulemonde, Ch.; Shirts, R.:
Assessment of performance specification tests for rheologically simple bitumens. 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Prague. Digital Object Identifier (DOI): [dx.doi.org/10.14311/EE.2016.269](https://doi.org/10.14311/EE.2016.269)
- [Litzka 2001] Mitteilungen des Institutes für Straßenbau und Straßenerhaltung der Technischen Universität Wien, Heft 9, 2001
- [Lowke 2013] Lowke, D.:
Sedimentationsverhalten und Robustheit Selbstverdichtender Betone - Optimierung auf Basis der Modellierung der interpartikulären Wechselwirkungen in zementbasierten Suspensionen, Dissertation, Technische Universität München, 2013
- [McGennis 1994] McGennis, R.B.; Anderson, R.M.; Kennedy, T. W.; Solaimanian, M.:
Background of SUPERPAVE asphalt mixture design and analysis. Report No. FHWA-SA-95-003, Federal Highway Administration (FHWA) Washington D.C., 1994
- [Molenaar 1996] Molenaar, A. A. A.:
Der praktische Nutzen rheologischer Prüfungen von Bitumen, Bitumen 1/1996

- [Moreno 2016] Moreno, E.; Contreras, V.; Carrera, V.; Palleiro Costa, L.:
Influence of the mastics on the permanent deformation of asphalt pavements. 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Prague. Digital Object Identifier (DOI): dx.doi.org/10.14311/EE.2016.365
- [Neumann 1973] Neumann, H.-J.; Rahimian, I.:
Über die Kolloidchemie des Bitumens, Bitumen 35. Jahrgang, 1/1973
- [Neumann 1992] Neumann, H.-J.; Rahimian, I.; Paczynska-Lahme, B.:
Zur Strukturalterung von Bitumen, Mitteilung aus dem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Sonderforschungsbereich 134 „Erdöltechnik – Erdölchemie“, Bitumen 2/1992
- [Neumann 1995] Neumann, H.-J.:
Was ist Bitumen?, Abschiedsvorlesung gehalten am 31. Oktober 1995 im Institut für Erdöl- und Erdgasforschung in Clausthal-Zellerfeld
Bitumen 4/1995
- [Papo 1988] Papo, A.:
Rheological Models for cement Pastes. Materials and Structures 21, 1988
- [Pippich 1981] Pippich, J.:
Die Wirkung des Füllers im Asphalt, Bitumen 4/1981
- [Reiner 1969] Reiner, M.:
Rheologie in elementarer Darstellung, Carl Hanser Verlag München, 1969
- [Roos 2015] Roos, R.; Hase, M.; Wörner, Th.:
Repräsentative Ermittlung der performance-relevanten Asphalteigenschaften als Grundlage neuer Vertragsbedingungen, FE-Vorhaben 07.0253/2011/ERB im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Schlussbericht, 14. August 2015
- [Sachs 2006] Sachs, L.; Hedderich, J.:
Angewandte Statistik, 12. Auflage, Springer Verlag, 2006
- [Schellenberg 2010] Schellenberg, P.; Schellenberg, K.:
Die Viskositäten von Bindemitteln und Asphaltmörtel im Zugretardationsversuch mit Anwendungsbeispielen, Straße und Autobahn 6/2010, S. 392-397

- [Schellenberger 2002] Schellenberger W.:
Beurteilung der Eignung unterschiedlicher Füller für den Asphaltstraßenbau, Bitumen 64. Jahrgang, Heft 1, März 2002
- [Schramm 1995] Schramm, G.:
Einführung in Rheologie und Rheometrie, Gebrüder HAAKE GmbH, Karlsruhe, 1995
- [Schuhbauer 1962] Schuhbauer, A.:
Über Erfahrungen mit Füllern verschiedener Herkunft beim Bau von Asphaltdecken und Asphalttragschichten, Vortrag gehalten am 4.4.1962 in Darmstadt vor der Arbeitsgruppe "Asphalt- und Teerstraßen: Probenahme und Prüfung" der Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen e.V.
- [Suss 1982] Suss, G.; Schuhbauer, A. et al.:
Untersuchung der Eignung von Gesteinsmehlen als Füller zur Herstellung von Asphaltbetondeckschichten, FGSV Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“ Heft 360/1982
- [Suss 1994] Suss, G.:
Untersuchung von Straßenbaufüllern bezüglich praxisrelevante Merkmale, Teil Laborversuche.
Abschlussbericht zum Forschungsauftrag Nr. 06.057 G 90 D, Versuchsanstalt für Straßenwesen der Technischen Hochschule Darmstadt (THD, Federführung), 1994
- [Vale 2016] Vale, A.; Faxina, A.; Gutierrez Grecco, F.:
Effects of filler/bitumen ratio and bitumen grade on rutting and fatigue characteristics of bituminous mastics. 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Prague. Digital Object Identifier (DOI):
[dx.doi.org/10.14311/EE.2016.298](https://doi.org/10.14311/EE.2016.298)
- [Yalçın 2016] Yalçın, E.; Yılmaz, M.; Kök, B.; Çeloğlu, M.:
Effects of nanoclay modification on the rheological properties of bituminous binders. 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Prague. Digital Object Identifier (DOI): [dx.doi.org/10.14311/EE.2016.235](https://doi.org/10.14311/EE.2016.235)
- [Zenke 1990(I)] Zenke, G.:
Stoffbestand und Verhalten von Straßenbaubitumen: Eine Übersicht zum Stande der Erkenntnisse (I), Bitumen 3/1990

- [Zenke 1991(II)] Zenke, G.:
Stoffbestand und Verhalten von Straßenbaubitumen:
Eine Übersicht zum Stande der Erkenntnisse (II)
Bitumen 2/1991
- [Zenke 1991(III)] Zenke, G.:
Stoffbestand und Verhalten von Straßenbaubitumen:
Eine Übersicht zum Stande der Erkenntnisse (III)
Bitumen 4/1991

Anhang

- Anhang 1 AL DSR Mörtel
- Arbeitsanleitung
 - Anlage Fotodokumentation
- Anhang 2 Mörtelrezepturen
- Grundrezepturen (Strecken 8, 9, 11, 12, 13)
 - Rezepturen der gebildeten Varianten
- Anhang 3 Zusammenstellung der untersuchten Füller
- Anhang 4 Zusammenstellung der box-whisker-plots
- Anhang 5 Zusammenstellung der ausreißerbereinigten Datensätze

Anhang 1

AL DSR Mörtel

Arbeitsanleitung

Anlage Fotodokumentation

Arbeitsanleitung zur Beurteilung der Gebrauchseigenschaften von Asphaltmörtel mit dem Dynamischen Scherrheometer (DSR) – Temperatursweep

AL DSR Mörtel

1 Einleitung

Diese Arbeitsanleitung wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes „Beurteilung der Gebrauchseigenschaften von Asphaltmörtel mit dem Dynamischen Scherrheometer“ an der Technischen Universität München entwickelt.

2 Allgemeines

Dieses Prüfverfahren dient zur Bestimmung des komplexen Schermoduls G^* und des Phasenverschiebungswinkels δ mittels Dynamischem Scherrheometer (DSR) im Temperatursweep. In der vorliegenden Arbeitsanleitung wird die Prüfung von Asphaltmörtel behandelt.

3 Abkürzungen und Definitionen

3.1 Asphaltmörtel - Asphaltmörtel ist ein Stoffgemisch, welches aus Bitumen, Füller und feiner Gesteinskörnung besteht. Asphaltmörtel kann auch Fasern und weitere Komponenten mit einer Partikelgröße bis 2,0 mm beinhalten.

3.2 Komplexer Schermodul (G^*) – Quotient aus maximaler Spannung und maximaler Verformung bei harmonischer, sinusförmiger Beanspruchung in Oszillation.

3.3 Phasenverschiebungswinkel (δ) – Phasendifferenz zwischen Spannung und Verformung bei harmonischer, sinusförmiger Beanspruchung in Oszillation.

3.4 Verformung (γ) – maximale Auslenkung der beweglichen Platte am äußeren Umfang bezogen auf den Prüfabstand der Platten, angegeben in Prozent.

3.5 Temperatursweep – stufenweise Erhöhung oder Absenkung der Prüftemperatur.

3.6 Bereich des linearen viskoelastischen Verhaltens – Bereich, in dem der komplexe Schermodul von der Verformung unabhängig ist.

3.7 Isochrone – Gleichung oder Kurve in einer grafischen Darstellung, die das Verhalten eines Werkstoffes bei konstanter Frequenz beschreibt.

4 Prüfgrundsätze

Dieses Prüfverfahren dient der Bestimmung des komplexen Schermoduls G^* und des Phasenverschiebungswinkels δ von Asphaltmörtel unter definierter oszillierender Beanspruchung und bei unterschiedlichen Temperaturen. Die Prüfung ist im verformungskontrollierten (weggesteuerten) Modus bei stufenweise absteigender Temperatur durchzuführen. Als Prüfgeometrie wird ein Platte/Platte-Messsystem mit Plattendurchmessern von 25,0 mm und einer Spaltweite von 6,0 mm verwendet. Die Asphaltmörtelprobe wird mit einer Frequenz von 1,59 Hz oszillierend in einem Temperaturbereich von 90 °C bis 30 °C beansprucht. Jeder bei der Prüfung bestimmte Einzelwert ist das Ergebnis der Messungen von 10 Oszillationsperioden im eingeschwungenen Zustand.

5 Prüfeinrichtungen

5.1 Dynamisches Scherrheometer (DSR)

Mit parallelen Platten und einer Einrichtung zur Temperaturregelung, die eine Temperierung während der gesamten Prüfdauer über den Mindestbereich von 5 °C bis 90 °C mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1$ °C ermöglicht. Die Temperaturregelung muss beide Platten einschließen, um Temperaturgefälle zwischen den Platten zu vermeiden. Das Rheometer muss den komplexen Schermodul G^* im Bereich von 1 kPa bis 10 MPa (± 2 %) und den Phasenverschiebungswinkel δ im Bereich von 0 ° bis 90 ° ($\pm 0,1$ °) bestimmen können.

5.2 Wärmekammer

mit Luftumwälzung und genauer Temperaturregelung zwischen 50 °C und 200 °C (± 5 °C).

5.3 Teflonring

Als Stützstruktur des Asphaltmörtel-Probekörpers ist ein Ring aus Teflon oder einem ähnlichen Werkstoff, an dem der Probekörper nicht, respektive höchstens punktuell verklebt, zu verwenden. Der Innendurchmesser des Teflonringes beträgt 25,05 mm, die Höhe beträgt 6,00 mm, die Wandstärke 2,00 mm.

(Anmerkung: Die Höhe des Teflonringes von 6,00 mm ergibt sich aus der Dicke der unteren Platte, die für die Beschreibung des Verfahrens mit 2,00 mm angesetzt wurde. Es soll der Asphaltprobekörper im eingebauten Zustand bis zu einer Höhe von ca. 4,0 mm im Ring eingebettet sein. Sofern die Dicke der unteren Platte von der Standardhöhe von 2,00 mm abweicht, ist die Höhe des Teflonringes entsprechend anzupassen.)

5.4 Hilfsmittel

- 3 mittelgroße Porzellankasserollen 500 ml mit Porzellan-Stiel
- 2 kleine Porzellankasserollen 80 ml mit Porzellan-Stiel
- 9 Probenbehälter (z.B. Penetrationsbecher)
- Stabthermometer bis 220 °C
- Heizgerät mit Luftbad
- Analysensieb nach DIN EN 933-2 mit Nennöffnungsweite von 2,0 mm

6 Vorbereitung des Dynamischen Scherrheometers (DSR)

Das Rheometer ist entsprechend der in den Herstelleranweisungen angegebenen Einstellungen der richtigen Geometrie und des richtigen Abstandes, einzurichten. Gegebenenfalls ist aus dem Software-Menü das geeignete Oszillationsmodul auszuwählen.

7 Probenvorbereitung

7.1 Herstellen der Asphaltmörtelmischungen

Die Zusammensetzung ist abhängig von der Rezeptur des jeweiligen Asphaltmörtels, die in der Regel anhand einer Asphalterstprüfung aufgestellt wird.

(Anmerkung: Die bislang vorliegenden Erfahrungen entstammen Asphaltmörtelrezepturen, die mit Ausnahme des Weglassens der groben Gesteinskörnungen (gGK) Rezepturen von realen Asphalterstprüfungen entsprechen.)

7.1.1 Bindemittel homogenisieren, aufteilen, lagern

Nach dem Homogenisieren des Bindemittels (nur bei PmB erforderlich) werden 3 Einzelproben mit je 100 g (± 10 g) in Penetrationsbecher (Becher aus Weißblech mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Höhe von 40 mm) abgefüllt und anschließend bis zur weiteren Verwendung im Exsikkator gelagert.

7.1.2 Vorbereiten der Gesteinskörnungen

Die feinen Gesteinskörnungen (fGK) der verwendeten Körnung 0/2 werden mit dem Analysensieb mit Nennöffnungsweite von 2,0 mm auf 2,0 mm Größtkorn ausgesiebt. Von den ausgesiebten Gesteinskörnungen werden vor dem Zusammenmischung des Asphaltmörtels je Charge etwa 200 g (die Menge ist abhängig von der Asphaltmörtelrezeptur) der ausgesiebten feinen Gesteinskörnungen in einer mittelgroßen Kasserolle mindestens 1 Stunde im Wärmeschrank bei 180 °C (± 5 °C) erhitzt.

7.1.3 Vorbereiten des Füllers

Der Fremdfüller, der der Mischung zugegeben wird, wird nicht vorerhitzt. Er wird in einer kleinen Kasserolle eingewogen ($\pm 0,05$ g).

7.1.4 Vorbereiten der Fasern

Die Fasern, die der Mischung zugegeben werden, werden in einer kleinen Kasserolle eingewogen ($\pm 0,01$ g).

7.1.5 Zusammenmischen

Das Bitumen ist im Penetrationsbecher im Wärmeschrank bei 180 °C bei Straßenbaubitumen bzw. bei 200 °C bei Polymermodifizierten Bitumen 30 Minuten lang zu erhitzen. Die als Mischgefäß zum Einsatz kommende mittelgroße Kasserolle ist ebenfalls in dieser Zeit im Wärmeschrank zu erhitzen. Polymermodifizierte Bitumen sind nach dem Erhitzen mit dem Stabthermometer durch mehrfaches zügiges Umrühren in der Kasserolle nochmals ausreichend zu homogenisieren. Anschließend wird das Bitumen in die vorerhitzte mittelgroße Kasserolle auf $\pm 0,05$ g eingewogen. Ohne Unterbrechung ist dann mit dem Einrühren der Fasern zu beginnen (sh. Anlage, Foto 1). Dabei sind die Fasern in 3 Etappen unter gleichmäßigem Rühren auf einem Heizgerät mit einem Stabthermometer einzurühren. Dabei ist die Temperatur des Gemisches zu beobachten. Diese soll bei 150 °C (± 10 °C) liegen, um eine gute Homogenisierung der Masse zu erreichen. Anschließend ist der Füller in 3 Etappen einzurühren (sh. Anlage, Foto 2). Dies erfolgt ebenfalls auf dem Heizgerät bei ca. 150 °C. Zur Erreichung einer möglichst homogenen Masse ist auch hier der 2. und 3. Teil des Füllers erst zuzugeben, wenn die Masse eine gleichmäßige Durchmischung aufweist. Dies kann durchaus (abhängig vom Mischungsverhältnis) mehrere Minuten in Anspruch nehmen. Nach dem Einmischen des Füllers erfolgt dann das Einmischen der feinen Gesteinskörnungen. Diese ist nach dem Vorerhitzen im erhitzten Zustand in eine mittelgroße Kasserolle auf ± 1 g genau einzuwiegen. Dann wird die feine Gesteinskörnung (fGK) ebenfalls in mehreren Etappen und bei einer möglichst gleichmäßigen Temperatur des Gemisches von ca. 150 °C der Mischung zugegeben (sh. Anlage, Foto 3). Der so entstandene Asphaltmörtel ist so lange zu rühren, bis die innere Wand der Kasserolle frei von Füller- oder Gesteinsrückständen ist. In diesem Zustand des Gemisches ist die Innenseite der Kasserolle vollflächig nur mit einem dünnen Bindemittelfilm benetzt (sh. Anlage, Foto 4).

Nach Abschluss des Mischvorganges ist der Asphaltmörtel in ca. 40 g (± 5 g) Chargen auf 6 Probebehälter aufzuteilen, in denen sich die Mörtelproben später mit dem Heizgerät wieder gut erhitzen lassen (sh. Anlage, Foto 5).

(Anmerkung: Die Rührzeit nach Zugabe der fGK bis zur ordnungsgemäßen Durchmischung des Asphaltmörtels kann 5 - 10 Minuten andauern)

7.2 Lagerungsbedingungen

Die Proben sind bis zur Untersuchung bei Umgebungstemperatur abgedeckt zu lagern. Die Untersuchung der vorbereiteten Proben sollte binnen 7 Tagen abgeschlossen sein.

8 Durchführung

8.1 Mörtelkonditionierung

Für den Einbau des Asphaltmörtels ist dieser nach Herstellung oder Lagerung entsprechend zu konditionieren. Dabei ist die zu untersuchende Probe im Probenbehälter auf dem Heizgerät unter regelmäßigem Rühren mit dem Stabthermometer zu erhitzen. Beim Erhitzen ist die Temperatur von 150 °C (± 5 °C) einzuhalten. Der Erhitzungsvorgang ist abgeschlossen, wenn das Bindemittel vollständig fließfähig ist und sich der anfangs feste Probekörper vollständig aufgelöst hat.

8.2 Temperierung der Messgeometrie

Zum Zeitpunkt der Probenkonditionierung soll das Dynamische Scherrheometer (DSR) bereits die voreingestellte Temperatur an der Temperiereinheit und am Messsystem (Messgeometrie Platte/Platte) erreicht haben, um einen zügigen Einbau der Probe zu ermöglichen. Das Messsystem ist für den Einbau der Probe auf 60 °C zu temperieren.

(Anmerkung: Die Betriebstemperatur der Temperiereinheit und des Messsystems sollte nach dem Erreichen der voreingestellten Temperatur für eine Zeitspanne von 15 ± 5 Minuten konstant sein)

8.3 Probeneinbau

Erst unmittelbar vor dem Einbau der Probe ist am Dynamischen Scherrheometer das Öffnen des Messsystems zu veranlassen, um die Abkühlung möglichst gering zu halten. Nach kurzem Abtrocknen der Platten (nur bei flüssigkeitstemperierten Systemen) wird dann der Teflonring auf die untere Platte aufgeschoben, dass der untere Rand des Teflonringes auf dem Sockel des Messsystems aufliegt (sh. Anlage, Foto 6). Der Überstand des Ringes gegenüber der unteren Platte soll in diesem Zustand 4,0 mm betragen. Nun ist der Asphaltmörtel vorsichtig in den Teflonring zu füllen (sh. Anlage, Foto 7). Dabei sollen größere Luft einschüsse vermieden werden. Die Füllhöhe soll des Teflonringes um ca. 2-3 mm übersteigen, so dass nach Absenken der oberen Platte ein Spaltmaß von ca. 6,0 mm erreicht werden kann. Das Messsystem wird nun auf die Prüfposition eingestellt. Das Absenken der oberen Platte hat so zeitig zu erfolgen, dass die Temperatur der eingebrachten Probe noch eine Verformung zulässt. Der Einbauvorgang ist innerhalb von 5 Minuten abzuschließen. Nach dem Absenken der oberen Platte sind größere Überstände zwischen dem oberen Rand des Teflonringes und der oberen Platte zu beseitigen (sh. Anlage, Foto 8). Dabei sollten unterhalb der Platte keine (größeren) Ausbrüche von groben Gesteinskörnern entstehen. Unmittelbar nach Abschluss des Probeneinbaus ist mit dem Prüfprozess zu beginnen.

(Anmerkung: Der Spaltabstand von 6,0 mm ist als Orientierungswert zu verstehen, der aufgrund der Mörtelsteifigkeit beim Einbau nicht immer zuverlässig erreicht werden kann. Innerhalb der Spanne von 5,5 bis 6,5 mm sind die Einbaudicken noch akzeptabel und die Prüfung kann durchgeführt werden. Liegt die Probendicke beim Einbau außerhalb dieser Spanne, ist die Probe zu verwerfen und die Untersuchung an einer neuen Probe durchzuführen.)

8.4 Prüfbedingungen

Dem Probekörper ist es zu ermöglichen, bei jeder Prüftemperatur in thermisches Gleichgewicht zu kommen. Dazu ist nach dem Erreichen der jeweiligen Prüftemperatur eine Gleichgewichtseinstellungsdauer von 15 ± 1 Minuten einzuhalten. Temperaturschritte größer als $10 \pm 0,1$ °C sind nicht erlaubt. Die Prüfungen starten mit der Temperatur 90 °C und enden mit der Temperatur 30 °C. Die Probe wird bei der oszillierenden Beanspruchung mit einer über den gewählten Temperaturbereich konstanten Deformation von 1,0 % beaufschlagt. Die Auslenkung der beweglichen Platte errechnet sich anhand der Messgeometrie und des vorhandenen Spaltabstandes.

(Anmerkung: Die Deformation von 1,0 % wurde in Vorversuchen mit verschiedenen Asphaltmörtelmischungen ermittelt.)

9 Angabe der Ergebnisse

Als Ergebnis sind für jedes Temperaturniveau die Werte des ermittelten komplexen Schermoduls G^* , in Pascal (Pa) auf 1 Pa gerundet, und die Werte des Phasenverschiebungswinkels δ , in Grad auf $1,0^\circ$, d.h. auf eine Stelle hinter dem Komma gerundet, anzugeben. Die zulässige Spannweite der Einzelwerte beträgt bei der Prüftemperatur von 60 °C für den komplexen Schermodul G^* 15 % des Mittelwertes und für den Phasenverschiebungswinkel δ $3,0^\circ$.

Die Ergebnisse sind als Isochronen grafisch darzustellen.

10 Präzision

Die Präzision des Prüfverfahrens wurde bisher nicht ermittelt.

11 Literatur

AL DSR-Prüfung (T-Sweep) Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im Dynamischen Scherrheometer (DSR) - Durchführung im Temperatursweep, AL DSR-Prüfung (T-Sweep), Ausgabe 2014, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe "Asphaltbauweisen"

12 Anlage

Fotodokumentation

Fotodokumentation zur Arbeitsanleitung AL DSR-Mörtelprüfung



Foto 1

Zugabe der Fasern unter ständigem Rühren mit einem Stabthermometer.
Die Zugabe erfolgt dabei in drei Etappen.
Die Temperatur ist bei etwa 150 °C zu halten.



Foto 2

Zugabe des Füllers unter ständigem Rühren mit einem Stabthermometer.
Die Zugabe erfolgt dabei in drei Etappen.
Die Temperatur ist bei etwa 150 °C zu halten.



Foto 3

Zugabe der feinen Gesteinskörnungen unter ständigem Rühren mit einem Stabthermometer.
Die Zugabe erfolgt dabei in drei Etappen.
Die Temperatur ist bei etwa 150 °C zu halten.



Foto 4

Der entstandene Asphaltmörtel ist so lange auf dem Heißluftbad bei 150 °C zu rühren, bis an der Innenseite der Kasserolle keine ungebundenen Gesteinspartikel mehr sichtbar sind. Der Vorgang dauert in der Regel 5 - 10 Minuten.



Foto 5

Nach Beendigung des Mischvorgangs ist der Asphaltmörtel in die Probebehälter abzufüllen. Es ist zweckmäßig jeweils eine Menge von ca. 40 g einzuwiegen. Diese Menge lässt sich später wieder gut erwärmen und homogenisieren. Es ergeben sich in der Regel 4-6 Einzelproben.



Foto 6

Nachdem das Prüfgerät (DSR) auf die Untersuchung vorbereitet und auf 60 °C vortemperiert ist, ist die obere Platte in die Befüllposition zu bringen, die mit Asphaltmörtel in Berührung kommenden Teile mit einem sauberen und staubfreien Tuch zu trocknen und den Teflonring aufzusetzen. Zur Vermeidung von übermäßigem Auskühlen der Prüfeinheit sollten die folgenden Abläufe möglichst zügig erfolgen.



Foto 7

Für den Einbau der entsprechend erhitzten und homogenisierten Asphaltmörtelprobe hat sich das Stabthermometer bewährt. Der Asphaltmörtel soll dabei in mehreren (3-5) kleinen Portionen eingebaut werden und dabei jeweils leicht in den Teflonring eingedrückt werden, um dadurch evtl. vorhandene größere Hohlräume zu beseitigen.



Foto 8

Bei ausreichender Temperatur von Probe und Prüfeinrichtung ist ein Überfüllen um 2-3 mm am oberen Rand des Teflonringes unproblematisch. Nach dem Absenken der oberen Platte wird der durch überschüssiges Probenmaterial entstandene Rand mit zwei Spateln vorsichtig beseitigt.

Quelle:

Die Fotos stammen aus dem Forschungsprojekt „Beurteilung der Gebrauchseigenschaften von Asphaltmörtel mit dem Dynamischen Scherrheometer“, durchgeführt im Asphalt- und Bitumenlabor des Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der Technischen Universität München.

Anhang 2

Mörtelrezepturen

Grundrezepturen (Strecken 8, 9, 11, 12, 13)

Rezepturen der gebildeten Varianten

Anhang 2 Mörtelrezepturen

1. Grundrezepturen der Strecken 8, 9, 11, 12, 13

Rezeptur:	Strecke 8	Mischungsverhältnis gemäß Erstprüfung Nr. xx	
	Hersteller:	Hersteller 8	
	Mischanlage:	Mischanlage 8	
	Sorte:	SMA 8 S	
	Bindemittel:	25/55-55	
	fGK 0/2:	180 g	Diabas
	Füller:	80 g	Kalksteinmehl
	Fasern:	4 g	Hersteller A (lose)
	Bitumen:	72 g	25/55-55
			KSM 90 W-A

Rezeptur:	Strecke 9	Mischungsverhältnis gemäß Erstprüfung Nr. xx	
	Hersteller:	Hersteller 9	
	Mischanlage:	Mischanlage 9	
	Sorte:	SMA 8 S	
	Bindemittel:	25/55-55	
	fGK 0/2:	140 g	Granit
	Füller:	110 g	Kalksteinmehl
	Fasern:	3 g	Hersteller A (lose)
	Bitumen:	72 g	25/55-55
			KSM 90 W-A

Rezeptur:	Strecke 11	Mischungsverhältnis gemäß Erstprüfung Nr. xx	
	Hersteller:	Hersteller 11	
	Mischanlage:	Mischanlage 11	
	Sorte:	SMA 8 S	
	Bindemittel:	25/55-55	
	fGK 0/2:	170 g	Diabas
	Füller:	80 g	Kalksteinmehl
	Fasern:	4 g	Hersteller A (lose)
	Bitumen:	72 g	25/55-55
			KSM 90 W-B

Anhang 2 Mörtelrezepturen

Rezeptur:	Strecke 12	Mischungsverhältnis gemäß Erstprüfung Nr. xx	
	Hersteller:	Hersteller 12	
	Mischanlage:	Mischanlage 12	
	Sorte:	SMA 8 S	
	Bindemittel:	25/55-55 + 0,3% Haftverbesserer	
	fGK 0/2:	125 g	Kies A (gebrochen)
	Füller:	95 g	Kalksteinmehl Hersteller A (lose)
	Fasern:	3 g	25/55-55 +0,3% Haftverbesserer
	Bitumen:	72 g	
			KSM 90 W-A

Rezeptur:	Strecke 13	Mischungsverhältnis gemäß Erstprüfung Nr. xx	
	Hersteller:	Hersteller 13	
	Mischanlage:	Mischanlage 13	
	Sorte:	SMA 8 S	
	Bindemittel:	25/55-55	
	fGK 0/2:	130 g	Kies B (gebrochen)
	Füller:	130 g	Eigenfüller Hersteller A (lose)
	Fasern:	4 g	25/55-55
	Bitumen:	72 g	
			EF W-D

Hinweis: Die Rezepturen sind in anonymisierter Form dargestellt.

Anhang 2 Mörtelrezepturen

2. Rezepturen der gebildeten Varianten

Zur systematischen Variantenbildung wurde eine Prüfmatrix mit Bezeichnung der einzelnen Varianten erstellt. Die Asphaltmörtelmischungen wurden in insgesamt fünf Stufen entwickelt und in den dargestellten fünf Prüfstufen hergestellt und untersucht.

Prüfmatrix

1. Prüfung: Einfluss der Menge der Fasern

Basismischung: Strecke 8
 Bitumensorte: 25/55-55 A
 Bitumenmenge: 72g
 Bitumenhersteller: Lieferstelle A
 Bitumenzusatz: keiner
 Füller: 80g KSM 90 W-A

	Fasern		
fGK		3g	4g
Diabas	180g	Nr. 1	
	180g		(Nr. 2*)

Untersuchung:
 - Deformation 1%
 - mit DSR (6000µm Spalt, 90°C-30°C)
 - an 2 Proben (Doppelbestimmung)

Bezeichnung:
 - Prüfung1Probe1(a/b)
 - Prüfung1Probe2(a/b)

*) **Hinweis:** Nr. 2 = Ergebnis aus Standardmischung (Strecke8VarinateA), daher nicht durchzuführen.

Basismischung: Strecke 12
 Bitumensorte: 25/55-55 A+ 0,3% Haftverbesserer
 Bitumenmenge: 72g
 Bitumenhersteller: Lieferstelle A
 Füller: 95g KSM 90 W-A

	Fasern		
fGK		3g	4g
Kies gebrochen	125g	(Nr. 3*)	
	125g		Nr. 4

Untersuchung:
 - Deformation 1%
 - mit DSR (6000µm Spalt, 90°C-30°C)
 - an 2 Proben (Doppelbestimmung)

Bezeichnung:
 - Prüfung1Probe3(a/b)
 - Prüfung1Probe4(a/b)

*) **Hinweis:** Nr. 3 = Ergebnis aus Standardmischung (Strecke12VarinateA), daher nicht durchzuführen.

Basismischung: Strecke 9
 Bitumensorte: 25/55-55 A
 Bitumenmenge: 72g
 Bitumenhersteller: Lieferstelle A
 Bitumenzusatz: keiner
 Füller: 110g KSM 90 W-A

	Fasern		
fGK		3g	4g
Granit	140g	(Nr. 5*)	
	140g		(Nr. 6*)

Untersuchung:
 - Deformation 1%
 - mit DSR (6000µm Spalt, 90°C-30°C)
 - an 2 Proben (Doppelbestimmung)

Bezeichnung:
 - Prüfung1Probe5(a/b)
 - Prüfung1Probe6(a/b)

*) **Hinweis:** Nr. 5 = Ergebnis aus Standardmischung (Strecke9VarianteA), daher nicht durchzuführen.
 Nr. 6 = Ergebnis aus Prüfung 4 Nr. 52, daher nicht durchzuführen.

Anhang 2 Mörtelrezepturen

2. Prüfung: Einfluss der Art des Füllers

Basismischung: Strecke 8
 Bitumensorte: 25/55-55 A
 Bitumenmenge: 72g
 Bitumenhersteller: Lieferstelle A
 Bitumenzusatz: keiner
 Fasern: 4g

	Füller	KSM 90 W-A (Standard)	KSM 90 W-B (Standard)	KSM 90 W-C (Standard)	EF W-D (Standard)	DBM W-E (Diabas)
fGK		80g	80g	80g	80g	80g
Diabas	180g	(Nr. 1*)	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5

*) **Hinweis:** Nr. 1 = Ergebnis aus Standardmischung (Strecke8VarinateA), daher nicht durchzuführen.

Untersuchung: - Deformation 1% - mit DSR (6000µm Spalt, 90°C-30°C) - an 2 Proben (Doppelbestimmung)	Bezeichnung: - Prüfung2Probe1(a/b) - Prüfung2Probe2(a/b) - Prüfung2Probe3(a/b) - Prüfung2Probe4(a/b) - Prüfung2Probe5(a/b)
--	---

3. Prüfung: Einfluss der Sieblinie des Füllers

Basismischung: Strecke 8
 Bitumensorte: 25/55-55 A bzw. B 50/70
 Bitumenmenge: 72g
 Bitumenhersteller: Lieferstelle A
 Bitumenzusatz: keiner
 Fasern: 4g

Variation der Sieblinien einzelner Füller.

KSM 90 W-B (Standard): Sieblinie standard = bis 90µm(Mittlere Korngröße=23µm)
 KSM 63 W-B (Variation1): Sieblinie mittel fein = bis 63µm(Mittlere Korngröße=20µm)
 KSM 20 W-B (Variation2): Sieblinie sehr fein = bis 20µm(Mittlere Korngröße=6µm)

	Bitumen	PmB 25/55-55 A	B 50/70
	Füller	KSM 90 W-B (Standard)	
fGK		80g	80g
Diabas	180g	(Nr. 1*)	Nr. 4

	Bitumen	PmB 25/55-55 A	B 50/70
	Füller	KSM 63 W-B (mittel fein)	
fGK		80g	80g
Diabas	180g	Nr. 2	Nr. 5

	Bitumen	PmB 25/55-55 A	B 50/70
	Füller	KSM 20 W-B (sehr fein)	
fGK		80g	80g
Diabas	180g	Nr. 3	Nr. 6

*) **Hinweis:** Nr. 1 = Ergebnis „Prüfung2Probe2“, daher nicht durchzuführen.

Untersuchung: - Deformation 1% - mit DSR (6000µm Spalt, 90°C-30°C) - an 3 Proben	Bezeichnung: - Prüfung3Probe1(a/b/c) - Prüfung3Probe2(a/b/c) - Prüfung3Probe3(a/b/c) - Prüfung3Probe4(a/b/c) - Prüfung3Probe5(a/b/c) - Prüfung3Probe6(a/b/c)
---	---

Anhang 2 Mörtelrezepturen

4. Prüfung: Einfluss der Art der feinen Gesteinskörnungen und Mischungsverhältnis des Füllers

Basismischung: Strecke 8
 Bitumensorte: 25/55-55 A
 Bitumenmenge: 72g
 Bitumenhersteller: Lieferstelle A
 Bitumenzusatz: keiner
 Fasern: 4g

fGK	Füller	KSM 90 W-A (Standard)		KSM 90 W-B (Standard)		KSM 90 W-C (Standard)		EF W-D (Standard)	
		80g	110g	80g	110g	80g	110g	80g	110g
Diabas	180g	(Nr. 11*)	Nr. 12	(Nr. 13*)	Nr. 14				
Diabas	170g	Nr. 21	Nr. 22	(Nr. 23*)	Nr. 24				
Diabas	140g	Nr. 31	Nr. 32	Nr. 33	Nr. 34				
Granit	180g	Nr. 41	Nr. 42	Nr. 43	Nr. 44				
Granit	140g	Nr. 51	Nr. 52	Nr. 53	Nr. 54				

*) **Hinweis:** Nr. 11 = Ergebnis „Strecke8“, daher nicht durchzuführen.
 Nr. 23 = Ergebnis „Strecke 11“, daher nicht durchzuführen.
 Nr. 13 = Ergebnis „Prüfung2Probe2“, daher nicht durchzuführen.

Untersuchung: - Deformation 1% - mit DSR (6000µm Spalt, 90°C-30°C) - an 2 Proben (Doppelbestimmung)	Bezeichnung: - Prüfung4Probe11(a/b) - Prüfung4Probe12(a/b) - Prüfung4Probe13(a/b) - Prüfung4Probe14(a/b) - Prüfung4Probe21(a/b) - Prüfung4Probe22(a/b) - Prüfung4Probe23(a/b) - Prüfung4Probe24(a/b)	- Prüfung4Probe31(a/b) - Prüfung4Probe32(a/b) - Prüfung4Probe33(a/b) - Prüfung4Probe34(a/b) - Prüfung4Probe41(a/b) - Prüfung4Probe42(a/b) - Prüfung4Probe43(a/b) - Prüfung4Probe44(a/b)	- Prüfung4Probe51(a/b) - Prüfung4Probe52(a/b) - Prüfung4Probe53(a/b) - Prüfung4Probe54(a/b)
--	---	--	--

5. Prüfung: Einfluss des Haftverbessers

Basismischung: Strecke 8
 Bitumensorte: 25/55-55 A (Lieferstelle A), 25/55-55 + 0,3% Haftverbesserer (Lieferstelle A), B 50/70 (Lieferstelle B)
 Bitumenmenge: 72g
 Füllermenge: 80g
 Fasern: 4g

	Bitumen	25/55-55	25/55-55 + 0,3% Haftverbesserer	B 50/70
fGK	Füller	KSM 90 W-A		
Diabas	180g	(Nr. 1*)	Nr. 2	Nr. 3

*) **Hinweis:** Nr. 1 = Ergebnis aus Standardmischung (Strecke8VarinateA), daher nicht durchzuführen.

Untersuchung: - Deformation 1% - mit DSR (6000µm Spalt, 90°C-30°C) - an 2 Proben (Doppelbestimmung)	Bezeichnung: - Prüfung5Probe1(a/b) - Prüfung5Probe2(a/b) - Prüfung5Probe3(a/b)
--	---

Anhang 3

**Zusammenstellung
der untersuchten Füller**

Anhang 3 Zusammenstellung der untersuchten Füller

Asphalttechnologische Kenntnisse im Bereich der Gesteinskörnungen, wonach durch Zugabe einer an die jeweilige Korngrößenverteilung eines Gemisches angepasste Füllzugabe die Verformungseigenschaften des Asphaltes beeinflusst werden und Kenntnisse aus der Mörteltheorie, wonach die versteifende Wirkung des Füllers auf den Asphaltmastix bzw. auf den Asphaltmörtel bekannt ist, erfordern eine weiterreichende Betrachtung dieser Komponente. Aus diesem Grund ist den resultierenden Eigenschaften des Asphaltmörtels besondere Beachtung zu schenken. Der Fokus liegt hier also insbesondere auf den versteifenden Eigenschaften des Füllers. Zur Beurteilung der rheologischen Eigenschaften verschiedener Asphaltmörtelvarianten mit unterschiedlichen Füllern wurden verschiedene Daten der untersuchten Füller ermittelt.

Dazu wurden neben den in den fünf ausgewählten Streckenrezepturen enthaltenen Füllern zusätzliche Füller mit verschiedenen Mahlfineinheiten und mineralogischen Zusammensetzungen zu den Untersuchungen hinzugezogen. Es handelt sich dabei um handelsübliche bzw. an Asphaltmischanlagen zur Herstellung von Asphaltmischgut eingesetzte Füller.

Tabelle: Zusammenstellung der zur Auswahl stehenden Füller

Nr.	Hersteller	Produktbezeichnung	Größtkorn	Bemerkung	Arbeitsbezeichnung
1	Werk A	Kalksteinmehl (KSM)	90 µm		KSM 90 W-A
2	Werk B	Kalksteinmehl (KSM)	90 µm		KSM 90 W-B
3	Werk C	Kalksteinmehl (KSM)	90 µm		KSM 90 W-C
4	Werk D	Eigenfüller (EF)	ca. 90 µm	nicht spezifiziert	EF W-D
5	Werk B	Kalksteinmehl (KSM)	20 µm		KSM 20 W-B
6	Werk B	Kalksteinmehl (KSM)	63 µm		KSM 63 W-B
7	Werk E	Diabasmehl (DBM)	ca. 90 µm	nicht spezifiziert	DBM W-E

Ein Blick auf die Sieblinien und die Korngrößenverteilung der sieben verschiedenen Füller lässt zwei Hauptgruppen erkennen:

- Sehr fein, enggestuft
Nr. 3: KSM 90 W-C
Nr. 5: KSM 20 W-B
- Fein, weitgestuft
Nr. 1: KSM 90 W-A
Nr. 2: KSM 90 W-B
Nr. 4: EF W-D
Nr. 6: KSM 63 W-B
Nr. 7: DBM W-E

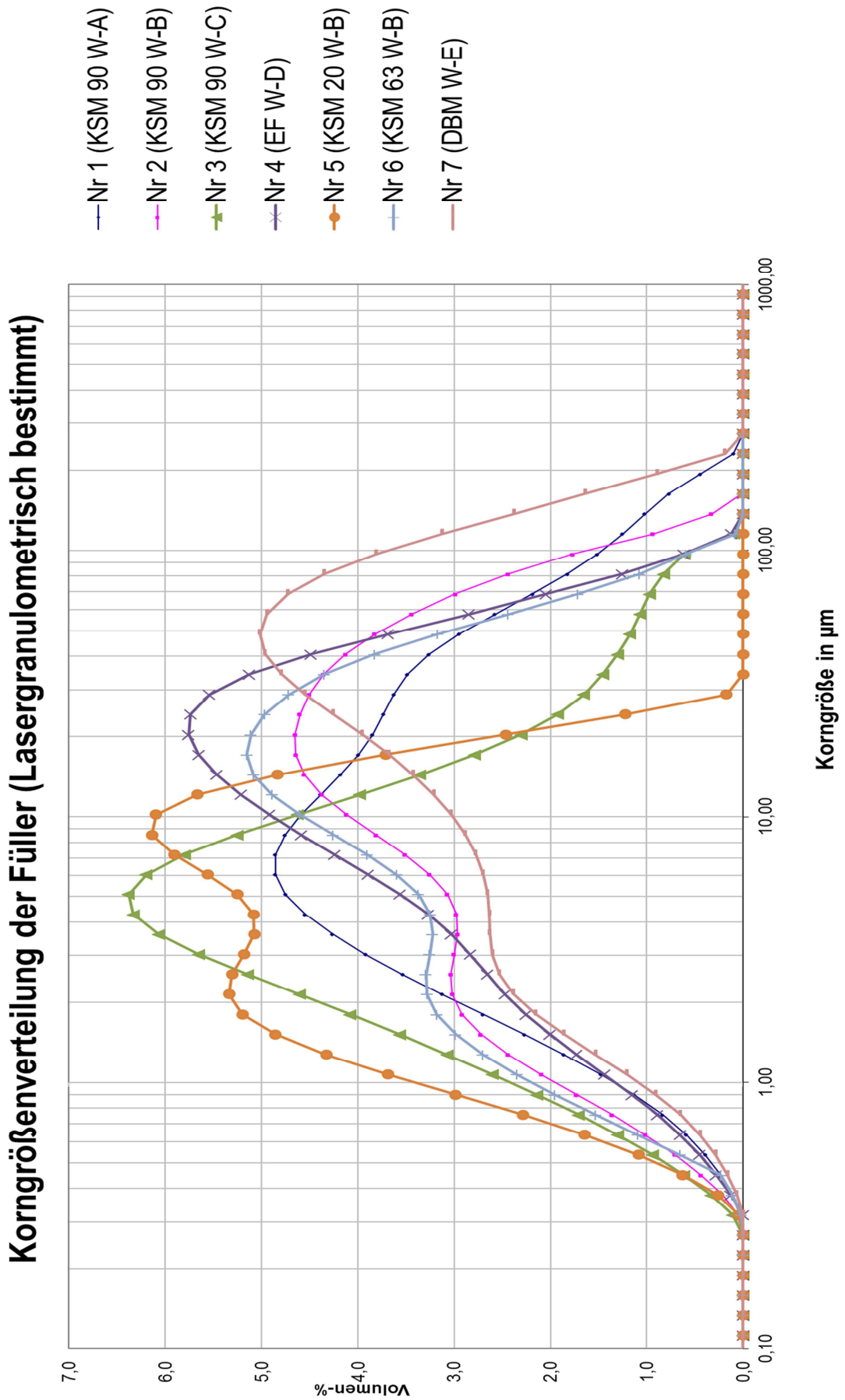
Tabelle: Eigenschaften der untersuchten Füller

Nr.	Arbeitsbezeichnung	Rohdichte	Hohlraum- gehalt nach Rigden	$\Delta EP_{RuK}^{1)}$	Stabilisie- rungs- Index	Spezifische Oberfläche nach BLAINE
		[g/cm ³]	[%]	[°C]	[-]	[cm ² /g]
1	KSM 90 W-A	2,741	31,7	11,0	2,0	3.900
2	KSM 90 W-B	2,862	28,1	9,5	2,5	4.600
3	KSM 90 W-C	2,732	32,6	12,5	2,2	6.300
4	EF W-D	2,703	31,1	14,0	1,7	3.600
5	KSM 20 W-B	2,907	34,8	14,5	2,1	9.450
6	KSM 63 W-B	2,876	28,9	10,0	2,4	4.800
7	DBM W-E	2,861	30,4	17,0	1,9	2.100
Durchschnittswert		2,812	31,1	12,6	2,1	4.964

¹⁾ Die Ermittlung des Wertes ΔEP_{RuK} erfolgte in Anlehnung an die Technischen Prüfverfahren für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TP Gestein 2016) unter Verwendung des Ausgangsbitumens B 160/220

Bemerkungen zu den Sieblinien:

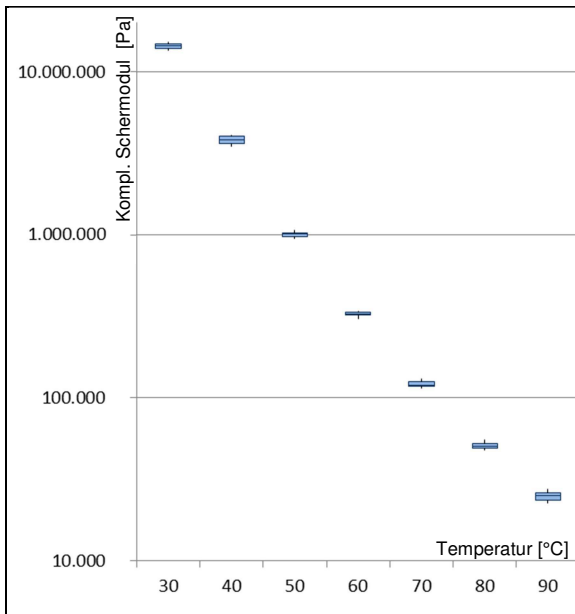
Die Füller Nr. 3 und Nr. 5 unterscheiden sich auf den ersten Blick nicht wesentlich, trotz unterschiedlicher deklarerter Mahlfeinheiten. Der Eigenfüller Nr. 4 reiht sich bzgl. Sieblinie und Korngrößenverteilung sehr gut in die Fremdfüller Nr. 1, Nr. 2, Nr. 6 ein. Füller Nr. 7 weist die höchsten Anteile von größeren Partikeln auf, liegt jedoch noch innerhalb der Anforderungen an Füller nach TL Gestein. Die Angabe der einzelnen Kornfraktionen bei nachstehenden Sieblinien ist bei den im Luftstrahlverfahren nach DIN EN 933 Teil 10 ermittelten Anteilen in Massen-% und bei den lasergranulometrisch ermittelten Anteilen verfahrensgemäß in Volumen-% angegeben. Aufgrund unterstellter Homogenität ergibt sich jedoch dadurch keine signifikante Verzerrung der Analyseergebnisse. Beide Verfahren führen zu vergleichbaren Ergebnissen.



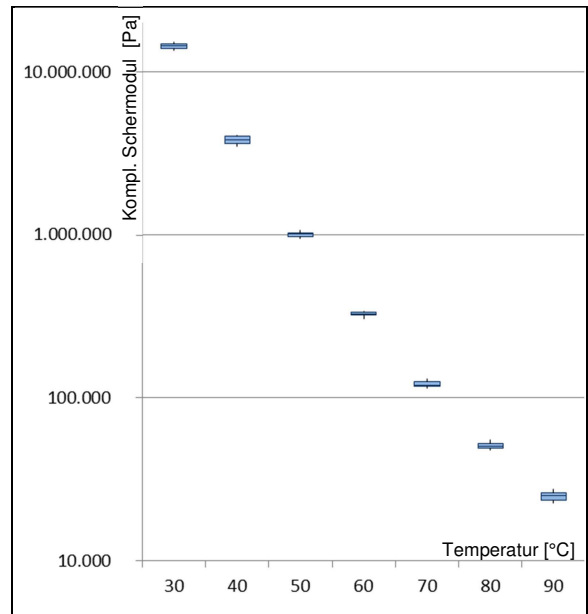
Anhang 4

**Zusammenstellung
der box-whisker-plots**

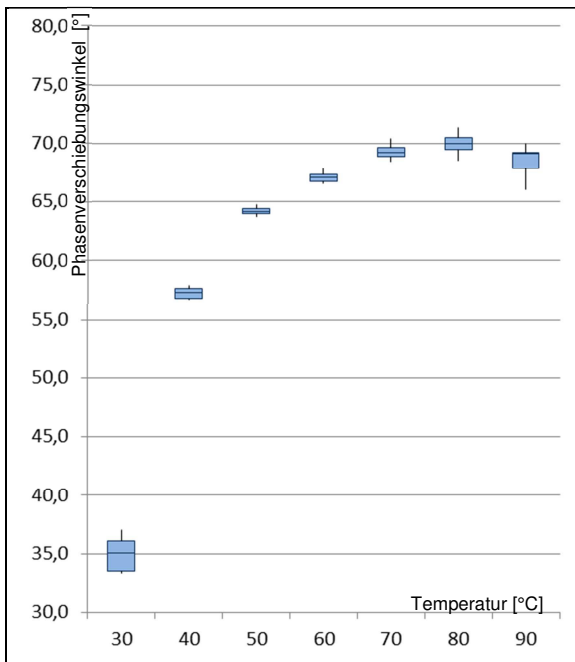
Anhang 4 Zusammenstellung der box-whisker-plots



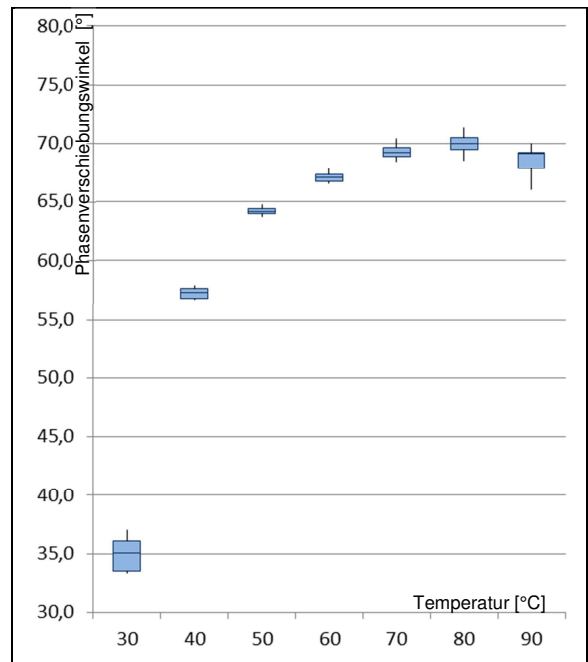
Plot 1-1A
box-whisker-plots
Strecke 8 (P1-2, P2-1, P5-1, P4-11)
 G^* vor Ausreißerbereinigung



Plot 1-1B
box-whisker-plots
Strecke 8 (P1-2, P2-1, P5-1, P4-11)
 G^* nach Ausreißerbereinigung

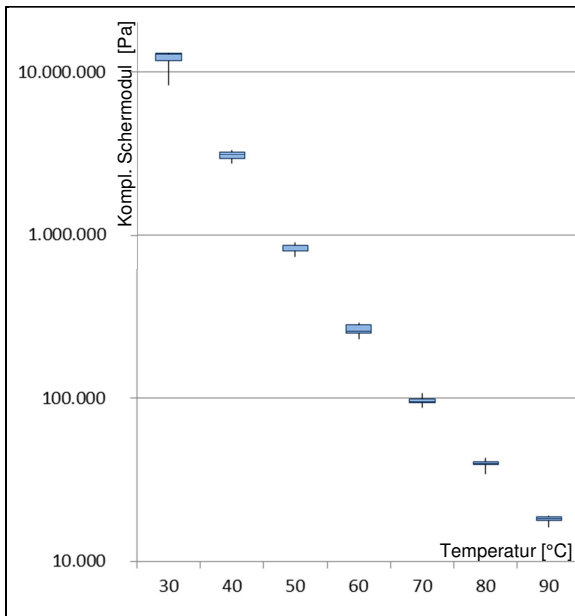


Plot 1-1C
box-whisker-plots
Strecke 8 (P1-2, P2-1, P5-1, P4-11)
 δ vor Ausreißerbereinigung

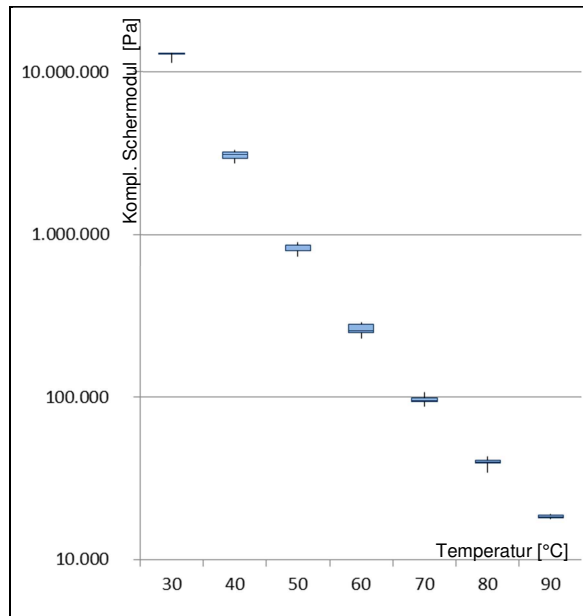


Plot 1-1D
box-whisker-plots
Strecke 8 (P1-2, P2-1, P5-1, P4-11)
 δ nach Ausreißerbereinigung

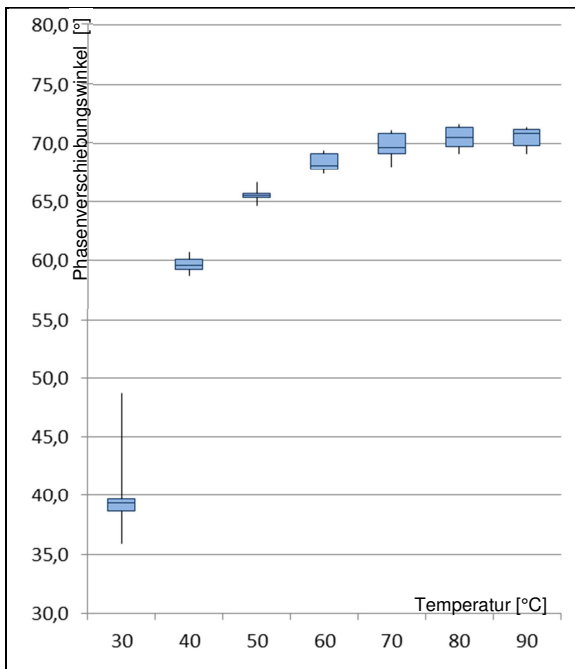
Anhang 4 Ergebnisse der Varianten („box-whisker-plots“)



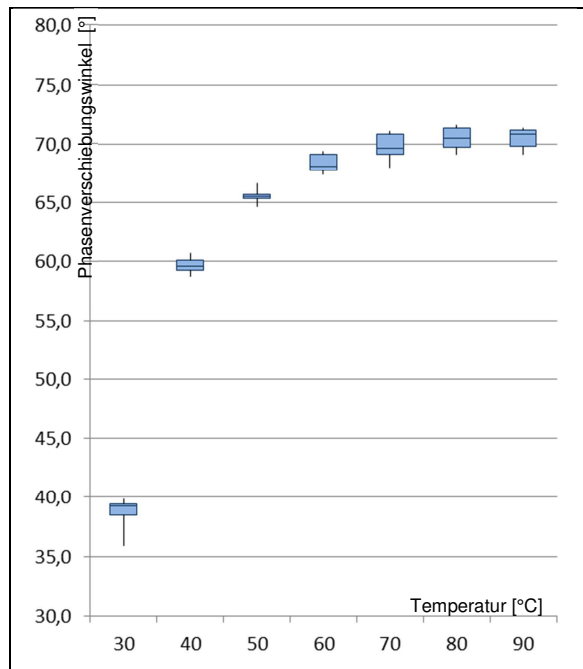
Plot 1-2A
box-whisker-plots
Strecke 9 (P1-5)
 G^* vor Ausreißerbereinigung



Plot 1-2B
box-whisker-plots
Strecke 9 (P1-5)
 G^* nach Ausreißerbereinigung

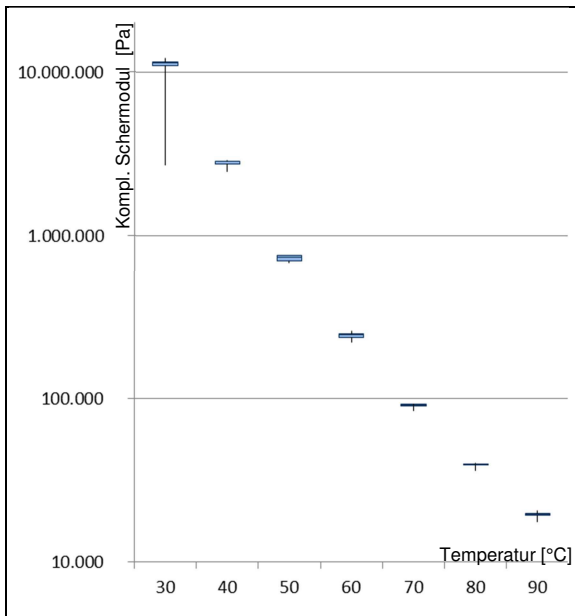


Plot 1-2C
box-whisker-plots
Strecke 9 (P1-5)
 δ vor Ausreißerbereinigung

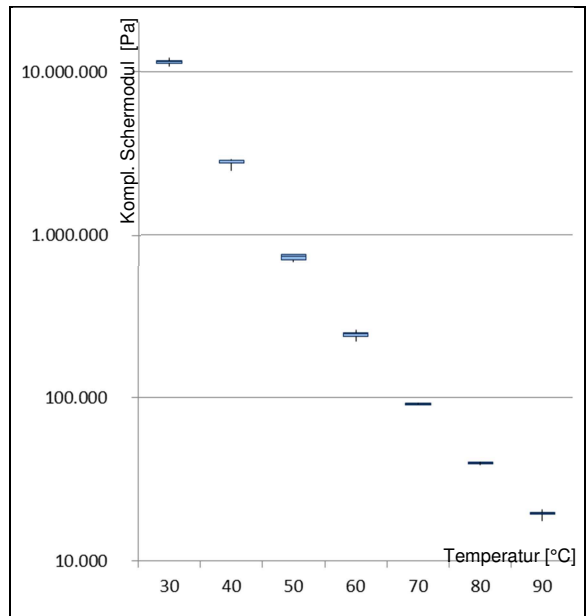


Plot 1-2D
box-whisker-plots
Strecke 9 (P1-5)
 δ nach Ausreißerbereinigung

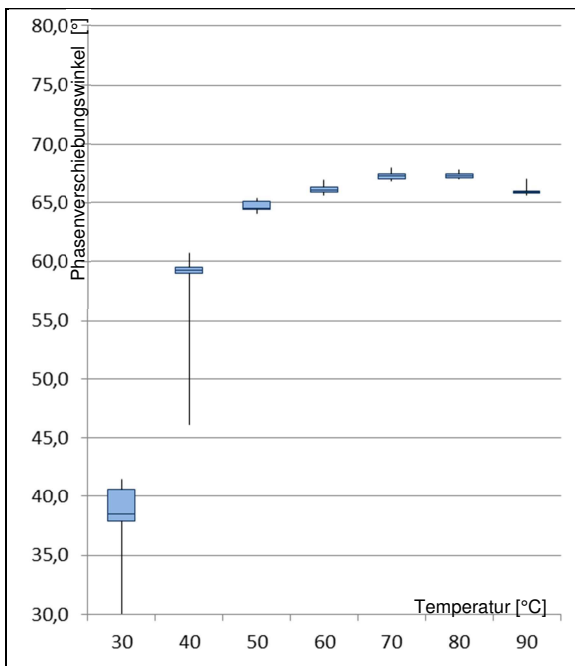
Anhang 4 Ergebnisse der Varianten („box-whisker-plots“)



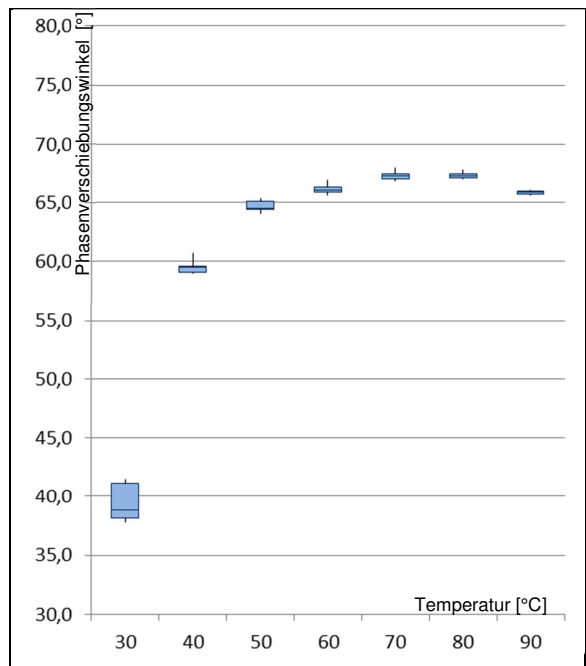
Plot 1-3A
box-whisker-plots
Strecke 11 (P4-23)
 G^* vor Ausreißerbereinigung



Plot 1-3B
box-whisker-plots
Strecke 11 (P4-23)
 G^* nach Ausreißerbereinigung

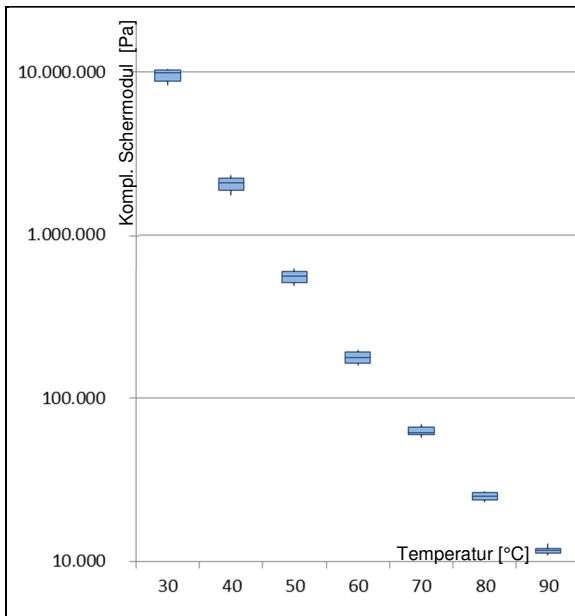


Plot 1-3C
box-whisker-plots
Strecke 11 (P4-23)
 δ vor Ausreißerbereinigung

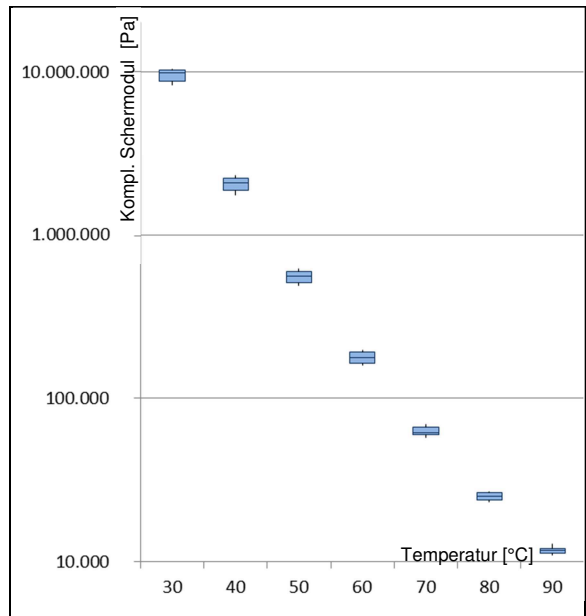


Plot 1-3D
box-whisker-plots
Strecke 11 (P4-23)
 δ nach Ausreißerbereinigung

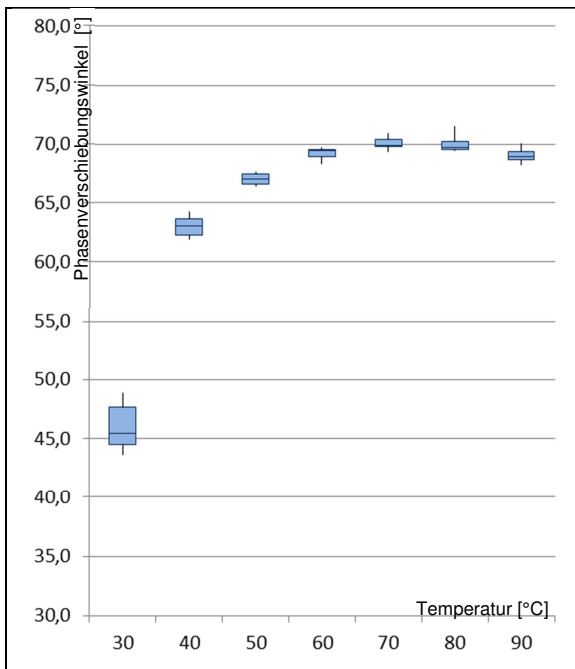
Anhang 4 Ergebnisse der Varianten („box-whisker-plots“)



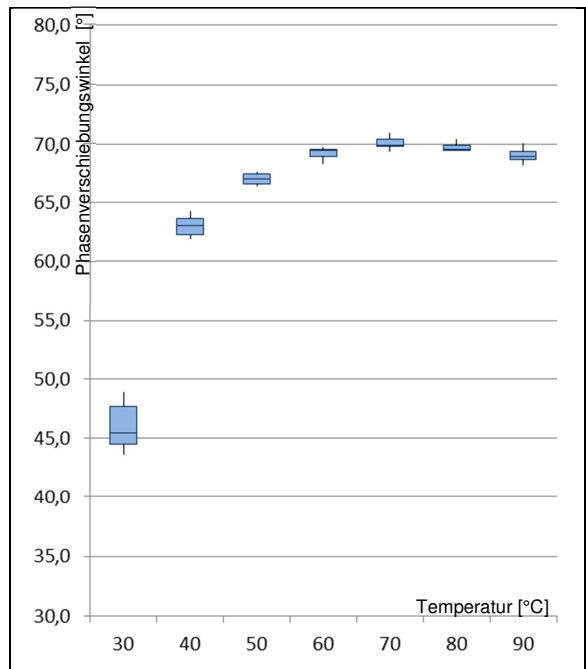
Plot 1-4A
box-whisker-plots
Strecke 12 (P1-3)
 G^* vor Ausreißerbereinigung



Plot 1-4B
Strecke 12 (P1-3)
Strecke 8 (P1-2, P2-1, P5-1, P4-11)
 G^* nach Ausreißerbereinigung

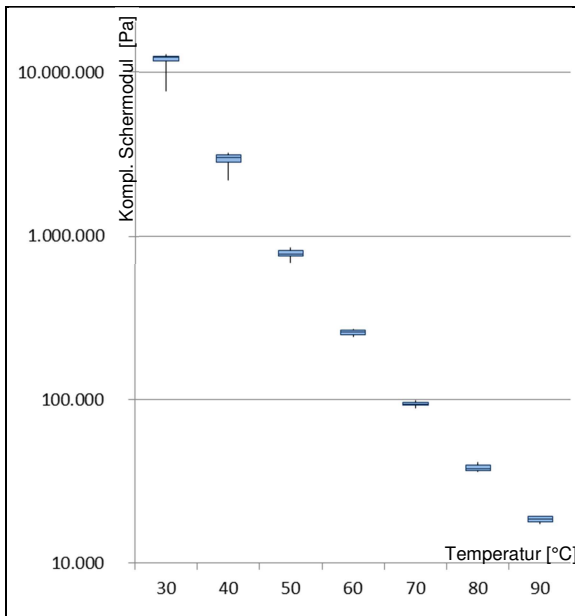


Plot 1-4C
box-whisker-plots
Strecke 12 (P1-3)
 δ vor Ausreißerbereinigung

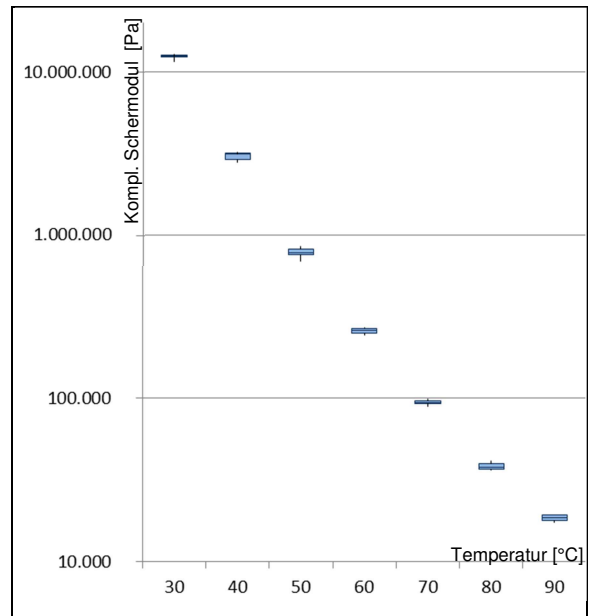


Plot 1-4D
box-whisker-plots
Strecke 12 (P1-3)
 δ nach Ausreißerbereinigung

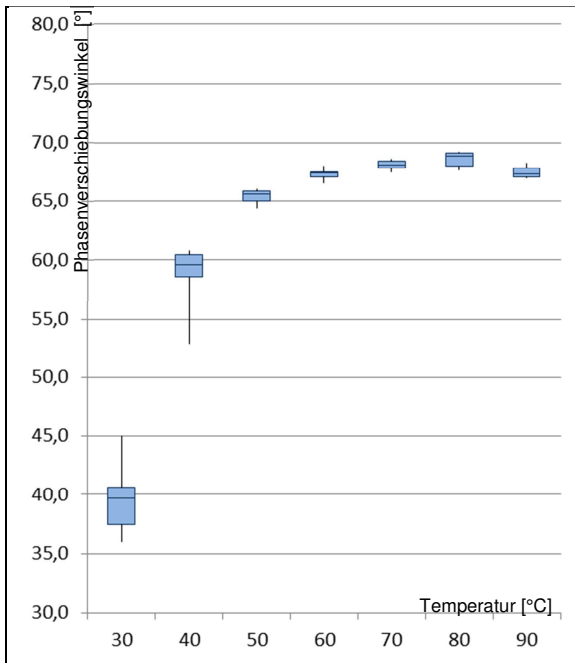
Anhang 4 Ergebnisse der Varianten („box-whisker-plots“)



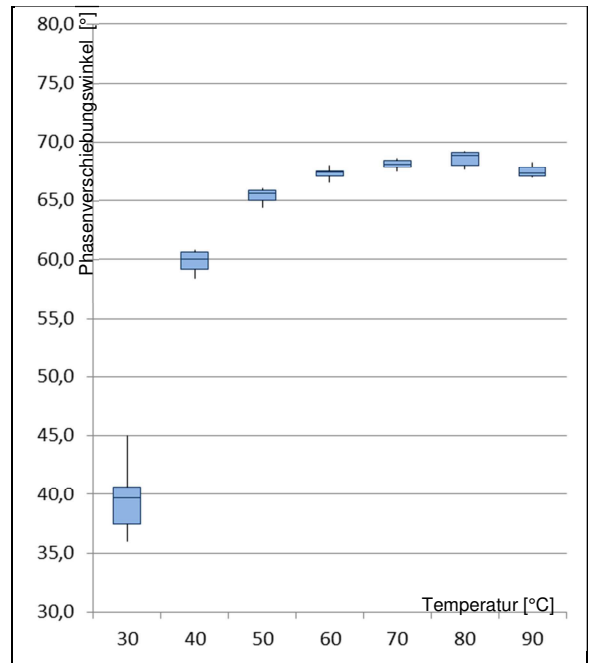
Plot 1-5A
box-whisker-plots
Strecke 13 (P6-1)
 G^* vor Ausreißerbereinigung



Plot 1-5B
box-whisker-plots
Strecke 13 (P6-1)
 G^* nach Ausreißerbereinigung



Plot 1-5C
box-whisker-plots
Strecke 13 (P6-1)
 δ vor Ausreißerbereinigung



Plot 1-5D
box-whisker-plots
Strecke 13 (P6-1)
 δ nach Ausreißerbereinigung

Anhang 5

**Zusammenstellung
der ausreißerbereinigten Datensätze**

Anhang 5 Zusammenstellung der ausreißerbereinigten Datensätze

Zusammenstellung aller Daten aus den geprüften Varianten

nach Ausreisserprüfung

Definition eines Ausreissers: Abweichung vom Mittelwert über n-fache Standardabweichung mit n= 2,00

n= 1,66

Bereinigte Datensätze

Strecke 8 P1-2 P2-1 P5-1 P4-11	DSR: komplexer Schermodul							DSR: Phasenverschiebungswinkel						
	30	40	50	60	70	80	90	30	40	50	60	70	80	90
	14.829.000	4.119.380	1067.090	336.215	129.945	53.099	25.319	33,3	56,7	64,5	67,8	70,4	71,4	70,0
14.288.200	3.740.660	1002.138	320.761	116.776	50.055	23.101	36,1	57,7	64,3	67,4	69,6	70,1	69,2	
15.324.700	4.106.150	1030.510	331.688	120.984	49.417	24.548	33,3	57,0	64,8	67,1	69,0	69,4	67,5	
14.721.000	3.935.870	1023.100	327.180	126.954	55.423	27.469	34,2	56,7	63,7	66,5	68,4	68,5	66,1	
13.653.300	3.605.230	967.960	319.289	118.732	51.943	26.509	35,8	57,5	64,0	67,0	69,7	70,7	69,1	
13.763.500	3.501.580	942.425	303.821	114.826	47.980	22.416	37,0	57,9	63,9	66,6	68,8	69,9	69,2	
bereinigter Durchschnitt														
14.429.950	3.834.812	1005.537	323.159	121.370	51.320	24.894	35,0	57,3	64,2	67,1	69,3	70,0	68,5	
n-fache StAbw	1.186.581	474.294	82.169	20.882	10.824	4.951	3.549	2,9	0,9	0,7	0,9	1,3	1,8	2,7
Grenzwert unten	13.243.369	3.360.518	923.368	302.277	110.545	46.369	21.345	32,1	56,3	63,5	66,2	68,0	68,2	65,9
Grenzwert oben	15.616.531	4.309.106	1087.706	344.041	132.194	56.270	28.443	37,9	58,2	64,9	68,0	70,6	71,8	71,2
Variationskoeffizient	0,04	0,06	0,04	0,03	0,04	0,05	0,07	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
Standardabw.	593.291	237.147	41084	10.441	5.412	2.475	1.775	1,4	0,5	0,3	0,4	0,7	0,9	1,3

Strecke 9 P1-5	DSR: komplexer Schermodul							DSR: Phasenverschiebungswinkel						
	30	40	50	60	70	80	90	30	40	50	60	70	80	90
	12.932.300	3.123.700	800.921	252.817	94.336	39.378	18.266	39,3	60,7	66,7	69,4	71,1	71,6	71,3
11.420.200	2.742.860	736.101	228.402	93.457	38.910	18.778	39,8	60,3	65,5	67,7	69,1	69,5	69,5	
	2.840.910	896.617	287.246	99.775	39.631	17.770		59,2	65,6	68,4	70,0	70,8	70,7	
12.850.050	3.332.360	891.211	286.672	107.441	42.800	18.920	39,4	59,4	65,7	69,4	71,1	71,6	71,4	
12.814.300	3.114.400	803.722	257.913	88.118	34.423		38,5	59,7	65,3	67,4	68,0	69,1	69,1	
13.030.300	3.289.020	801.620	246.280	97.092	40.970	18.130	35,9	58,7	64,7	67,9	69,2	70,2	71,0	
bereinigter Durchschnitt														
12.609.430	3.073.875	821.699	259.888	96.703	39.352	18.373	38,6	59,7	65,6	68,4	69,8	70,5	70,5	
n-fache StAbw	1.198.504	432.874	112.338	42.397	11.965	5.104	847	2,8	1,3	1,2	1,5	2,2	1,9	1,8
Grenzwert unten	11.410.926	2.641.001	709.361	217.491	84.738	34.248	17.525	35,8	58,3	64,4	66,8	67,5	68,6	68,7
Grenzwert oben	13.807.934	3.506.749	934.037	302.286	108.668	44.456	19.220	41,4	61,0	66,7	69,9	72,0	72,4	72,2
Variationskoeffizient	0,05	0,07	0,07	0,08	0,06	0,06	0,02	0,04	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
Standardabw.	599.252	216.437	56.169	21.199	5.982	2.552	424	1,4	0,7	0,6	0,8	1,1	1,0	0,9

Strecke 11 P4-23	DSR: komplexer Schermodul							DSR: Phasenverschiebungswinkel						
	30	40	50	60	70	80	90	30	40	50	60	70	80	90
	11.526.900	2.905.990	757.764	250.167	91.953	39.689	20.667	37,8	59,5	65,3	66,9	68,0	67,8	65,6
	2.474.611	680.564	221.458			17.583			64,1	65,8	66,9	67,1	66,0	
12.238.900	2.762.370	690.642	236.313	90.334	38.853	19.423	41,2	60,8	65,3	66,4	67,5	67,4	65,9	
11.701.900	2.862.800	742.730	247.238	91.448	39.150	19.094	38,9	59,0	64,5	66,1	67,2	67,3		
10.820.000	2.736.840	739.732	240.476	90.895	39.544	19.849	38,2	59,0	64,4	66,0	66,9	67,1	65,7	
11.267.240	2.744.950	757.435	259.916	92.618	40.265	19.390	41,5	59,5	64,5	65,6	67,2	67,0	65,9	
bereinigter Durchschnitt														
11.510.988	2.747.927	728.145	242.595	91.450	39.500	19.334	39,5	59,6	64,7	66,1	67,3	67,3	65,8	
n-fache StAbw	939.546	274.738	61.928	24.078	1.593	965	1.858	3,1	1,3	0,9	0,8	0,8	0,5	0,3
Grenzwert unten	10.571.442	2.473.188	666.217	218.517	89.857	38.535	17.477	36,4	58,3	63,8	65,3	66,5	66,8	65,6
Grenzwert oben	12.450.534	3.022.665	790.072	266.673	93.042	40.465	21.192	42,6	60,8	65,6	67,0	68,1	67,8	66,1
Variationskoeffizient	0,04	0,05	0,04	0,05	0,01	0,01	0,05	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
Standardabw.	469.773	137.369	30.964	12.039	796	482	929	1,5	0,6	0,5	0,4	0,4	0,3	0,1

Strecke 12 P1-3	DSR: komplexer Schermodul							DSR: Phasenverschiebungswinkel						
	30	40	50	60	70	80	90	30	40	50	60	70	80	90
	8.381.450	1.754.360	502.061	161.990	59.651	23.384	11.238	48,9	64,2	67,6	69,7	70,0	69,5	68,3
9.928.600	2.117.600	574.428	181.482	61.304	25.780	11.824	45,6	62,6	66,4	68,4	69,8	69,5	68,8	
8.438.960	1.830.960	492.385	159.141	57.987	23.255	10.910	48,4	63,7	67,3	69,3	69,8	69,6	69,2	
9.850.000	2.037.980	541.280	170.594	62.758	24.582	11.551	45,2	63,4	67,5	69,6	70,6		70,1	
10.387.700	2.271.880	608.831	193.033	69.432	26.815	12.031	44,3	62,1	66,7	69,6	70,9	70,4	69,4	
10.451.100	2.295.930	623.696	195.535	68.022	26.716	12.833	43,6	61,9	66,5	68,8	69,4	69,9	68,7	
bereinigter Durchschnitt														
	9.572.968	2.051.452	557.114	176.963	63.192	25.089	11.731	46,0	63,0	67,0	69,2	70,1	69,8	69,1
n-fache StAbw	1.701.727	408.081	99.596	28.354	8.392	2.902	1.228	4,0	1,7	1,0	1,0	1,0	0,7	1,2
Grenzwert unten	7.871.241	1.643.370	457.518	148.608	54.800	22.187	10.503	42,0	61,3	66,0	68,3	69,1	69,1	67,9
Grenzwert oben	11.274.696	2.459.533	656.709	205.317	71.585	27.991	12.959	50,0	64,7	68,0	70,2	71,1	70,5	70,2
Variationskoeffizient	0,09	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
Standardabw.	850.864	204.041	49.798	14.177	4.196	1.451	614	2,0	0,8	0,5	0,5	0,5	0,3	0,6

Strecke 13 P6-1	DSR: komplexer Schermodul							DSR: Phasenverschiebungswinkel						
	30	40	50	60	70	80	90	30	40	50	60	70	80	90
	11.572.500	2.791.420	760.229	242.753	92.688	36.386	18.157	40,6	60,6	66,0	68,0	68,5	69,2	68,3
12.924.800	3.148.720	797.989	268.724	96.337	38.547	19.278	38,7	60,0	65,9	67,4	68,3	69,1	67,3	
		693.139	255.814	92.674	36.713	17.823	45,0		64,4	67,5	67,9	68,7	67,3	
12.535.700	2.889.550	753.508	246.443	89.330	36.615	17.275	40,6	60,8	65,8	67,0	68,6	69,1	68,0	
12.382.400	3.162.260	854.724	270.229	99.601	39.977	18.833	37,1	59,2	65,4	67,4	67,8	67,7	67,0	
12.611.300	3.235.410	824.417	257.939	97.271	41.055	19.290	36,0	58,4	64,9	66,6	67,5	67,8	67,0	
bereinigter Durchschnitt														
	12.405.340	3.045.472	780.668	256.984	94.650	38.216	18.443	39,7	59,8	65,4	67,3	68,1	68,6	67,5
n-fache StAbw	904.832	345.520	104.929	20.480	6.845	3.600	1.505	5,8	1,8	1,2	0,9	0,8	1,2	1,0
Grenzwert unten	11.500.508	2.699.952	675.739	236.503	87.805	34.615	16.938	33,8	58,0	64,2	66,4	67,3	67,4	66,5
Grenzwert oben	13.310.172	3.390.992	885.596	277.464	101.495	41.816	19.948	45,5	61,6	66,6	68,2	68,9	69,8	68,5
Variationskoeffizient	0,04	0,06	0,07	0,04	0,04	0,05	0,04	0,07	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Standardabw.	452.416	172.760	52.464	10.240	3.423	1.800	752	2,9	0,9	0,6	0,4	0,4	0,6	0,5

P1-4	DSR: komplexer Schermodul							DSR: Phasenverschiebungswinkel						
	30	40	50	60	70	80	90	30	40	50	60	70	80	90
	10.365.200	2.240.680	586.915	183.466	67.469	28.931	14.470	43,7	61,8	66,4	68,7	69,8	69,1	66,6
10.182.200	2.327.530	627.797	195.553	70.864	28.560	14.030	43,8	61,5	66,2	68,6	69,6	69,7	68,3	
bereinigter Durchschnitt														
	10.273.700	2.284.105	607.356	189.510	69.167	28.746	14.250	43,8	61,7	66,3	68,7	69,7	69,4	67,5
n-fache StAbw	183.000	86.850	40.882	12.087	3.395	371	440	0,1	0,3	0,2	0,1	0,2	0,6	1,7
Grenzwert unten	10.090.700	2.197.255	566.474	177.423	65.772	28.375	13.810	43,7	61,4	66,1	68,6	69,5	68,8	65,8
Grenzwert oben	10.456.700	2.370.955	648.238	201.597	72.562	29.117	14.690	43,9	62,0	66,5	68,8	69,9	70,0	69,2
Variationskoeffizient	0,01	0,02	0,03	0,03	0,02	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Standardabw.	91.500	43.425	20.441	6.044	1.698	186	220	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,9

P4-51	DSR: komplexer Schermodul							DSR: Phasenverschiebungswinkel						
	30	40	50	60	70	80	90	30	40	50	60	70	80	90
	10.924.800	2.500.980	655.228	231.489	83.795	35.250	18.434	43,3	60,2	64,5	65,8	67,4	67,8	66,3
12.100.100	2.951.900	812.392	269.253	102.220	44.546	23.593	40,3	59,4	64,3	66,0	67,3	67,2	65,4	
Aufgrund der Überschreitung der Grenze des Variationskoeffizienten Einschränkung bei der Beurteilung von Verformungsbeständigkeit und Verdichtbarkeit														
bereinigter Durchschnitt														
	115.12.450	2.726.440	733.810	250.371	93.008	39.898	21.014	41,8	59,8	64,4	65,9	67,4	67,5	65,9
n-fache StAbw	1.175.300	450.920	157.164	37.764	18.425	9.296	5.159	3,0	0,8	0,2	0,2	0,1	0,6	0,9
Grenzwert unten	10.337.150	2.275.520	576.646	212.607	74.583	30.602	15.855	38,8	59,0	64,2	65,7	67,3	66,9	65,0
Grenzwert oben	12.687.750	3.177.360	890.974	288.135	111.433	49.194	26.173	44,8	60,6	64,6	66,1	67,5	68,1	66,8
Variationskoeffizient	0,05	0,08	0,11	0,08	0,10	0,12	0,12	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Standardabw.	587.650	225.460	78.582	18.882	9.213	4.648	2.580	1,5	0,4	0,1	0,1	0,1	0,3	0,4
P4-44	DSR: komplexer Schermodul							DSR: Phasenverschiebungswinkel						
	30	40	50	60	70	80	90	30	40	50	60	70	80	90
	16.018.800	4.105.430	1.007.126	328.849	123.037	51.920	26.157	34,3	56,7	63,8	65,4	66,8	67,3	66,7
16.161.400	4.164.260	1.045.760	336.111	129.396	55.274	27.342	32,5	56,4	63,9	66,1	67,3	67,9	66,9	
bereinigter Durchschnitt														
	16.090.100	4.134.845	1.026.443	332.480	126.217	53.597	26.750	33,4	56,6	63,9	65,8	67,1	67,6	66,8
n-fache StAbw	142.600	58.830	38.634	7.262	6.359	3.354	1.185	1,8	0,3	0,1	0,7	0,5	0,6	0,2
Grenzwert unten	15.947.500	4.076.015	987.809	325.218	119.858	50.243	25.565	31,6	56,3	63,8	65,1	66,6	67,0	66,6
Grenzwert oben	16.232.700	4.193.675	1.065.077	339.742	132.576	56.951	27.935	35,2	56,9	64,0	66,5	67,6	68,2	67,0
Variationskoeffizient	0,00	0,01	0,02	0,01	0,03	0,03	0,02	0,03	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Standardabw.	71.300	29.415	19.317	3.631	3.180	1.677	593	0,9	0,2	0,1	0,3	0,3	0,3	0,1
P4-43	DSR: komplexer Schermodul							DSR: Phasenverschiebungswinkel						
	30	40	50	60	70	80	90	30	40	50	60	70	80	90
	12.767.800	2.951.900	777.609	251.665	97.279	43.028	24.189	39,3	59,5	64,8	67,1	68,6	68,7	66,3
11.815.900	2.778.780	721.359	231.424	94.999	41.680	22.302	42,6	60,5	64,5	66,4	67,6	67,7	66,5	
bereinigter Durchschnitt														
	12.291.850	2.865.340	749.484	241.545	96.139	42.354	23.246	41,0	60,0	64,7	66,8	68,1	68,2	66,4
n-fache StAbw	951.900	173.120	56.250	20.241	2.280	1.348	1.887	3,3	1,0	0,3	0,7	1,0	1,0	0,2
Grenzwert unten	11.339.950	2.692.220	693.234	221.304	93.859	41.006	21.359	37,7	59,0	64,4	66,1	67,1	67,2	66,2
Grenzwert oben	13.243.750	3.038.460	805.734	261.786	98.419	43.702	25.133	44,3	61,0	65,0	67,5	69,1	69,2	66,6
Variationskoeffizient	0,04	0,03	0,04	0,04	0,01	0,02	0,04	0,04	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00
Standardabw.	475.950	86.560	28.125	10.121	1.140	674	944	1,7	0,5	0,1	0,3	0,5	0,5	0,1
P4-42	DSR: komplexer Schermodul							DSR: Phasenverschiebungswinkel						
	30	40	50	60	70	80	90	30	40	50	60	70	80	90
	13.225.100	3.343.430	910.825	305.209	116.378	47.251	24.715	37,6	59,0	65,2	67,1	68,1	67,6	65,7
12.630.700	3.001.610	793.937	255.197	95.238	40.983	20.987	40,0	59,8	64,5	66,7	68,0	68,1	66,4	
bereinigter Durchschnitt														
	12.927.900	3.172.520	852.381	280.203	105.808	44.117	22.851	38,8	59,4	64,9	66,9	68,1	67,9	66,1
n-fache StAbw	594.400	341.820	116.888	50.012	21.140	6.268	3.728	2,4	0,8	0,7	0,4	0,1	0,5	0,7
Grenzwert unten	12.333.500	2.830.700	735.493	230.191	84.668	37.849	19.123	36,4	58,6	64,2	66,5	68,0	67,4	65,4
Grenzwert oben	13.522.300	3.514.340	969.269	330.215	126.948	50.385	26.579	41,2	60,2	65,6	67,3	68,2	68,4	66,8
Variationskoeffizient	0,02	0,05	0,07	0,09	0,10	0,07	0,08	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01
Standardabw.	297.200	170.910	58.444	25.006	10.570	3.134	1.864	1,2	0,4	0,4	0,2	0,0	0,3	0,4

P4-41	DSR: komplexer Schermodul							DSR: Phasenverschiebungswinkel						
	30	40	50	60	70	80	90	30	40	50	60	70	80	90
	13.689.200	3.284.110	841050	277.592	102.837	44.323	24.434	37,3	58,2	64,1	66,0	67,9	67,8	65,0
11.739.600	2.779.120	754.620	243.590	94.340	42.585	22.185	41,7	60,2	64,8	66,7	68,1	68,6	66,3	
Aufgrund der Überschreitung der Grenze des Variationskoeffizienten Einschränkung bei der Beurteilung von Ermüdungsresistenz														
bereinigter Durchschnitt														
	12.714.400	3.031.615	797.835	260.591	98.589	43.454	23.310	39,5	59,2	64,5	66,4	68,0	68,2	65,7
n-fache StAbw	1.949.600	504.990	86.430	34.002	8.497	1.738	2.249	4,4	2,0	0,7	0,7	0,2	0,8	1,3
Grenzwert unten	10.764.800	2.526.625	711.405	226.589	90.092	41.716	21.061	35,1	57,2	63,8	65,7	67,8	67,4	64,4
Grenzwert oben	14.664.000	3.536.605	884.265	294.593	107.086	45.192	25.559	43,9	61,2	65,2	67,1	68,2	69,0	67,0
Variationskoeffizient	0,08	0,08	0,05	0,07	0,04	0,02	0,05	0,06	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01
Standardabw.	974.800	252.495	43.215	17.001	4.249	869	1.125	2,2	1,0	0,4	0,4	0,1	0,4	0,6
P4-34	DSR: komplexer Schermodul							DSR: Phasenverschiebungswinkel						
	30	40	50	60	70	80	90	30	40	50	60	70	80	90
	10.638.100	2.463.030	690.294	230.980	89.504	39.922	20.259	43,6	61,3	64,9	65,4	65,8	65,2	64,2
10.859.800	2.528.950	697.722	236.577	84.849	38.054	20.064	42,5	60,8	64,4	64,7	66,4	66,1	64,8	
bereinigter Durchschnitt														
	10.748.950	2.495.990	694.008	233.779	87.177	38.988	20.162	43,1	61,1	64,7	65,1	66,1	65,7	64,5
n-fache StAbw	221.700	65.920	7.428	5.597	4.655	1.868	195	1,1	0,5	0,5	0,7	0,6	0,9	0,6
Grenzwert unten	10.527.250	2.430.070	686.580	228.182	82.522	37.120	19.967	42,0	60,6	64,2	64,4	65,5	64,8	63,9
Grenzwert oben	10.970.650	2.561.910	701.436	239.376	91.832	40.856	20.357	44,2	61,6	65,2	65,8	66,7	66,6	65,1
Variationskoeffizient	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00
Standardabw.	110.850	32.960	3.714	2.799	2.328	934	98	0,6	0,3	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3
P4-33	DSR: komplexer Schermodul							DSR: Phasenverschiebungswinkel						
	30	40	50	60	70	80	90	30	40	50	60	70	80	90
	8.917.150	1.876.270	501.263	167.072	71.618	31.839	17.039	45,1	61,3	65,3	66,3	67,1	66,7	65,1
10.260.100	2.306.180	621.259	218.624	81.624	35.433	18.235	43,6	60,3	63,7	64,9	65,7	66,3	65,1	
bereinigter Durchschnitt														
	9.588.625	2.091.225	561.261	192.848	76.621	33.636	17.637	44,4	60,8	64,5	65,6	66,4	66,5	65,1
n-fache StAbw	1.342.950	429.910	119.996	51.552	10.006	3.594	1.196	1,5	1,0	1,6	1,4	1,4	0,4	0,0
Grenzwert unten	8.245.675	1.661.315	441.265	141.296	66.615	30.042	16.441	42,9	59,8	62,9	64,2	65,0	66,1	65,1
Grenzwert oben	10.931.575	2.521.135	681.257	244.400	86.627	37.230	18.833	45,9	61,8	66,1	67,0	67,8	66,9	65,1
Variationskoeffizient	0,07	0,10	0,11	0,13	0,07	0,05	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
Standardabw.	671.475	214.955	59.998	25.776	5.003	1.797	598	0,8	0,5	0,8	0,7	0,7	0,2	0,0
P4-32	DSR: komplexer Schermodul							DSR: Phasenverschiebungswinkel						
	30	40	50	60	70	80	90	30	40	50	60	70	80	90
	11.468.000	2.547.090	650.406	223.948	84.491	36.504	19.630	40,4	60,4	65,7	66,6	67,4	66,9	65,3
11.297.600	2.605.790	697.704	232.406	88.030	37.800	19.435	42,4	61,0	64,9	65,7	66,5	66,4	64,7	
bereinigter Durchschnitt														
	11.382.800	2.576.440	674.055	228.177	86.261	37.152	19.533	41,4	60,7	65,3	66,2	67,0	66,7	65,0
n-fache StAbw	170.400	58.700	47.298	8.458	3.539	1.296	195	2,0	0,6	0,8	0,9	0,9	0,5	0,6
Grenzwert unten	11.212.400	2.517.740	626.757	219.719	82.722	35.856	19.338	39,4	60,1	64,5	65,3	66,1	66,2	64,4
Grenzwert oben	11.553.200	2.635.140	721.353	236.635	89.800	38.448	19.728	43,4	61,3	66,1	67,1	67,9	67,2	65,6
Variationskoeffizient	0,01	0,01	0,04	0,02	0,02	0,02	0,00	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
Standardabw.	85.200	29.350	23.649	4.229	1.770	648	98	1,0	0,3	0,4	0,4	0,5	0,3	0,3

P4-31	DSR: komplexer Schermodul							DSR: Phasenverschiebungswinkel						
	30	40	50	60	70	80	90	30	40	50	60	70	80	90
	12.137.200	2.842.760	761.819	256.374	96.274	42.418	21.833	40,0	59,8	64,7	66,5	67,5	67,1	65,1
10.114.340	2.299.920	609.189	206.198	77.045	32.569	17.208	42,5	60,2	64,3	65,2	66,2	66,3	64,0	
Aufgrund der Überschreitung der Grenze des Variationskoeffizienten Einschränkung bei der Beurteilung von Verformungsbeständigkeit und Verdichtbarkeit														
bereinigter Durchschnitt														
	11.125.770	2.571.340	685.504	231.286	86.660	37.494	19.521	41,3	60,0	64,5	65,9	66,9	66,7	64,6
n-fache StAbw	2.022.860	542.840	152.630	50.176	19.229	9.849	4.625	2,5	0,4	0,4	1,3	1,3	0,8	1,1
Grenzwert unten	9.102.910	2.028.500	532.874	181.110	67.431	27.645	14.896	38,8	59,6	64,1	64,6	65,6	65,9	63,5
Grenzwert oben	13.148.630	3.114.180	838.134	281.462	105.889	47.343	24.146	43,8	60,4	64,9	67,2	68,2	67,5	65,7
Variationskoeffizient	0,09	0,11	0,11	0,11	0,11	0,13	0,12	0,03	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
Standardabw.	1.011.430	271.420	76.315	25.088	9.615	4.925	2.313	1,3	0,2	0,2	0,6	0,6	0,4	0,5
P4-24	DSR: komplexer Schermodul							DSR: Phasenverschiebungswinkel						
	30	40	50	60	70	80	90	30	40	50	60	70	80	90
	14.620.000	3.552.120	899.698	295.949	107.810	46.301	23.377	36,9	58,9	64,3	65,5	67,4	67,6	66,8
14.433.900	3.351.410	841.722	273.979	115.187	49.556	25.268	36,4	59,2	65,5	66,7	67,4	67,5	66,2	
bereinigter Durchschnitt														
	14.526.950	3.451.765	870.710	284.964	111.499	47.929	24.323	36,7	59,1	64,9	66,1	67,4	67,6	66,5
n-fache StAbw	186.100	200.710	57.976	21.970	7.377	3.255	1.891	0,5	0,3	1,2	1,2	0,0	0,1	0,6
Grenzwert unten	14.340.850	3.251.055	812.734	262.994	104.122	44.674	22.432	36,2	58,8	63,7	64,9	67,4	67,5	65,9
Grenzwert oben	14.713.050	3.652.475	928.686	306.934	118.876	51.184	26.214	37,2	59,4	66,1	67,3	67,4	67,7	67,1
Variationskoeffizient	0,01	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
Standardabw.	93.050	100.355	28.988	10.985	3.689	1.628	946	0,3	0,2	0,6	0,6	0,0	0,0	0,3
P4-22	DSR: komplexer Schermodul							DSR: Phasenverschiebungswinkel						
	30	40	50	60	70	80	90	30	40	50	60	70	80	90
	13.914.000	3.235.880	812.881	263.913	103.610	44.023	22.307	38,7	59,6	65,5	67,0	67,8	68,0	66,7
14.343.100	3.561.000	922.877	300.177	120.761	51.556	27.132	36,4	58,8	65,1	67,2	68,2	68,6	67,1	
bereinigter Durchschnitt														
	14.128.550	3.398.440	867.879	282.045	112.186	47.790	24.720	37,6	59,2	65,3	67,1	68,0	68,3	66,9
n-fache StAbw	429.100	325.120	109.996	36.264	17.151	7.533	4.825	2,3	0,8	0,4	0,2	0,4	0,6	0,4
Grenzwert unten	13.699.450	3.073.320	757.883	245.781	95.035	40.257	19.895	35,3	58,4	64,9	66,9	67,6	67,7	66,5
Grenzwert oben	14.557.650	3.723.560	977.875	318.309	129.337	55.323	29.545	39,9	60,0	65,7	67,3	68,4	68,9	67,3
Variationskoeffizient	0,02	0,05	0,06	0,06	0,08	0,08	0,10	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Standardabw.	214.550	162.560	54.998	18.132	8.576	3.767	2.413	1,2	0,4	0,2	0,1	0,2	0,3	0,2
P4-21	DSR: komplexer Schermodul							DSR: Phasenverschiebungswinkel						
	30	40	50	60	70	80	90	30	40	50	60	70	80	90
	10.940.000	2.506.420	689.075	237.966	91.696	39.333	20.325	42,6	60,8	65,1	66,3	66,8	66,9	65,4
11.578.000	2.690.290	696.487	225.608	93.880	41.215	21.276	41,3	60,1	65,1	66,8	67,8	67,6	65,5	
bereinigter Durchschnitt														
	11.259.000	2.598.355	692.781	231.787	92.788	40.274	20.801	42,0	60,5	65,1	66,6	67,3	67,3	65,5
n-fache StAbw	638.000	183.870	7.412	12.358	2.184	1.882	951	1,3	0,7	0,0	0,5	1,0	0,7	0,1
Grenzwert unten	10.621.000	2.414.485	685.369	219.429	90.604	38.392	19.850	40,7	59,8	65,1	66,1	66,3	66,6	65,4
Grenzwert oben	11.897.000	2.782.225	700.193	244.145	94.972	42.156	21.752	43,3	61,2	65,1	67,1	68,3	68,0	65,6
Variationskoeffizient	0,03	0,04	0,01	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
Standardabw.	319.000	91.935	3.706	6.179	1.092	941	476	0,7	0,3	0,0	0,3	0,5	0,3	0,0

	DSR: komplexer Schermodul							DSR: Phasenverschiebungswinkel						
	30	40	50	60	70	80	90	30	40	50	60	70	80	90
P1-1	11.550.200	2.551.860	656.885	202.536	75.834	31.341	15.272	42,2	61,5	65,8	67,5	68,8	69,0	68,2
	12.067.300	2.805.890	724.175	235.750	84.057	36.794	17.503	40,1	60,0	64,6	66,2	67,8	67,8	67,0
	bereinigter Durchschnitt													
	11.808.750	2.678.875	690.530	219.143	79.946	34.068	16.388	41,2	60,8	65,2	66,9	68,3	68,4	67,6
n-fache StAbw	517.100	254.030	67.290	33.214	8.223	5.453	2.231	2,1	1,5	1,2	1,3	1,0	1,2	1,2
Grenzwert unten	11.291.650	2.424.845	623.240	185.929	71.723	28.615	14.157	39,1	59,3	64,0	65,6	67,3	67,2	66,4
Grenzwert oben	12.325.850	2.932.905	757.820	252.357	88.169	39.521	18.619	43,3	62,3	66,4	68,2	69,3	69,6	68,8
Variationskoeffizient	0,02	0,05	0,05	0,08	0,05	0,08	0,07	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Standardabw.	258.550	127.015	33.645	16.607	4.112	2.727	1.116	1,1	0,8	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6
P3-6	DSR: komplexer Schermodul							DSR: Phasenverschiebungswinkel						
	30	40	50	60	70	80	90	30	40	50	60	70	80	90
	10.133.110	1.684.080	387.359	112.578	38.237	15.925	9.348	50,7	72,6	77,6	78,2	77,6	74,8	68,5
	bereinigter Durchschnitt													
	10.133.110	1.684.080	387.359	112.578	38.237	15.925	9.348	50,7	72,6	77,6	78,2	77,6	74,8	68,5
n-fache StAbw	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Grenzwert unten	10.133.110	1.684.080	387.359	112.578	38.237	15.925	9.348	50,7	72,6	77,6	78,2	77,6	74,8	68,5
Grenzwert oben	10.133.110	1.684.080	387.359	112.578	38.237	15.925	9.348	50,7	72,6	77,6	78,2	77,6	74,8	68,5
Variationskoeffizient	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Standardabw.	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
P3-5	DSR: komplexer Schermodul							DSR: Phasenverschiebungswinkel						
	30	40	50	60	70	80	90	30	40	50	60	70	80	90
	9.866.670	1.676.060	382.090	101.678	34.593	14.017	7.331	52,4	73,4	78,7	80,4	79,3	75,2	69,0
	10.610.900	1.953.920	435.594	118.422	42.355	16.943	9.058	50,5	72,8	78,9	80,5	79,6	76,7	69,6
	9.864.650	1.738.800	390.797	105.642	32.589	13.616	7.237	52,0	72,2	77,8	79,2	79,0	76,1	69,6
	bereinigter Durchschnitt													
	10.114.073	1.789.593	402.827	108.581	36.512	14.859	7.875	51,6	72,8	78,5	80,0	79,3	76,0	69,4
n-fache StAbw	583.175	197.517	38.912	11.860	6.991	2.462	1.390	1,4	0,8	0,8	1,0	0,4	1,0	0,5
Grenzwert unten	9.530.898	1.592.077	363.915	96.721	29.521	12.397	6.486	50,3	72,0	77,7	79,1	78,9	75,0	68,9
Grenzwert oben	10.697.249	1.987.110	441.739	120.441	43.504	17.320	9.265	53,0	73,6	79,3	81,0	79,7	77,0	69,9
Variationskoeffizient	0,03	0,07	0,06	0,07	0,12	0,10	0,11	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00
Standardabw.	351.310	118.986	23.441	7.145	4.212	1.483	837	0,8	0,5	0,5	0,6	0,2	0,6	0,3
P3-4	DSR: komplexer Schermodul							DSR: Phasenverschiebungswinkel						
	30	40	50	60	70	80	90	30	40	50	60	70	80	90
	9.947.340	1.835.830	413.623	117.748	40.668	17.309	10.494	52,0	72,8	78,3	79,6	78,1	73,4	65,9
	8.761.020	1.617.130	370.410	97.738	35.674	13.868	7.199	53,6	73,4	78,7	79,9	78,8	75,3	69,0
	9.960.740	1.731.900	386.823	103.407	34.575	14.326	7.629	51,0	72,1	78,0	80,1	79,7	76,7	70,0
	bereinigter Durchschnitt													
	9.556.367	1.728.287	390.285	106.298	36.972	15.168	8.441	52,2	72,8	78,3	79,9	78,9	75,1	68,3
n-fache StAbw	933.620	148.272	29.566	13.979	4.401	2.533	2.428	1,8	0,9	0,5	0,3	1,1	2,2	2,9
Grenzwert unten	8.622.747	1.580.015	360.720	92.319	32.571	12.635	6.013	50,4	71,9	77,9	79,5	77,8	72,9	65,4
Grenzwert oben	10.489.987	1.876.559	419.851	120.276	41.374	17.700	10.868	54,0	73,6	78,8	80,2	80,0	77,4	71,2
Variationskoeffizient	0,06	0,05	0,05	0,08	0,07	0,10	0,17	0,02	0,01	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03
Standardabw.	562.422	89.320	17.811	8.421	2.651	1.526	1.462	1,1	0,5	0,3	0,2	0,7	1,4	1,7

