



Einfluss schweizerischer Filler auf die Alterung von bituminösen Bindemitteln und die Rissbildung im Belag

Influence des fillers suisse sur le vieillissement des liants bitumineux et la formation des fissures dans le revêtement

Influence of swiss fillers on aging of bituminous binders and crack formation in pavements

R. Gubler, Dr. sc. nat. ETH
M. N. Partl, Dr. sc. tech., dipl. Ing. ETH
Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf
Abteilung Strassenbau/Abdichtungen

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation / Bundesamt für Strassen
Forschungsauftrag VSS 1998/070 „Einfluss schweizerischer Filler auf die Alterung von bituminösen Bindemitteln und die Rissbildung im Belag“

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	7
1.1	Ausgangslage, Problemstellung	7
1.1.1	Bedeutung der Alterung bituminöser Bindemittel im Strassenbau	7
1.1.2	Einfluss des Fillers auf die Alterung	8
1.1.3	Aktuelle Lage	8
1.1.4	Prinzip der Bestimmung der Alterung bituminöser Bindemittel in Gegenwart von Filler	8
1.1.5	Zielsetzung für eine neu erarbeitete Methode	9
1.2	Zweck der Prüfung	9
1.3	Auftrag	10
1.4	Begriffe	10
2	AUSWAHL DER UNTERSUCHTEN MATERIALIEN	13
2.1	Mineralstoffe	13
2.2	Bindemittel	13
3	PRINZIPIEN DER PRÜF- UND AUSWERTEVERFAHREN	15
3.1	Methodische Untersuchungen	15
3.1.1	Theoretische Überlegungen zur erwünschten Mastixsteifigkeit	15
3.1.2	Verifikation an Mastix aus Fillern 2 und 6	16
3.1.3	Verifikation anhand von Modulbestimmungen an rückgewonnen Bindemitteln aus alten Belägen	16
3.2	Mineralstoffe	16
3.2.1	Siebanalyse	17
3.2.2	Zusammensetzung	17
3.3	Bindemittel	17
3.3.1	Bestimmung des komplexen Moduls bei einer Prüfbedingung	18
3.3.2	Bestimmung des komplexen Moduls als Funktion von Temperatur und Frequenz	18
3.4	Herstellung von Mastix mit ungealtertem Bindemittel	19
3.5	Durchführen der Alterung und Herstellung des Mastix	19
3.5.1	Alterung der Bindemittels	19
3.5.2	Konditionieren des Fillers	20
3.5.3	Herstellen des fillerisierten Bindemittels	20
3.5.4	Mischen des fillerisierten Bindemittels zu Mastix	20
3.5.5	Herstellen von Mastix aus gealtertem Bindemittel	20
3.6	Prüfungen am Mastix	20
3.6.1	Bestimmen des komplexer Moduls an Mastix	21
3.6.2	Infrarotspektroskopie	21
3.6.3	Ermüdungsverhalten und Neigung zur Rissbildung	22
4	AUSWERTEVERFAHREN	25
4.1	Mineralstoffe	25

4.2	Bindemittel	25
4.3	Prüfungen am Mastix	25
5	ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNG	27
5.1	Methodische Untersuchungen	27
5.1.1	Homogenität der Mischungen	27
5.1.2	Mischverhältnis, bestimmt an U-Mastix	28
5.1.3	Mischverhältnis, bestimmt an O-Mastix, Vorversuch mit Fillern 2 und 6	29
5.1.4	Bestimmen des Zielgehaltes an Filler für einen Zielmodul von 150kPa bei 52°C	30
5.1.5	Bestimmen des Zielmoduls und Zielgehaltes an Filler für DSR-Messungen bei 55°C	30
5.1.6	Bestimmen des komplexen Moduls nach Zentrifugation des gealterten Mastix	31
5.1.7	Evaluation der Prüfbedingungen für die Ermüdungsprüfung an Mastix	32
5.2	Mineralstoffe	34
5.2.1	Karbonatgehalt (Kalk und Dolomit)	34
5.2.2	Übrige Mineralien	34
5.2.3	Korngrössenverteilung	35
5.3	Bindemittel	35
5.3.1	Charakterisierung der Bindemittel	35
5.3.2	Mechanische Eigenschaften	36
5.4	Mastix	43
5.4.1	Detailergebnisse an ausgewählten Mastixproben	43
5.4.2	Komplexer Modul des Mastix gealtert ohne und mit katalytischer Wirkung des Fillers	46
5.4.3	Katalytische Wirkung der Filler	59
5.4.4	Ermüdungsprüfungen an ausgewählten Mischungen	60
6	SCHLUSSFOLGERUNGEN	65
6.1	Aussagefähigkeit der Methode	65
6.2	Alterungsverhalten der Bindemittel	65
6.3	Einfluss der Eigenschaften von Fillern auf das Alterungsverhalten	66
6.3.1	Bewertung der Filler in Hinblick auf Norm	66
6.3.2	Bewertung der Filler hinsichtlich Feinheit	66
6.3.3	Katalytisches Verhalten der Filler	66
6.4	Evaluation kritischer Kombinationen von Fillern und Bindemitteln	67
6.5	Verifikation der Praxisrelevanz des Alterungsindex mittels der Ermüdungsprüfung	67
6.6	Einschränkung von Anwendungsgebieten für Filler	68
6.7	Verfahrensbeschrieb	68
6.7.1	Prinzip der Prüfung	68
6.7.2	Prüfgeräte	69
6.7.3	Durchführen der Prüfung	69
6.7.4	Auswertung	70
7	FORSCHUNGSBEDARF	71
7.1	Konditionierung des Fillers	71
7.2	Untersuchungen des Einfluss höherer Mischtemperaturen	71

7.3	Untersuchung des Einflusses der Petrografie	71
7.4	Untersuchung von Schadenfällen	71
8	LITERATURVERZEICHNIS	72
8.1	Fachliteratur	72
8.2	Schweizer Normen	72
8.3	Andere Normen	73
	ANHÄNGE	74
A3.3.1	Bestimmung des komplexen Moduls an Bindemittel bei einer Prüfbedingung	74
A3.3.2	Bestimmung des komplexen Moduls zur Charakterisierung des Bindemittels	74
A3.4	Herstellen von Mastix	75
A3.5	Alterung und Herstellung des Mastix	76
A3.5.2	Konditionieren des Fillers	76
A3.5.3	Herstellen von fillerisiertem Bindemittel	76
A5.5.5	Herstellen von Mastix aus gealtertem Bindemittel	77
A3.6.1	Bestimmung des komplexen Moduls an Mastix	77
A3.6.3	Bestimmen des Ermüdungsverhalten als Mass für das Rissverhalten	78

Zusammenfassung

Alterung kann definiert werden als die Veränderung des bituminösen Bindemittels im Verlaufe der Zeit. Mit dieser Veränderung ist im Allgemeinen eine Abnahme der Leistungsfähigkeit und Funktionalität des Bindemittels verbunden. Der auffälligste Aspekt der Alterung ist dabei die Verhärtung und Versprödung des Bindemittels, aber auch die Klebkraft des Bindemittels nimmt mit dem Altern ab. Als Folge davon leidet auch der Belag, denn letztlich bewirkt die Alterung des Bindemittels verringerte Gebrauchstauglichkeit des Belages. Die Beständigkeit gegen Ermüdung nimmt ab, das zeigt sich deutlich an der Rissbildung in alten bitumenhaltigen Schichten.

Frühere Forschungen zeigten [GUB.R98, GUB.R99], dass Filler diese Alterung katalytisch fördern können. Das erlaubt die Definition eines Alterungsindex, der die Wirkung eines während dem Alterungsvorganges anwesenden Fillers beschreibt. Mit einer Prüfmethode zur Bestimmung dieses Alterungsindex wurden eine Reihe von in der Schweiz marktüblichen Fillern und Bindemitteln untersucht. Zwischen verschiedenen Fillern wurden deutliche Unterschiede gefunden; nicht alle bewirkten eine gleich ausgeprägte Zunahme der Versprödung. Zugleich zeigte sich auch, dass die Bindemittel nicht gleich empfindlich auf die katalytische Wirkung der Filler reagieren.

Für die Praxis wichtig ist, dass im Gegensatz zu früheren Untersuchungen [GUB.R98, GUB.R99], die auch amerikanische Materialien verwendeten, keine so ausgeprägte Versprödungen beobachtet wurden. Nur einzelne Kombinationen von Fillern und Bitumen zeigten eine hohe Versprödung.

Der Forschungsbericht wird abgerundet durch methodische Verbesserungen gegenüber [GUB.R99] und durch Diskussion von Varianten der Prüfverfahren. Die Aussagekraft der Methode wird durch Vergleich mit dem Ermüdungsverhalten ausgewählter Mastixproben überprüft. Die Relevanz des Alterungsindex für die Praxis wird diskutiert.

Résumé

Le vieillissement peut se définir comme la modification du liant dans le temps. Cette modification s'accompagne généralement d'une diminution des performances et de la fonctionnalité du liant. L'aspect le plus frappant de ce vieillissement est le durcissement et la fragilisation, mais l'adhésivité diminue elle aussi avec le temps. Le revêtement souffre lui aussi, car le vieillissement du liant provoque une diminution de son aptitude au service. Sa résistance à la fatigue diminue, ce qui se manifeste par la formation de fissures sur les revêtements bitumineux âgés.

Des travaux de recherche antérieurs [GUB.R98, GUB.R99] ont montré que les fillers peuvent catalyser le vieillissement. Ceci permet de définir un indice de vieillissement qui décrit l'action du filler sur le processus de vieillissement. Une méthode d'essai qui permet de déterminer cet indice a été utilisée pour examiner une série de fillers et de liants courants en Suisse. Cette étude a montré qu'il existe de nettes différences entre ces fillers et que tous ne provoquent pas une augmentation également marquée de la fragilisation du liant. Il est aussi apparu que les liants ne présentent pas tous la même sensibilité à l'action catalytique des fillers.

Pour la pratique il est important de relever que l'on n'a pas observé de fragilisation aussi marquée que dans les études antérieures dans lesquelles on avait aussi utilisé des matériaux américains, [GUB.R98, GUB.R99]. Seules certaines combinaisons de fillers et de bitumes conduisent à une fragilisation élevée.

Ce rapport de recherche présente encore des améliorations de la méthode d'essai par rapport à [GUB.R99] et une discussion de différentes variantes de cette méthode. La fiabilité de la méthode a été vérifiée par comparaison avec le comportement à la fatigue d'éprouvettes d'asphalte coulé. L'importance de l'indice de vieillissement pour la pratique est aussi discutée.

Abstract

Aging can be defined as the change of the properties of a bituminous binder as function of time. This change is generally connected with a loss of performance and functionality of the binder. The most obvious aspect of aging is the hardening and embrittlement of the binder. In addition, the adhesion between binder and aggregates can be reduced too. As a consequence this leads to a degradation of the pavement. Thus aging of the binder affects the performance of the road. The resistance against fatigue decreases, as proved clearly by crack formation in older bituminous pavements.

Earlier research [GUB.R98, GUB.R99] proved that fillers show a catalytically accelerating aging. This allows the definition of an aging index describing the influence of a present filler on aging process. Using a test method to determine this aging index, a number of fillers and binders frequently used in Switzerland were investigated. Marked differences between fillers were found, not all producing the same additional hardening. In addition, binders too did not show the same susceptibility to the catalytic activity of the fillers.

In contrast to the earlier research [GUB.R98, GUB.R99] including binders and fillers originating from USA, less extreme hardening was observed. A high aging index was found only for a few combinations.

This research report describes the further development of the method compared to [GUB.R99]. Variations in the test methods are discussed. The method was assessed by comparing the aging index with the fatigue behavior [AIR.G04] of selected mastics. The relevance of the aging index for practical applications is discussed.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage, Problemstellung

1.1.1 Bedeutung der Alterung bituminöser¹ Bindemittel im Strassenbau

Alterung kann definiert werden als die Veränderung des bituminösen Bindemittels im Verlaufe der Zeit. Mit dieser Veränderung ist im allgemeinen eine Abnahme der Leistungsfähigkeit und Funktionalität des Bindemittels verbunden. Der auffälligste Aspekt der Alterung ist dabei die Versprödung des Bindemittels, aber auch die Klebkraft des Bindemittels kann mit dem Altern abnehmen. Als Folge davon leidet auch der Belag, denn letztlich zeigen sich die Auswirkungen der Alterung des Bindemittels in einer Abnahme der Gebrauchstauglichkeit des Belages. Das auch für den Laien sichtbare Anzeichen sind die Risse im Belag. Als weitere Schäden können Ausmagerungen oder Absanden als Folge der reduzierten Klebkraft des verhärteten Bindemittels auftreten.

Die Alterung des bituminösen Bindemittels ist ein komplexer Vorgang, der von der Natur des Bindemittels, der Mineralstoffe (und dabei insbesondere der Filler) und den Umgebungseinflüssen abhängt. Zudem ist der Alterungsvorgang von den Belagseigenschaften selber abhängig und kann sich beschleunigen, wenn infolge der Versprödung des Bindemittels sich Risse im Belag entwickeln, die den Sauerstoffzutritt erleichtern.

Es herrscht in der Fachwelt Konsens darüber, dass zwischen der Veränderung des Bindemittels während der Belagsherstellung und während dem Gebrauch auf der Strasse zu unterscheiden ist. Dem trägt beispielsweise auch die im Rahmen des SHRP (Strategic Highway Research Programm) entwickelte Prüfmethodik von bituminösen Bindemitteln Rechnung, indem sie zwei Alterungsverfahren kombiniert:

1. Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT), der die Veränderung während der Belagsherstellung simuliert [EN12607-1]
2. Pressure Aging Vessel (PAV) Test, der die eigentliche Alterung während dem Gebrauch simuliert [PAV97].

In Kenntnis dieser Verhältnisse bezeichnet die europäische Norm [EN12607-1] die Veränderung während dem Einbau als Verhärtung, denn es ist schliesslich widersinnig, das Bindemittel in einem neu eingebauten Belag als gealtert zu bezeichnen.

In der aus SHRP hervorgegangenen Prüfmethodik wird am Bindemittel nach RTFOT nur eine mechanische Prüfung durchgeführt, während das zusätzlich PAV gealterte Bindemittel intensiv geprüft wird. Das ist sinnvoll, entspricht dieses Vorgehen der Alterung in der Praxis, da Risse erst nach Jahren des Gebrauchs auftreten.

¹ In diesem Bericht werden die Begriffe bituminös und Filler entsprechend der bei der Auftragserteilung gültigen Terminologie verwendet.

1.1.2 Einfluss des Fillers auf die Alterung

Genau genommen kann und wird jede Komponente der Mineralstoffe die Alterung im Bindemittel beeinflussen. Es sind hier jedoch drei grundsätzliche Mechanismen zu beachten:

1. Katalyse der Oxidation.

Diese erfolgt an der Grenzfläche zwischen Mineralstoffen und Bindemittel. Soweit die Mineralstoffe mit Bindemittel umhüllt sind, ist das zugleich ihre Oberfläche. Da die Fillerkomponente weit über 50% der ganzen Mineralstoffoberfläche stellt, ist sie in Bezug auf katalytische Wirkung die einzig wesentliche Komponente. Forschung, die diese katalytische Wirkung nachweisen und erforschen will, kann sich somit auf Filler konzentrieren.

2. Behinderung der Diffusion.

Jegliches Mineralstoffvolumen kann als grundsätzlich undurchlässig für Sauerstoff angenommen werden. Somit leistet jede Komponente der Mineralstoffe einen Betrag zu diesem Effekt, der aber unabhängig von der Art der Mineralstoffe ist. Infolge dieser Unabhängigkeit ist dieser Effekt praktisch eine Konstante bituminöser Beläge, daher auch kaum zu beeinflussen und somit für die Forschung nicht interessant.

3. Förderung der Diffusion.

Hohlräume im Belag fördern den Sauerstoffzutritt und damit die Alterung. Für die Bewertung des katalytischer Effektes in der praktischen Anwendung ist somit dieser Effekt unbedingt zu berücksichtigen.

Ziel dieser Forschung ist somit folgerichtig und dem Auftrag entsprechend das Ermitteln des katalytischen Effektes von Fillern auf die Alterung von bituminösen Bindemitteln. Dabei interessiert die kombinierte Auswirkung von Herstellung und Gebrauchsdauer, da auch in der Praxis diese kombinierte Auswirkung auftritt.

1.1.3 Aktuelle Lage

Bereits in früheren Arbeiten konnten Hinweise gefunden werden, dass Filler die Alterung bituminöser Bindemittel beeinflussen [BER.A89]. Allerdings zeigte sich kein eindeutiger Trend. Während einem Forschungsaufenthalt in den USA wurden dann klare Beweise für diesen Einfluss gefunden [GUB.R98, GUB.R99]. Der Effekt darf deshalb als gesichert gelten und sein Ausmass kann gemäss den Ergebnissen als praktisch relevant gewertet werden.

Es existiert keine Standardprüfung, mittels der Filler auf ihre katalytische Aktivität hin untersucht werden können. Es ist im weiteren auch nicht bekannt, inwieweit unterschiedliche Bindemittel gleich oder verschieden auf die Filler reagieren. Zudem ist nicht bekannt, wie gross der katalytische Effekt sein darf. Eine gewisse Verhärtung während der Belagsherstellung ist erwünscht. Selbst eine langsame Versprödung während dem Gebrauch kann die Gebrauchsdauer verlängern, indem sie der Spurrinnenbildung entgegenwirkt, solange zugleich das Risiko der Rissbildung untergeordnet bleibt.

Zielsetzung des Forschungsauftrages muss es deshalb sein, eine erste Datenbasis für die Beantwortung solcher Fragen zu geben und von einem Prüfverfahren zu zeigen, dass es angewendet werden kann, um im speziellen Falle die Alterungsempfindlichkeit einer Kombination Filler/Bitumen zu prüfen.

1.1.4 Prinzip der Bestimmung der Alterung bituminöser Bindemittel in Gegenwart von Filler

Durch methodische Untersuchungen wird abgeklärt, bei welchen Fillerkonzentrationen der Einfluss des Fillers auf die Alterung des Bindemittels geprüft werden soll. Grundsätzlich soll die Konzentration so festgelegt werden, dass eine annähernd praxisgerechte Mischung entsteht und das Verhältnis Filler zu Bindemittel jenem in der Strasse entspricht. Zugleich ist aber auch der Prüfbarkeit Aufmerksamkeit zu schenken. Hohe Fillerkonzentrationen geben sehr steife und schwierig zu prüfende Mischungen, worunter die Reproduzierbarkeit leidet. Darüber hinaus wird in den methodischen Untersuchungen die Prüftemperatur für das Bestimmen des Moduls ermittelt.

Mit dem so ermittelten Sollwert für den Füllergehalt werden zwei Mastixarten aus dem zu untersuchenden Paar Filler/Bitumen hergestellt, der O-Mastix und der K-Mastix. Die Begriffe werden in 1.4 genauer definiert.

Für die Herstellung des O-Mastix wird das Bindemittel zuerst der Prüfung Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) gemäss [EN12607-1] und anschliessend der Alterung im Pressure Aging Vessel [PAV97] unterzogen. Aus diesem Bindemittel wird durch Mischen der O-Mastix hergestellt. Da während der ganzen Alterung der Filler abwesend war, handelt es sich um einen Mastix **ohne** eine durch den Filler katalytisch beschleunigte Oxidation; daher die Bezeichnung O-Mastix.

Für die Herstellung des K-Mastix wird eine Mischung von 75 Masse-% Bitumen und 25 Masse-% Filler hergestellt und der Prüfung RTFOT unterzogen. Somit kann bereits in diesem Vorgang der Filler eine zusätzlich katalytische Wirkung entfalten. Anschliessend wird dieses fillerierte Bindemittel und weiterem Filler der Mastix mit dem Sollgehalt an Filler hergestellt und im PAV gealtert. Auch dabei kann der Filler katalytisch wirksam sein; daher die Bezeichnung K-Mastix.

Die beiden Mastixarten werden mit dem Dynamic Shear Rheometer untersucht, die beiden Werte des komplexen Moduls bestimmt und miteinander verglichen. Das Verhältnis ist ein Alterungsindex; er kann als Mass für die katalytische Wirkung des Fillers aufgefasst werden.

Es ist hier anzumerken, dass grundsätzlich neben der Katalyse die Absorption niedrig molekularer Bindemittelbestandteil durch Poren des Fillers eine Rolle spielen könnte. Ein solcher Prozess könnte beim K-Mastix wegen der längeren Kontaktdauer weitergehend oder vollständig verlaufen, beim O-Mastix mit einer viel kürzeren Kontaktdauer bei erhöhter Temperatur nur teilweise. Dieser Prozess würde aus dem Bindemittel die als Weichmacher wirkenden Bestandteile beim K-Mastix weitergehend entfernen.

Weil die Evaluation einer Methode zum Validieren des Alterungsindex zu einer Projektverzögerung von mehr als einem Jahr führte, wurden die Mastixproben etwa 2 Jahren später der Ermüdungsprüfung unterworfen. Der dabei berechnete Alterungsindex zeigt praktisch das gleiche Bild (Tabelle 6.3), obwohl nun genügend Zeit für einen Absorptionsprozess an Partikeln im Mikrometerbereich bei Raumtemperatur zur Verfügung stand.

1.1.5 Zielsetzung für eine neu erarbeitete Methode

Die Methode soll es erlauben, die katalytische Wirkung eines Fillers auf die Alterung eines bituminösen Bindemittels mit ausreichender Genauigkeit, bei einem möglichst geringen Arbeitsaufwand kostengünstig zu bestimmen.

1.2 Zweck der Prüfung

Die Ergebnisse der Prüfung sollen geeignet sein, das Risiko der Rissbildung und Ermüdung in konkreten Fällen abschätzen zu können.

1.3 Auftrag

Diese Forschung soll den Einfluss schweizerischer Filler auf die Alterung von bituminösen Bindemitteln samt Rissbildung und Ermüdung im Belag abklären. Aufgrund der erhaltenen Resultate sind konkrete für die Praxis anwendbare Empfehlungen auszuarbeiten, die auch als Grundlage für eine allfällige Normierung dienen können.

1.4 Begriffe

Die im folgenden verwendeten Begriffe stützen sich so weit möglich auf das Schweizer Normenwerk, auf im SHRP-Programm entwickelte Begriffe sowie auf allgemein gebräuchliche Bezeichnungen. Auf einige speziell für diesen Forschungsbereich verwendete Begriffe kann aber nicht verzichtet werden. Sie sollen deshalb zusammen mit anderen, deren allgemeine Geläufigkeit nicht vorausgesetzt werden kann, hier definiert werden.

Alterung

Unter Alterung wird die Veränderung der Eigenschaft des Bindemittels im Gebrauch verstanden. Dieser Vorgang wird im Labor mit dem Test PAV (Pressure Aging Vessel) simuliert. Der resultierende Bindemittelzustand entspricht jenem nach 5 bis 10 Jahre Liegedauer auf der Strasse.

Alterungsindex

Unter Alterungsindex A wird in diesem Bericht der Quotient der komplexen Module von K-Mastix und O-Mastix verstanden. Er berechnet sich nach Gleichung (1).

$$A = \frac{M_k}{M_o} \quad (1)$$

wobei

M_k : Komplexer Modul des K-Mastix

M_o : Komplexer Modul des O-Mastix

Bituminös

Der Begriff war zu Beginn der Forschung gültig und wird weiterhin im Sinne von Bitumen oder bitumenhaltig verwendet.

DSR

Dynamic Shear Rheometer. Das Bindemittel wird in diesem Prüfgerät nach [DSR95] zwischen zwei kreisrunde, parallele Platten eingebaut. Die eine davon wird dann gegen die andere verdreht, wobei diese Auslenkung gegenüber der Ruhelage klein und zeitlich sinusförmig ist. Während dieser kontinuierlichen Schwingbelastung werden die Auslenkung und Kraft gemessen und daraus die mechanischen Kennwerte berechnet.

Filler

Die gemäss [SN670'810] auf 0.09mm abgesiebten Steinmehle werden kurz Filler genannt.

Fillerisiertes Bindemittel

Mischung von 25 Masse-% Filler und 75 Masse-% Bindemittel.

K-Mastix

So hergestellter Mastix, dass der Filler seine katalytische Wirkung entfalten kann. Der Filler ist bei Verhärtung im RTFOT in reduzierter Konzentration, bei der Alterung im PAV in der Sollkonzentration anwesend. K bedeutet Katalytische Wirkung des Fillers auf die Bindemittelalterung ist möglich.

KAST-BIN

KoAxialer SchubTest für Bindemittel [GUB.R03]. Bei dieser Prüfung wird Bindemittel oder Mastix in einen Spalt zwischen einem äusseren Hohlzylinder und einem zentralen Zylinder eingegossen. Indem dann dem zentralen Zylinder eine sinusförmige Schwingung aufgezwungen wird, erfährt das eingegossene Material eine periodische Scherung, und es können die entsprechenden mechanischen Kenngrössen ermittelt werden.

KAST-BEL

KoAxialer SchubTest für verdichtetes bitumenhaltiges Mischgut [YOU.K97, SOK.K05]. Bei dieser Prüfung wird ein Probekörper aus verdichtetem Mischgut zwischen einem äusseren Hohlzylinder und einem zentralen Zylinder eingeklebt. Indem dann dem zentralen Zylinder eine sinusförmige Schwingung aufgezwungen wird, erfährt das eingegossene Material eine periodische Scherung, und es können die entsprechenden mechanischen Kenngrössen ermittelt werden.

Korngrössenverteilung

Wird in dieser Forschungsarbeit mit einem Laser-Partikel-Sizer bestimmt, entspricht also einer optischen Korngrössenverteilung und nicht einer sedimentativen wie bei der Bestimmung nach Schweizer Norm [SN670760, SN670818].

Kurzbezeichnung Mastix

Die in Grafiken und Tabellentiteln verwendete Kurzbezeichnung für Mastix setzt sich zusammen aus: Dem Buchstaben O oder K für O-Mastix respektive K-Mastix, der Füllernummer (1 bis 8) und dem Buchstaben für Bindemittel (A bis G). Das gibt beispielsweise K1G für den K-Mastix aus Filler 1 und Bindemittel G.

O-Mastix

Mastix so hergestellt, dass der Filler seine katalytische Wirkung nicht entfalten kann, Filler ist bei Verhärtung im RTFOT und Alterung im PAV abwesend. O bedeutet, die Alterung verläuft ohne katalytische Wirkung des Fillers.

PAV

Pressure Aging Vessel. Im Rahmen des SHRP-Programmes entwickelte Alterungsprüfung im Drucktopf, die einer Liegedauer von 5 bis 10 Jahren auf der Strasse entspricht.

RTFOT

Rolling Thin Film Oven Test. Kürzel für die gemäss [EN12607-1] normierte Prüfung. Der Test erfasst die Veränderung der Bindemittleigenschaften beim Einbau (von der Lagerung im Tank bis zum Einwalzen auf der Strasse).

SHRP

Strategic Highway Reseach Program. Gross angelegtes Forschungsprogramm in den USA um an Leistungskriterien orientierte Normen (perfomance based) zu entwickeln.

Strain, Strainlevel, Dehnung

Im DSR nach SHRP bedeutet Strain die horizontale Verschiebung der oberen Platte am Ausserenrand, dividiert durch die Spalthöhe in [m/m]. Im Bericht wird im allgemeinen die deutsche Bezeichnung Dehnung verwendet.

Tonmineralien

Dazu werden in diesem Forschungsauftrag Montmorillonit, Kaolinit und Illit gezählt. Es handelt sich um Fillerbestandteile, die in Gegenwart von Wasser quellen können. Wenn sie in höheren Konzentrationen vorliegen, können sie den Belag schädigen [JUN.J74, ROE.F].

Verhärtung

In Übereinstimmung mit der europäischen Normierung wird grundsätzlich nicht von Kurzzeitalterung, sondern von Verhärtung gesprochen. Die Prüfung wird gemäss [EN12607-1] mit dem Rolling Thin Film Oven durchgeführt.

U-Mastix

Mastix aus Filler und ungealtertem Bindemittel hergestellt. Da die Aufwärmung des Bindemittels schonend in geschlossener Dose erfolgt und die Mischzeit kurz ist, ist keine wesentliche Verhärtung des Bindemittels im U-Mastix zu erwarten.

2 Auswahl der untersuchten Materialien

Zur Auswahl der Materialien wurde eine Umfrage unter Mischgutproduzenten, Bindemittellieferanten und Forschungsstellen durchgeführt. Aufgrund dieser Angaben wurden 8 Filler und 7 Bindemittel ausgewählt, die in der Schweiz häufig zum Einsatz gelangen und zudem die verschiedenen Kategorien von Materialien umfassen (Eigenfiller und industrielle Filler unterschiedliche aber typische Petrographie, modifizierte, unmodifizierte Bindemittel).

2.1 Mineralstoffe

Die im Forschungsauftrag verwendeten Filler sind in Tabelle 2.1 aufgeführt.

Tabelle 2.1 Eingesetzte Filler

Filler	Beschreibung
1	Kalksteinfiller mit Quarzanteil
2	Quarz/Feldspat-Filler
3	Quarzreicher alpiner Filler
4	Kiesel-Kalk-Filler
5	Mittelland Eigenfiller
6	Kalkreicher Mittelland Eigenfiller
7	Kalkreicher alpiner Filler
8	Kalksteinfiller

Von den angelieferten Fillern wurde eine Portion von mindestens 1.5 kg abgetrennt und auf dem 0.09 mm Sieb abgesiebt. Diese Probe wurde als hinreichend repräsentativ für den Filler betrachtet, weil der Einfluss von Entmischung während Probenahme, Versand und dieser Trennoperation auf den Anteil unter 0.09 mm als gering betrachtet wurde.

Sämtliche weitere Untersuchung basieren auf der so gewonnenen Laboratoriumsprobe. Analysenproben für die Untersuchung wurden immer unter Durchmischung aus der Laboratoriumsprobe entnommen, um auch minime Entmischungen zu vermeiden.

2.2 Bindemittel

Die in dieser Forschung verwendeten Bindemittel sind in Tabelle 2.2 zusammengestellt.

Tabelle 2.2 Im Forschungsprojekt verwendete Bindemittel²

Bindemittel	
A	B55/70
B	B80/100
C	B120/150
D	B80/100
E	Hartbitumen
F	Elastomer modifiziertes Polymerbitumen
G	Plastomermodifiziertes Bitumen

² Kurzbezeichnung nach alter Norm

Auf das Bindemittel E, das nur eine Ersatzwahl darstellt, wurde verzichtet, dafür wurde der Methodenentwicklung mehr Gewicht geschenkt.

3 Prinzipien der Prüf- und Auswerteverfahren

In diesem Abschnitt werden die durchgeführten Prüfungen erläutert und ihre Wahl, wo angebracht, begründet. Detaillierte Angaben zu den für diesen FA angepassten oder weiterentwickelten Prüfverfahren sind in den Anhängen aufgeführt. Die Anhänge sind entsprechend der Nummerierung der Überschriften dieses Kapitels bezeichnet, also beispielsweise A3.3.1 Bestimmung des komplexen Moduls bei einer Prüfbedingung.

3.1 Methodische Untersuchungen

3.1.1 Theoretische Überlegungen zur erwünschten Mastixsteifigkeit

Die Fillernorm [SN 670760] schreibt eine minimale Erhöhung des Erweichungspunktes von 15°C bei einer Mischung von 65 Masse-% Filler mit 35 Masse-% von Bitumen B80/100 vor. Allerdings sind beim Mastix mit dieser Fillerkonzentration die mechanischen Eigenschaften nur mit reduzierter Genauigkeit zu bestimmen. Somit wird von der minimalen Erhöhung von 15 °C ausgegangen, um die Versteifung abzuschätzen. Gemäss Anforderungsnorm an Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel [EN12591] entsprechen 15°C grob geschätzt einem Unterschied in den Viskositäten bei 60 °C um einen Faktor 6. Im Forschungsauftrag 8/77 [GUB.R77] wurden an 37 Bitumen der komplexe Modul bestimmt und ausgewertet. Die Temperaturabhängigkeit wurde dabei gemäss Gleichung (2) ausgewertet.

$$\log(a_T) = \frac{C_1 \cdot (T - T_R)}{C_2 + T - T_R} \quad (2)$$

wobei die Symbole folgendes bedeuten:

C_1, C_2	Koeffizienten
T	Messtemperatur
T_R	Referenztemperatur
a_T	Faktor, mit dem die Frequenz der bei der Referenztemperatur multipliziert werden muss, um bei der Messtemperatur T den gleichen Modul zu erhalten. Da bei den gewählten Prüfbedingungen die Modul-Frequenzkurve nicht mehr stark von der 45°-Kurve abweicht, ist a_T ein für eine Schätzung hinreichend gutes Mass für das Modulverhältnis
\log	Dekadischer Logarithmus

Die gemittelten C_1 und C_2 betragen für die Bitumen B 80/100

C_1	7.78
C_2	108.7 °C

Daraus ergeben sich je nach Temperaturbereich folgende Abnahmen der Module:

Von 40 auf 60 °C	Faktor 28
Von 50 auf 70 °C	Faktor 16
Von 50 auf 65 °C	Faktor 9

Für einer Temperaturerhöhung von 15 °C wurde aufgrund diesen Überlegungen eine Versteifung um den Faktor 6 bis 10 als sinnvoll angesehen. Für einen Ausgangsmodul des ungealterten Bindemittels von 2.5 kPa (siehe auch Tabelle 5.5) ergibt das einen zulässigen Bereich für den Zielwert von 15 bis 25 kPa. Untersucht wurden dann Zielwerte von 15 bis 18 kPa.

3.1.2 Verifikation an Mastix aus Fillern 2, 5 und 6

Die Ergebnisse der Versuche mit Fillern 2, 5 und 6 sind in Tabelle 5.5 bis Tabelle 5.7 in Kapitel 5.1.2 zusammengefasst. Sie zeigen, dass ein Zielmodul von 18 kPa zu einer Fillerkonzentration von 60 bis 64 Masse-% führt, wobei sich bei den Messungen bei 65 Masse-% deutlich Schwierigkeiten abzeichneten. Ein Zielmodul von 17 kPa ergibt Fillerkonzentrationen von 59 bis 62 Masse-% und liegt damit in einem messtechnisch günstigeren Bereich. Der Zielwert für den Modul wird deshalb auf 17 kPa festgelegt.

3.1.3 Verifikation anhand von Modulbestimmungen an rückgewonnen Bindemitteln aus alten Belägen

Im Forschungsauftrag U2000 [PAR.M] wurden Bindemittel aus 15 bitumenhaltigen Schichten untersucht. Sie wiesen bei 0.1 Hz und 40 °C einen komplexen Modul im Bereich von 8 bis 78 kPa auf (als Beispiel diene die Abbildung 3.1). Die meisten Werte lagen im Bereich von 15 bis 40 kPa. Zugleich kann aus den dargestellten Modulwerten erkannt werden, dass eine Zehnerpotenz in der Frequenz etwa 10 °C entspricht. Die Prüfbedingungen 52 °C und 1 Hz entsprechen somit grob den Prüfbedingungen von 40 °C und 0.1 Hz. Aus dieser angenäherten Anbindung an die realistischen Verhältnisse auf der Strasse ergibt sich ein Zielwert für Mastix aus gealtertem Bindemittel im Bereich von 150 bis 200 kPa.

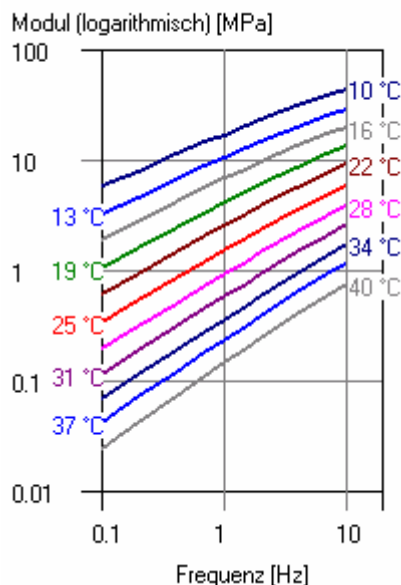


Abbildung 3.1 Module des rückgewonnenen Bindemittels UR, Deckschicht A

3.2 Mineralstoffe

An den Filler wurden die in Tabelle 3.1 aufgeführten Prüfungen nach den dort angegebenen Methoden durchgeführt. Abgesehen von der Siebanalyse wurden alle weiteren Prüfungen am auf 0.09 mm abgeseibten Filler durchgeführt. Von den weniger gebräuchlichen Verfahren wird ein Kurzbeschreibung aufgeführt. Soweit nicht offensichtlich, soll auch die Bedeutung und die Zielsetzung der Prüfmethode kurz erläutert werden.

Tabelle 3.1 An Fillern durchgeführte Prüfungen

Prüfung	Methode
Siebanalyse ≥ 0.09 mm	SN 670'810, EMPA-SOP 704, siehe 3.2.1
Korngrößenverteilung unter 0.09mm	Laserdiffraktometer, siehe unten
Kalkgehalt	Siehe 3.2.1
X-Ray Diffraktion	Siehe 3.2.2

3.2.1 Siebanalyse

Im Forschungsauftrag wurde nur der Anteil der Filler unter 0.09mm eingesetzt. Die Filler wurden deshalb nach [SN 670'810] abgesiebt.

Korngrößenverteilung unter 0.09 mm

Die Korngrößenverteilung unter 0.09 mm prägt die Eigenschaften des Fillers entscheidend. Die Oberfläche des Fillers (und damit seine katalytische Wirkung) hängt direkt von ihr ab. Für die Bewertung der Ergebnisse ist deshalb diese Information wichtig. Zudem können so für die Fillerhersteller Hinweise gewonnen werden, wie eine zu grosse katalytische Wirkung der Filler reduziert werden kann, ohne eventuell seine versteifende zu sehr Wirkung zu beeinträchtigen.

Für die Bestimmung der Korngrößenverteilung wurde die Laserdiffraktion anstelle der Normprüfung gewählt. Der Laser-Partikel-Sizer basiert auf dem Prinzip der Streuung von Laserlicht an den Körnern. Aus der gemessenen Streuung wird die Korngrößenverteilung berechnet. Es handelt sich dabei um eine optische Korngrößenverteilung.

Die Methode liefert zwar deutlich von der Sedimentationsanalyse [SN679'818] oder Luftstrahlsiebung [EN933] abweichende Resultate, da sie auf einem anderen physikalischen Prinzip beruht; die Ergebnisse sind aber besser reproduzierbar und die Methode ist insbesondere weniger auf Störeinflüsse empfindlich als die Sedimentationsanalyse. Die Laserdiffraktion erlaubt zudem ein wesentlich verfeinertes Erfassen der Korngrößenverteilung.

3.2.2 Zusammensetzung

Karbonatgehalt (Kalk und Dolomit)

Der Karbonatgehalt wurde nach Passon als Lösliches in Salzsäure bestimmt.

Übrige Mineralien

Die Mineralien, die sich durch Salzsäure nicht auflösen liessen, wurden mit Röntgendiffraktion (XRD) bestimmt. Die XRD-Analyse gestattet eine qualitative Bestimmung des Mineralgehalts und eine relative Abschätzung der vorhandenen Menge.

3.3 Bindemittel

An den Bindemitteln wurden die in Tabelle 3.2 aufgeführten Prüfungen nach den dort angegebenen Methoden durchgeführt. Von den weniger gebräuchlichen Verfahren wird ein Kurzbeschrieb aufgeführt. Soweit nicht offensichtlich, wird auch die Bedeutung und die Zielsetzung der Prüfmethode kurz erläutert.

Tabelle 3.2 An Bindemitteln durchgeführte Prüfungen

Prüfung	Methode
Penetration	[SN 671 740], entspricht neuerer [EN 1426]
Erweichungspunkt	[SN 671 743], entspricht neuerer [EN 1427]
komplexer Modul G^* , DSR	siehe 3.3.1 und 3.3.2

3.3.1 Bestimmung des komplexen Moduls bei einer Prüfbedingung

Die Bestimmung des Moduls bei einer Frequenz und Temperatur dient der präzisen Erfassung des Kennwertes, indem eine Mehrfachmessung durchgeführt wird und Ausreisser ausgeschlossen werden. Es zeigte sich bei Bestimmungen an Bindemittel und Mastix, dass die Mehrzahl der Ausreisser den ersten Messwert betrafen. Dies rechtfertigt die Mehrfachbestimmung und erlaubt die Elimination von Ausreissern (siehe Abbildung 4.1).

Die Bestimmung erfolgt unter Anlehnung an EMPA-SOP 2926 und [DSR95]. Die Probenvorbereitung geschieht mit geringfügigen Modifikationen gemäss der EMPA-SOP 2926.

Probenvorbereitung

Der Polylöffel ist in der Flamme des Bunsenbrenners kontrolliert während 15 bis 20 s zu erwärmen. Die benötigte Menge Bindemittelmenge ist auszusteichen und das Bindemittel schmelzen zu lassen. Dann wird das Bindemittel auf den Stempel gegossen, 2 Minuten abkühlen gelassen, eingebaut und nach Vorschrift in den Prüfzustand gebracht.

Prüfen

Das Prüfen erfolgt mit dem Gerät gemäss [DSR95] unter Verwenden des Prüfprogrammes gemäss Tabelle 3.3. Die Probe ist vor Start auf Temperatur bringen und 5 Minuten zu temperieren.

Tabelle 3.3 Prüfbedingungen für das Bestimmen der komplexen Moduln bei einer Prüfbedingung

Art der Prüfung	Oszillation
Art des Prüfprogrammes	automatisiert
Vorbereitung	55 °C, 60 s temperieren
Prüfvorgang 1	55 °C, Dehnung 0.01 [m/m], 54 Sekunden messen
Prüfvorgang 2	55 °C, Dehnung 0.1 [m/m], 54 Sekunden messen

Anmerkung: In den methodischen Untersuchungen wurde auch mit abweichender Temperatur gearbeitet.

Es werden in diesem Prüfprogramm der komplexe Modul während etwa 60 s bei einer Dehnung von 0.01 [m/m] und anschliessend gleich lang bei einem Strainlevel von 0.1 [m/m] bestimmt.

Auswertung

Die detaillierte Auswertung für eine Dehnung 0.01 [m/m] zeigte, dass bei kleinen Dehnungen keine Abhängigkeit von der Zeit vorlag, abgesehen davon dass der erste Messwert machmal ein Ausreisser ist. Die Auswertesoftware schliesst solche Ausreisser aus. Das Prinzip ist unter 4.1 beschrieben.

3.3.2 Bestimmung des komplexen Moduls als Funktion von Temperatur und Frequenz

Die Bestimmung der Module als Funktion von Temperatur und Frequenz diente der Charakterisierung der Bindemittel in einem breiten Temperatur- und Frequenzbereich, der alle in dieser Forschung untersuchten Kombinationen von Temperaturen und Frequenzen sowie den Bereich sommerlicher Oberflächentemperaturen abdeckt. Als Beispiel diene die Tabelle 5.20.

3.4 Herstellung von Mastix mit ungealtertem Bindemittel

Portionieren

Das Bindemittel wird im Anlieferungszustand kalt entnommen. Es wird in abgedeckter Pfanne bei 150 °C im Ofen aufgewärmt, bis es fließfähig ist und dann in beschriftete Gefässe eingewogen. Diese werden für die spätere Verwendung bei Raumtemperatur gelagert.

Die gewünschte Menge Bindemittel wird in gedeckter Dose und im Ofen auf 150 °C aufgewärmt (30±5 Minuten). Getrockneter Filler wird entsprechend der Rezeptur in eine Dose eingewogen und ebenfalls im Ofen gelagert. Die Heizplatte wird auf ca. 160 °C Oberflächentemperatur aufgewärmt. Die Dose mit Bindemittel wird dem Ofen entnommen, mit einer passenden Klammer so befestigt, dass sie Kontakt mit der Heizplatte hat; dann wird mit 80 bis 90 Umdrehungen pro Minute gerührt. Anschliessend wird der konditionierte Filler portionenweise während 3 bis 6 Minuten zugegeben. Am Rührer hängender Filler wird durch Klopfen in die Mischung befördert. Zweckmässigerweise wird der Rührer kurz abgestellt, um zu kontrollieren, dass der ganze Filler in die Mischung kommt. Zum Schluss wird 1 bis 2 Minuten mit ca. 130 Umdrehungen pro Minute gerührt.

Tabelle 3.4 Rührprogramm für das Homogenisieren der Filler-Bitumenmischungen

Rührvorgang	Rührerstellung	Umdrehungen pro Minute	Dauer
Sichtbarer Filler einmischen	Knapp über dem Gefässboden	80 bis 90	Bis kein Filler mehr sichtbar
Fertigmischen		ca. 130	1 bis 2 Minuten
Entlüften, homogenisieren		60	siehe unten
Abtropfen	völlig herausgezogen	0	5 bis 10 s

Homogenisieren

Es wird während 3 Minuten mit 60 Umdrehungen pro Minute weitergerührt.

3.5 Durchführen der Alterung und Herstellung des Mastix

Die Herstellung der zu untersuchenden Mischung aus Filler und Bitumen (Mastix genannt) erfolgt auf 2 Wegen:

Bei der Variante K, mit katalytischer Wirkung des Fillers bei der Alterungen wird das ungealterte Bindemittel fillerisiert, dann die Verhärtung nach RTFOT durchgeführt, anschliessend zum K-Mastix gemischt und dann mit PAV gealtert.

Bei der Variante O wird das Bindemittel im RTFOT verhärtet, dann im PAV gealtert und zuletzt zum O-Mastix gemischt.

3.5.1 Alterung der Bindemittels

Die Bindemittel werden nach [EN12607-1] im RTFOT and anschliessend nach [PAV97] gealtert.

3.5.2 Konditionieren des Fillers

Je 10 bis 15 g Filler werden im Ofen bei Temperaturen gemäss Angaben in Tabelle 3.5 aufgeheizt. Anschliessend wird der Filler im gedeckten Tiegel im Ofen bei 160 °C gelagert und am gleichen Tag gebraucht.

Tabelle 3.5 Temperaturen für das Konditionieren von Fillern

Art der Prüfung	Konditioniertemperatur	Konditionierdauer
Konditionieren des Fillers	220±25 °C	4±0.5 Minuten

3.5.3 Herstellen des fillerisierten Bindemittels

Das Bindemittel wird in gedeckten Gefässen im Ofen auf 150 °C aufgewärmt. Der in Tiegel eingewogene und konditionierte Filler wird ebenfalls im Ofen gelagert. Die Heizplatte wird auf ca. 170 °C Oberflächentemperatur aufgewärmt. Gemäss Messungen ergibt das im Mischgefäss eine Bindemitteltemperatur von 140 bis 150 °C. Das Bindemittelgefäss wird dem Ofen entnommen, mit einer passenden Klammer befestigt und mit 80 bis 90 Umdrehungen pro Minute gerührt. Dann wird der getrocknete Filler portionenweise während 3 bis 6 Minuten zugegeben. Es wird gemäss Tabelle 3.4 weitergerührt und anschliessend 41g in ein RTFOT-Glas eingewogen. Diese Mischung wird fillerisiertes Bindemittel genannt und direkt weiterverwendet.

3.5.4 Mischen des fillerisierten Bindemittels zu Mastix

Vom fillerisierten Bindemittel werden 30 g in das Mischgefäss eingewogen. Anschliessend wird dieses auf der aufgewärmten Heizplatte montiert und das Bindemittel während 2 Minuten wie oben gerührt. Dann wird während 3 bis 6 Minuten weiterer konditionierter Filler beigegeben (siehe Tabelle 3.4). Es wird gemäss Tabelle 3.4 weiter gerührt. 50 g der Mischung werden in eine PAV-Pfanne eingewogen. Die Alterung erfolgt wie oben erwähnt. Der Mastix wird anschliessend in eine Dose abgefüllt.

3.5.5 Herstellen von Mastix aus gealtertem Bindemittel

Vom gealterten Bindemittel werden 16 g in das Mischgefäss eingewogen und bei 150 °C temperiert. Anschliessend wird das Bindemittel während 3 bis 6 Minuten wie oben gerührt und getrockneter Filler beigegeben (siehe Tabelle 3.4). Dann wird gemäss Tabelle 3.4 weiter gerührt.

3.6 Prüfungen am Mastix

An den Mastixmischungen wurden die in Tabelle 3.6 aufgeführten Prüfungen nach den dort angegebenen Methoden durchgeführt. Wenn nicht anders erwähnt, werden die Prüfungen an den Mastix O und K durchgeführt. Soweit nicht offensichtlich, wird auch die Bedeutung und die Zielsetzung der Prüfmethode kurz erläutert.

Tabelle 3.6 An Mastix durchgeführte Prüfungen

Prüfung	Methode
komplexer Modul G^* , DSR	siehe 3.6.1
Aschegehalt (als Gehaltskontrolle)	SN 671'719, EMPA-SOP 178
Infrarotspektroskopie	siehe 3.6.2
Ermüdungsverhalten des Mastix	siehe 3.6.3

3.6.1 Bestimmen des komplexer Moduls an Mastix

Probenvorbereitung

Die Probe wird dem Mastix kalt entnommen, im Polylöffel aufgeschmolzen und darin mit Glasstab umgerührt, um die Homogenität sicher zu stellen. Anschliessend wird der Mastix rasch auf einen vorbereiteten 25mm-Stempel gegossen.

Messen des Moduls

Der Modul wird mit einem Bohlin Dynamic Shear Rheometer während 50 s bei 55 °C, Hz, und einer Dehnung von 0.01 [m/m] bestimmt. Abbildung 4.1 zeigt den Verlauf einer solchen Messung.

3.6.2 Infrarotspektroskopie

Das Bindemittel aus dem Mastix wurde extrahiert, sodass eine Lösung mit annähernd 10 Masse-% Bindemittel erhalten wurde, aus der durch Eindampfen eine dünne Schicht von Bindemittel erhalten wurde. Aus den erhaltenen Spektren wurde die Banden bei 1260, 750 und 720 cm^{-1} für die Auswertung ausgewählt, weil sie am ausgeprägtesten auf Alterung ansprechen. Die Bande bei 1455 cm^{-1} reagierte nicht auf Oxidation und diente deshalb als Referenz. Es lässt sich dann, gezeigt am Beispiel I_{750} , der Index nach Gleichung (3) berechnen:

$$I_{750} = \frac{A_{750K} \cdot A_{1455O}}{A_{750O} \cdot A_{1455K}} \quad (3)$$

A_{750K} : Absorption bei 750 cm^{-1} des Bindemittels aus Mastix K

A_{750O} : Absorption bei 750 cm^{-1} des Bindemittels aus Mastix O

A_{1455K} : Absorption bei 1455 cm^{-1} des Bindemittels aus Mastix K

A_{1455O} : Absorption bei 1455 cm^{-1} des Bindemittels aus Mastix O

Wie die Tabelle 3.7 zeigt, kann kein Zusammenhang zwischen dem mechanisch bestimmten Alterungsindex und den spektroskopischen Indexen erkannt werden. Zwischen den spektroskopischen Indexen I_{1260} und I_{750} besteht zudem kein klarer Zusammenhang; der Index I_{720} weicht nicht wesentlich von 1 ab. Infrarotspektroskopie wurde aufgrund dieser Ergebnisse nicht weiter verfolgt.

Tabelle 3.7 Vergleich der Änderung der Absorption bei 1260, 750 und 720 cm⁻¹ mit dem Alterungsindex A

Filler	A	Referenz, 1455 cm ⁻¹		1260 cm ⁻¹		Index I ₁₂₆₀	750 cm ⁻¹		Index I ₇₅₀	720 cm ⁻¹		Index I ₇₂₀
		O	K	O	K		O	K		O	K	
1	0.93	0.1130	0.1170	0.0110	0.0055	0.4829	0.0900	0.0560	0.6009	0.0720	0.0690	0.9256
2	1.08	0.1180	0.1120	0.0070	0.0080	1.2041	0.0860	0.0650	0.7963	0.0730	0.0710	1.0247
3	1.08	0.1160	0.1210	0.0120	0.0200	1.5978	0.0840	0.1120	1.2782	0.0730	---	---
4	1.30	0.1250	0.1260	0.0110	0.0040	0.3608	0.0970	0.0730	0.7466	0.0860	0.0820	0.9459
5	1.21	0.1200	0.1290	0.0140	0.0040	0.2658	0.0900	0.0750	0.7752	0.0770	0.0830	1.0027
6	1.26	0.1150	0.1260	0.0170	0.0070	0.3758	0.0950	0.0800	0.7686	0.0710	0.0830	1.0670
7	1.03	0.1330	0.1160	0.0150	0.0060	0.4586	0.1160	0.0830	0.8204	0.0890	0.0700	0.9018
8	1.02	0.1220	0.1340	0.0210	0.0210	0.9104	0.1120	0.1040	0.8454	0.0820	0.0880	0.9771

3.6.3 Ermüdungsverhalten und Neigung zur Rissbildung

Für das Bestimmen der Neigung zum Ermüdungsverhalten standen 3 Prüfverfahren zur Auswahl:

- Ermüdungsprüfungen an Belägen mittels dem koaxialen Schubtest KAST-BEL [YOU.K97, SOK.K05]
- Prüfen der Neigung zur Rissbildung bei tiefen Temperaturen mittels dem koaxialen Schubtest KAST-BIN [GUB.R05]
- Bestimmen des Ermüdungsverhaltens an Mastix mit dem DSR [AIR.G04]

Die Vor- und Nachteile der drei Prüfverfahren sind in

Tabelle 3.8 zusammengestellt. Es wird nur eine grobe Wertung angegeben, wobei ++ wesentlicher Vorteil, + vorteilhaft, 0 neutral, - nachteilig und -- sehr nachteilig bedeutet.

Tabelle 3.8 Selektion der Verfahren für das Bestimmen der Empfindlichkeit auf Rissbildung

Verfahren:	Ermüdungsprüfung mit KAST-BEL an verdichtetem Mischgut	Rissemmpfindlichkeit mit KAST-BIN für Bindemittel	Ermüdungsprüfung mit DSR
Kriterien			
Realitätsnaher Prüfaufbau	hoch: ++	realitätsfremder Schichtdicke: 0	Probe kann als Mastixbrücke betrachtet werden: +
Realitätsnaher Mastixrezeptur	Reales Mischverhältnis: ++	Nur mit reduziertem Füllergehalt ist Eingiesesen in Form möglich: -	Reales Mischverhältnis: ++
Realitätsnaher Prüf-ablauf	Fixe Temperatur und Frequenz: 0	Temperaturprofil mit thermischer Spannung möglich: ++	Fixe Temperatur und Frequenz: 0
Störeinflüsse	Grobkorngerüst wesentlich: --	keiner: 0	keiner: 0
Aufwand:	sehr hoch: --	hoch: -	gering: +
Machbarkeit mit vorhandenen Materialien	nicht gesichert: -	gegeben: 0	gegeben: 0
Vergleichbarkeit mit anderen Studien	nicht gegeben: 0	nicht gegeben: 0	gegeben: +
Gesamtwertung	-1	0	+5

Während die Gesamtwertung für Ermüdungsprüfung mit KAST-BEL an verdichtetem Mischgut und für Rissemmpfindlichkeit mit KAST-BIN für Bindemittel etwa gleich ausfallen, weist die Ermüdungsprüfung mit DSR eindeutig die beste Bewertung auf. Somit wurde diese Verfahren gewählt. Damit konnte mit gleichen Mischungsverhältnissen und Konditionierungen wie bei der Alterungsprüfung gearbeitet werden. Die einen Millimeter dicke Probe zwischen den beiden Metallplatten von 8 mm Durchmesser kann zudem als Modell einer Mastixbrücke zwischen zwei Gesteinskörnern betrachtet werden. Die Reaktion auf eine Dauerbelastung entspricht den der Reaktion auf einen dichten Verkehr.

Die relativ zeitintensive Prüfung wurde nur an den Mischungen der Tabelle 6.3 durchgeführt. Die Mischungen wurden aufgrund der Ergebnisse der Prüfung auf Alterungsempfindlichkeit ausgewählt.

4 Auswerteverfahren

4.1 Mineralstoffe

Die Korngrößenverteilung mittels Lasergranulometrie liefert eine Siebkurve, die weder mit jener der Sedimentationsanalyse [SN671818] noch mit dem geltenden Luftstrahlsiebung [EN933] direkt verglichen werden kann (siehe Tabelle 5.17). Die für das Beurteilen der Filler hilfreichen Quantile in Tabelle 5.16 wurden mittels Interpolation berechnet.

4.2 Bindemittel

Bestimmen des komplexen Moduls

Die vom DSR-Gerät erzeugten binären Dateien enthalten die mechanischen Kennwerte als Funktion der Temperatur und Frequenz. Die Daten wurden aus den Dateien extrahiert und grafisch dargestellt. Die Darstellung der Module zeigt für die Mehrheit der Bindemittel im gemessenen Temperaturbereich weitgehend viskoses Verhalten. Masterkurven wurden deshalb nicht berechnet. Hingegen wurden Black-Diagramme erstellt, um die Abweichung vom ideal viskosen Verhalten aufzuzeigen.

4.3 Prüfungen am Mastix

Bestimmen des komplexen Moduls

In diesem Prüfverfahren enthält die binäre Datei die mechanischen Kennwerte als Funktion der Zeit. Wie Abbildung 4.1 als Beispiel zeigt, weicht der erste Modul in einzelnen Messserien vom Rest ab, was einerseits auf Einschwingvorgänge andererseits aber auch auf die Antwort des Materials auf den geänderten Belastungszustand zurückzuführen ist. Darüber hinaus konnten vereinzelt sonstige Ausreisser festgestellt werden. Es wurde deshalb ein Ausreisser-test nach Grubbs [ISO5725] durchgeführt. Messtemperatur, Modul und Phase wurden überprüft und zweifelhafte Werte eliminiert. Jeder als Ausreisser erkannte Wert zog dabei die Elimination des ganzen Datensatzes nach sich.

Als massgebender Wert wird der Mittelwert der nicht eliminierten Werte betrachtet. Das gilt für den komplexen Modul und die Phase. Die Mittelwerte von Temperatur und Dehnung wurden zu Kontrollzwecken berechnet.

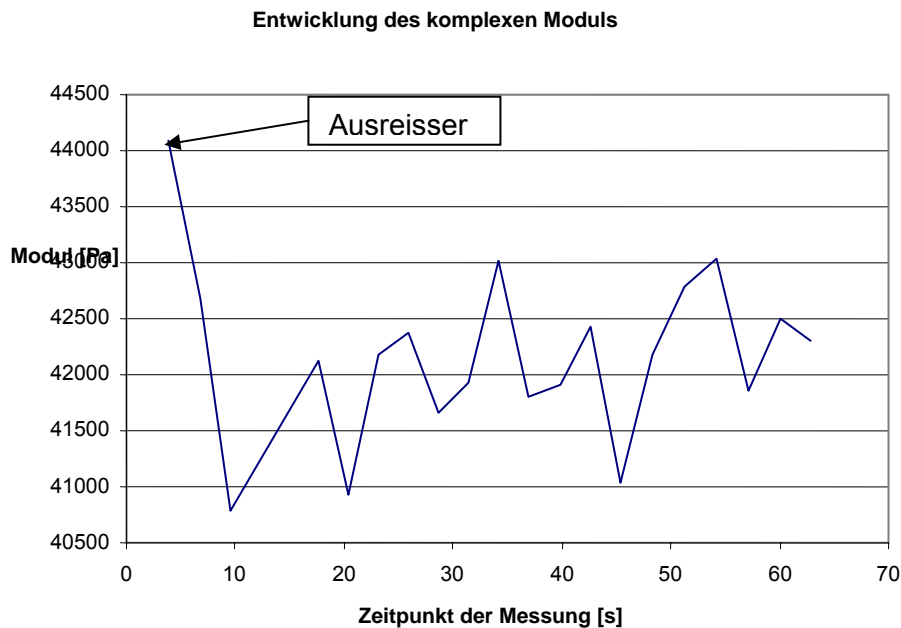


Abbildung 4.1 Entwicklung des Moduls des Mastix K1C (Filler 1, Bindemittel C) bei niedrigem Strainlevel 0.01 [m/m]. Der erste Wert ist eindeutig ein Ausreisser.

Abbildung 4.2 zeigt die gleiche Grafik für einer höheren Dehnung (0.1 [m/m]). Hier ist ein systematischer Abfall des Moduls als Folge der Belastung festzustellen. Nur der erste Wert entspricht ziemlich genau dem Modul bei niedriger Scherung. Die Untersuchung der katalytischen Wirkung der Filler auf die Alterung wurde deshalb auf die Bestimmungen bei niedrigerer Dehnung abgestützt, bei der kein zeitabhängiges Verhalten zu beobachten war.

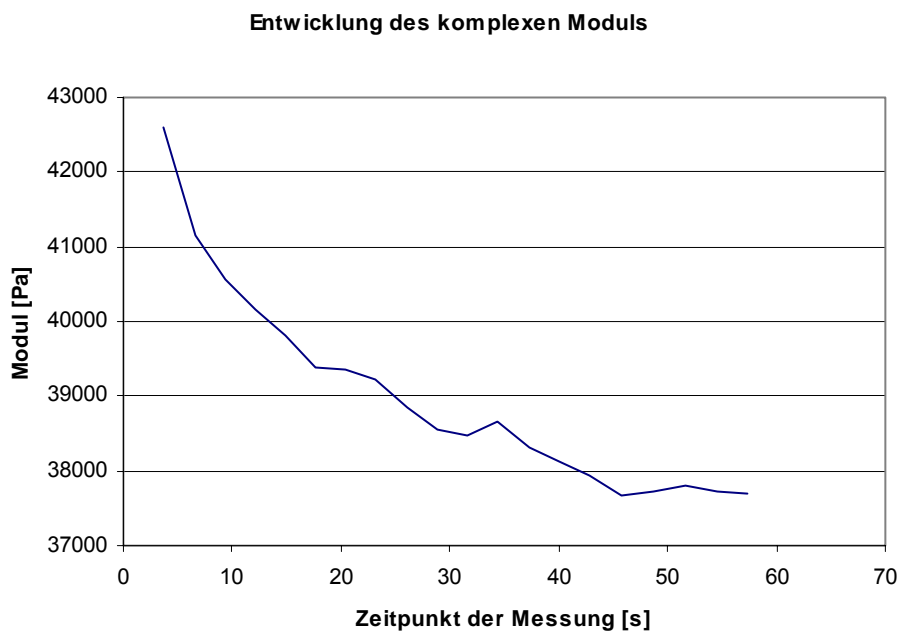


Abbildung 4.2 Entwicklung des Moduls des Mastix K1C (Filler 1, Bindemittel C) bei hohem Strainlevel 0.1 [m/m].

5 Ergebnisse der Untersuchung

5.1 Methodische Untersuchungen

Zielsetzung der in diesem Kapitel beschriebenen Versuche war die Weiterentwicklung der Verfahren und das Optimieren der Prüfbedingungen. Die dabei erhaltenen Ergebnisse werden nicht zu Bewertung von Materialien herangezogen.

Im Gegensatz zu anderen Teilen des Abschnittes 5 sind die Resultate nicht im Teil 6, „Schlussfolgerungen“ sondern laufend kommentiert. Nur so kann ein Verständnis des Fortganges der Forschung vermittelt werden.

5.1.1 Homogenität der Mischungen

Mischungen von Fillern mit ungealtertem Referenzbindemittel

Die Bestimmung des Füllergehaltes erfolgt als Aschebestimmung nach [SN 671'719]. Die Ergebnisse der verschiedenen Verfahren sind in den Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2 zusammengefasst.

Tabelle 5.1 Bestimmen des Füllergehaltes, Entnahme mit Polylöffel nach DSR-Prüfung

Sollwert Filler [Masse-%]	Bestimmung Füllergehalt [Masse-%]
60	58.79
63	62.47
66	65.03
68	67.96

Tabelle 5.2 Bestimmen des Füllergehaltes, Entnahme mit Polylöffel vor DSR-Prüfung

Sollwert Filler [Masse-%]	Bestimmung Füllergehalt [Masse-%]
40	37.24
50	46.40
55	50.14
60	51.08
65	56.31

Die Abweichungen sind eindeutig zu gross und wenig systematisch. Mastix mit ungealtertem Bindemittel neigt offensichtlich zu Entmischung.

Mischungen von Fillern mit gealtertem Referenzbindemittel, Rühren mit Glasstab

Der Mastix in den Dosen wurde nach dem Aufwärmen bei 160 °C mit Glasstab umgerührt.

Tabelle 5.3 Bestimmen des Füllergehaltes, Entnahme nach Rühren mit Glasstab

Bezeichnung Mastix	Sollwert Filler [Masse-%]	Einzelwerte Füllergehalt	Mittelwerte Füllergehalt
O6R55	55	46.24 und 45.93	46.08
O6R60	60	49.28 und 51.58	50.43
O6R65	65	57.92 und 54.90	56.41

Die Mittelwerte sind systematisch um 9 % zu tief. Wesentliche Anteile des Fillers gingen nicht verloren. Krasse Unterschiede zwischen den beiden Messungen liegen nicht vor.

Mischungen von Fillern mit gealtertem Referenzbindemittel, mechanisches Rühren

Der Mastix in den Dosen wurde nach dem Aufwärmen mechanisch gerührt. Das geschah mit einem Mischprogramm gemäss Tabelle 0.3. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.4 zusammengestellt.

Tabelle 5.4 Bestimmen des Füllergehaltes, Entnahme nach mechanischem Rühren

Bezeichnung Mastix	Sollwert Filler [Masse-%]	Einzelwerte Füllergehalt	Mittelwerte Füllergehalt
O6R55	55	52.89 und 52.69	52.79
O6R60	60	57.75 und 57.31	57.53
O6R65	65	62.16 und 62.16	62.16

Die Mittelwerte sind systematisch um ca 2 % zu tief. Das stimmt mit den Verlusten an einer Blindprobe aus Filler gut überein. Bei Mastix mit gealtertem Bindemittel tritt zwar Sedimentation beim Aufwärmen auf Vergiesstemperatur auf. Dies kann aber durch Rühren wieder rückgängig gemacht werden.

5.1.2 Mischverhältnis, bestimmt an U-Mastix

Mit Fillern 2, 5 und 6 und dem Referenzbitumen B 80/100 aus EMPA-Bestand wurde eine Versuchsserie zum Festlegen des Mischverhältnisses durchgeführt.

Beobachtungen bei der Herstellung

Bei geringer Füllerkonzentration ist das Erreichen einer homogenen Mischung schwieriger. Das spricht für eine höhere Konzentration. Die Herstellung einer Mischung mit 68 Masse-% Filler erwies sich als schwierig und wurde nicht weiter verfolgt. Beim Prüfen von Mastix mit 65 Masse-% Filler konnte beobachtet werden, dass der aus dem Messspalt austretende Filler körnig aussah, was auf Inhomogenitäten im Bereich von 0.1 bis 0.3 mm hinweist. Bei Konzentrationen wesentlich über 60 Masse-% muss deshalb mit einem erhöhten Messfehler, eventuell auch systematischer Art gerechnet werden. Da der maximale Zielwert von 18 kN erreicht war, wurde die Prüfung bei 65 Masse-% für diesen Filler abgebrochen.

Die Abhängigkeit des Moduls von der Füllerkonzentration ist für den Filler 6 in Tabelle 5.5 dargestellt.

Tabelle 5.5 Bestimmen des komplexen Moduls [kPa] an Mastix aus Filler 6 und ungealtertem Referenzbindemittel

Füllergehalt	1. Messung Modul [kPa]		2. Messung Modul [kPa]		Differenz Messung 1 & 2	
	Anfang	Ende	Anfang	Ende	Anfang	Ende
0	2.508	2.516	---	---	---	---
40	8.171	8.171	6.443	6.411	-21.2 %	-21.5 %
50	10.934	10.978	9.820	9.646	-10.2 %	-12.1 %
55	14.973	14.190	13.604	13.459	-9.1 %	-5.2 %
60	17.707	17.539	18.413	18.091	4.0 %	3.2 %

Grosse Differenzen sind bei Konzentrationen vom 40 und 50 Masse-% Filler festzustellen, was auf einen starken Einfluss der Sedimentation hinweist. Der ideale Konzentrationsbereich liegt messtechnisch betrachtet bei 55 bis 60 Masse-%. Die Untersuchung wurde deshalb auf die Filler 2 und 5 ausgedehnt, die Ergebnisse finden sich in Tabelle 5.6. Die Gehalte an Filler für verschiedene Zielwerte der Moduln sind in Tabelle 5.7 angegeben.

Tabelle 5.6 Bestimmen des komplexen Moduls [kPa] an Mastix aus Filler 2, 5 und 6 und Referenzbindemittel

Fillergehalt Masse-%	Module Filler 2 [kPa]	Module Filler 5 [kPa]	Module Filler 6 [kPa]
0	2.510	2.510	2.510
40	7.307		
50	10.377		8.581
55	14.289	13.054	11.327
60	18.060	16.081	16.581
65		18.703	18.784

Tabelle 5.7 Fillerkonzentration für Zielwerte von 15 bis 18 kPa für den komplexen Modul

Zielmodul [kPa]	Module Filler 2 [Masse-%]	Module Filler 5 [Masse-%]	Module Filler 6 [Masse-%]
15	56	58	58
16	57	60	59
17	59	62	61
18	60	64	63

Der aus theoretischen Überlegungen abgeleitete Bereich für den Zielwert für den Modul von 15 bis 25 kPa kann nach diesen Versuchen auf 15 bis 18 kPa eingeschränkt werden. Darüber hinaus ist festzustellen, dass der theoretisch abgeleitete Zielmodul mit einer praxisnahen Fillerkonzentration zusammenfällt.

5.1.3 Mischverhältnis, bestimmt an O-Mastix, Vorversuch mit Fillern 2 und 6

Mit Fillern 2 und 6 und dem Referenzbitumen B 80/100 aus EMPA-Bestand wurde ein weiterer orientierender Versuch unternommen, diesmal aber wurde gealtertes Bindemittel eingesetzt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.8 zusammengefasst.

Bebachtungen: Die Herstellung eines Mastix mit 65 Masse-% Filler und sein Prüfen erwiesen sich auch in diesem Fall als anspruchsvoll. Die Ergebnisse sind dementsprechend unstim- mig. Bei Konzentrationen wesentlich über 60 Masse-% muss deshalb mit einem erhöhten Messfehler, eventuell auch systematischer Art gerechnet werden.

Tabelle 5.8 Komplexer Modul [kPa] an Mastix mit Filler 2 und 6 als Funktion des Füllergehaltes

Bezeichnung Mastix	Fillergehalt [Masse-%]	komplexer Modul [kPa]	Phase [°]
O2R55	55	154.644	67.0
O2R60	60	238.783	62.3
O2R65	65	207.881	64.5
O6R55	55	127.984	67.9
O6R60	60	173.262	67.1
O6R65	65	224.921	65.5

Somit ergibt sich für einen Zielwert von 150 kPa für den Filler 2 ein Zielgehalt von 55 Masse-% und für den Filler 6 ein Zielgehalt von 58 Masse-%. Wiederum erweist es sich, dass der Zielwert mit einer praxisrelevanten Konzentration des Mastix übereinstimmt.

5.1.4 Bestimmen des Zielgehaltes an Filler für einen Zielmodul von 150kPa bei 52°C

Mit überarbeiteter Verfahrensvorschrift wurden Mischungen von allen Fillern und dem PAV-gealtertem Bitumen B mit je 55, 60 und 65 Masse-% Filler hergestellt. Daran wurde der komplexe Modul bei 52 °C bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.9 zusammengestellt. Der Zielgehalt basiert auf einem Zielwerte des Moduls von 150 kPa. Der Vergleich mit früheren Bestimmungen ist in Tabelle 5.10 zusammengefasst.

Tabelle 5.9 Versuche zum Bestimmen des Zielgehaltes für den komplexen Modul 150 [kPa]

Filler	komplexer Modul [kPa]			Zielgehalt Filler [Masse-%]
	55 Masse-%	60 Masse-%	65 Masse-%	
1	132.449	170.219	230.036	57
2	147.120	183.591	262.660	55
3	122.234	176.317	254.182	58
4	125.432	170.372	219.003	58
5	132.383	171.170	217.202	57
6	115.464	146.230	225.336	60
7	130.127	180.816	229.574	57
8	113.463	158.765	177.980	59

Tabelle 5.10 Vergleiche der verschiedenen, ermittelten Zielgehalte [Masse-%]

Filler	Versuchsserie an U-Mastix	Versuchsserie 1 an O-Mastix	Versuchsserie 2 an O-Mastix
2	56	55	55
5	58		57
6	58	58	60

Die Übereinstimmungen können in Anbetracht der Tatsache, dass das Verfahren laufend fortentwickelt wurde, als hinreichend betrachtet werden.

5.1.5 Bestimmen des Zielmoduls und Zielgehaltes an Filler für DSR-Messungen bei 55°C

Um nicht zu grosse Messfehler wegen zu hohen Modulwerten in Kauf nehmen zu müssen wurden die Messungen bei 55 °C wiederholt. Zugleich wurde am geprüften Mastix der Fillergehalt durch Veraschen bestimmt. Diese Untersuchungen wurden nur noch Konzentrationen von 55 und 60 Masse-% Filler durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.11 zusammengestellt. Im Vergleich zur Tabelle 5.12 ergibt sich ein sinnvoller Zielmodul von 125 [kPa], auf dem der Zielgehalt basiert.

Tabelle 5.11 Ergebnisse des Bestimmens des Zielgehaltes für den komplexen Modul 125 [kPa]

Filler	komplexer Modul 1. Messserie		komplexer Modul 2. Messserie		Fillergehalt		Zielgehalt Filler
	55 Masse-%	60 Masse-%	55 Masse-%	60 Masse-%	55 Masse-%	60 Masse-%	
	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[Masse-%]	[Masse-%]	[Masse-%]
1	92	134	97	114	43.5	43.8	58, 62
2	128	159	120	159	53.3	57.8	54, 55
3	110	150	104	144	52.0	56.1	56, 57
4	110	123	100	122	49.8	54.3	59, 60
5	97	124	99	116	51.2	58.4	59, 61
6	95	119	90	113	49.2	56.1	60, 61
7	116	139	108	133	53.3	50.4	56, 57
8	96	133	91	111	45.2	50.6	58, 62

Die Resultaten zeigen, dass die Masse der Probe (knapp 500 mg) für eine verlässliche Bestimmung des Füllergehaltes zu gering war. Die Modulwerte dagegen stimmen wesentlich überein, auffällige Unterschiede von mehr als 10% zeigen sich nur bei folgenden Werten (kursiv dargestellt)

- Filler 1, 60 Masse-%, wahrscheinlich 1. Serie, Wert zu hoch
- Filler 8, 60 Masse-%, wahrscheinlich 1. Serie, Wert zu hoch

Insgesamt sind somit nur 2 von 32 Werten klar falsch, und zwar immer für Mastix mit 60 Masse-% Filler. Diese Konzentration stellt somit die obere Grenze für eine verlässliche Modulbestimmung dar.

Tabelle 5.12 fasst die ermittelten Zielgehalte für alle untersuchten Filler zusammen. Es ergibt sich ein enges Band von 57 bis 59 Masse-%. Da die Untersuchung an O-Mastix durchgeführt wurde, und für K-Mastix höhere Module erwartet werden, würde sich für diesen das Band leicht zu tieferen Zielgehalten verschieben. Somit wurde entschieden, die Bestimmung des Alterungsindex mit einem Füllergehalt von 57 Masse-% durchzuführen.

Tabelle 5.12 Zusammenstellung der Zielhalte in Masse-%

Filler	Bindemittel ungealtert	Bindemittel gealtert				Mittelwert
		150 kPa/52 °C		125 kPa/55 °C		
		1. Messung	2. Messung	1. Messung	2. Messung	
1		57		58		57.5
2	56	55	55	54	55	55
3		58		56	57	57
4		58		59	60	59
5	58	57		59	61	59
6	58	58	60	60	61	59.5
7		57		56	57	57
8		59		58		58.5

5.1.6 Bestimmen des komplexen Moduls nach Zentrifugieren des gealterten Mastix

Zur Abklärung wurde der Sedimentation bei normalen Lagerungsbedingungen (noch warme Probe bei Raumtemperatur) wurde ein nach Mischen im Zentrifugegefäss abgefüllter Mastix in der Ultrazentrifuge bei 6000 rpm während einer Stunde zentrifugiert. Aus dem Zentrifugegefäss wurde eine oberflächennahe Probe entnommen und der Füllergehalt wie der Modul bestimmt. Die Ergebnisse dieser Versuchsserie sind in Tabelle 5.13 zusammengestellt.

Tabelle 5.13 Füllergehalt und mechanische Eigenschaften von K-Mastix nach Zentrifugieren

Fillerkonzentration [Masse-%]	gefundener Gehalt an Filler [Masse-%]	Komplexer Modul [kPa]
25	22.8	94.7
30	27.45	127.6
35	32.62	142.4
40	37.58	175.1

Aus diesem Versuch lassen sich klar zwei entscheidende Folgerungen ziehen:

- Selbst bei einer mit drastischen Mitteln erzwungenen Sedimentation lassen sich keine entscheidende Füllerverluste in den obersten Schichten feststellen. Sedimentation kann kein entscheidendes Problem darstellen.
- Die in Tabelle 5.11 aufgeführten Unterschiede im Füllergehalt hängen deshalb mit der Durchführung der Aschebestimmung an kleinen Mengen zusammen.

5.1.7 Evaluation der Prüfbedingungen für die Ermüdungsprüfung an Mastix

Die Ermüdungsprüfungen wurden bei der Frequenz 10 Hz durchgeführt. Eine noch höhere Frequenz wurde wegen dem Risiko einer zu ausgeprägten Erwärmung durch den Schwingvorgang selber verworfen. Bei kleineren Frequenzen konnte die gewünschte Zyklenzahl nicht innert nützlicher Frist erreicht werden.

Bei einer Dehnung von 0.01 [m/m] wurde im Rahmen der Untersuchung der katalytischen Wirkung gar keine, bei einer Dehnung von 0.1 [m/m] eine dramatischer Abnahme des Moduls mit der Zeit beobachtet, wie Abbildung 4.2 zeigt. Um eine primär durch die mechanische Belastung verursachte Reduktion des Moduls zu vermeiden, musste deshalb eine Scherung im Bereich von 0.01 [m/m] und nicht 0.1 [m/m] gewählt werden. Da 0.01 [m/m] die untere Operationsgrenze des Gerätes darstellte, wurde deshalb die doppelte Scherung von 0.02 [m/m] gewählt. Sie zeigt eine geringe bis vernachlässigbare Abnahme in den ersten Zyklen.

Abklärende Messungen wurden bei 25, 30 und 40 °C durchgeführt. Bei 25 °C konnte das Gerät die gewünschte Scherung nicht mit allen Mischungen erreichen. Damit war die Vergleichbarkeit nicht gewährleistet. Deshalb wurde diese Temperatur ausgeschlossen. Beobachtungen mit einer Lupe während dem laufenden Versuch bei 40 °C deuteten in einem Fall (Abbildung 5.3) auf eine Verformung des Mastixzylinders hin. Es handelt sich um den Mastix O5D, der auch eine schnelle Modulabnahme und eine unregelmässige Entwicklung in der Phase aufwies. Es wurde deshalb nur die Serie mit 30 °C weitergeführt; die Ergebnisse sind weiter unten aufgeführt.

Die Ergebnisse der abklärenden Versuche bei 40 °C sind in den Abbildung 5.1 bis Abbildung 5.3 zusammengestellt.

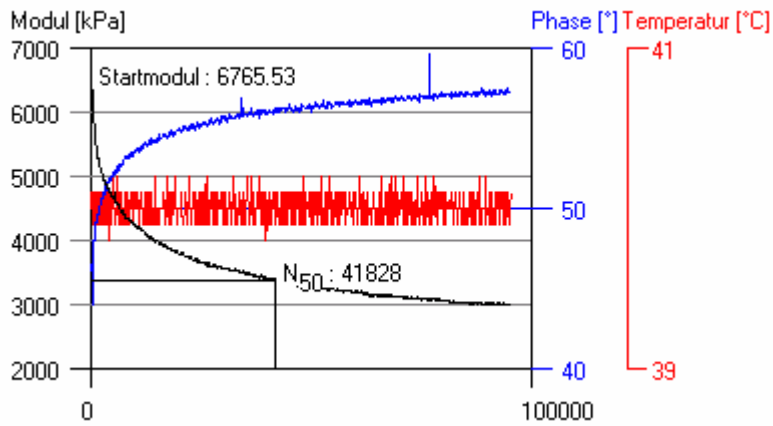


Abbildung 5.1 Ermüdungsverhalten von Mastix O1G, 40 °C

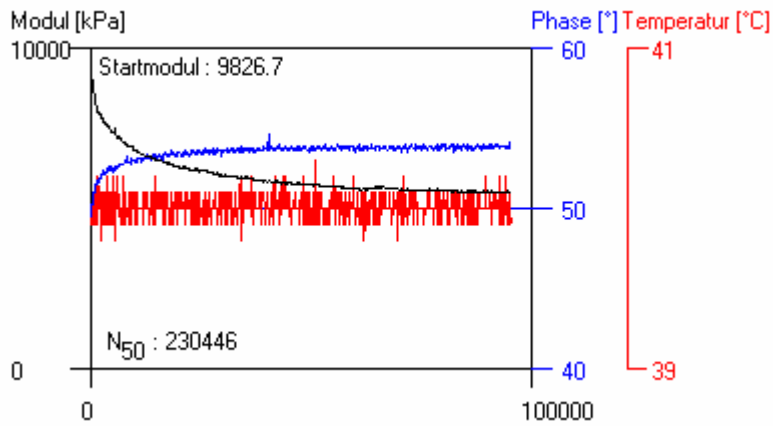


Abbildung 5.2 Ermüdungsverhalten von Mastix O1F, 40 °C

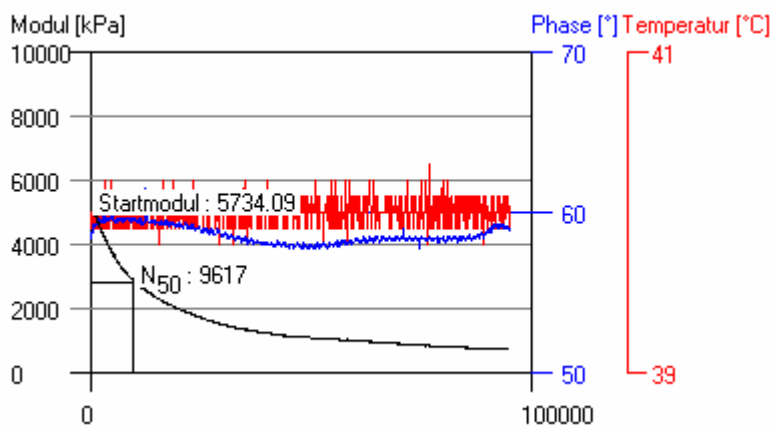


Abbildung 5.3 Ermüdungsverhalten von Mastix O5D, 40 °C

5.2 Mineralstoffe

Die Untersuchung der Filler wurde zu einer Zeit durchgeführt, als die Norm [SN 760'760] noch in Kraft war. Sie lehnte sich deshalb insbesondere bezüglich Petrografie an diese Norm an.

5.2.1 Karbonatgehalt

Der Karbonatgehalt wurde als Lösliches in Salzsäure bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.14 zusammengestellt.

Tabelle 5.14 Karbonatgehalt der Filler 1 bis 8

Probe	Karbonatgehalt (Masse-%)
Filler 1	96 ± 5
Filler 2	4 ± 5
Filler 3	20 ± 5
Filler 4	58 ± 5
Filler 5	34 ± 5
Filler 6	52 ± 5
Filler 7	65 ± 5
Filler 8	100 ± 5

5.2.2 Übrige Mineralien

Die relative Abschätzung des Gehaltes der sich nicht in Salzsäure löslichen Anteile der Filler ist in Tabelle 5.15 zusammengestellt. Bei Montmorillonit, Kaolinit und Illit handelt es sich um Tonmineralien.

Tabelle 5.15 Mineralische Zusammensetzung der nicht in Salzsäure löslichen Anteile der Filler 1 bis 8

Probe	Quarz	Feldspat	Muskowit	Chlorit	Montmorillonit	Kaolinit	Illit
Filler 1	●	◻	◻	-	-	●	-
Filler 2	●	●	-	-	-	-	-
Filler 3	●	◻	◻	◻	-	-	◻
Filler 4	●	◻	-	-	-	-	-
Filler 5	●	◻	-	-	-	-	-
Filler 6	●	◻	-	◻	-	-	-
Filler 7	●	◻	-	-	◻	-	-
Filler 8	●	◻	◻	-	◻	-	◻

- = Hauptgemengeteil
- ◻ = Nebengemengeteil
- ◻ = Spuren
- = nicht nachweisbar

5.2.3 Korngrößenverteilung

Die Quantile der Korngrößenverteilung sind in Tabelle 5.16 zusammengestellt. Die Korngrößenverteilungen sind in Tabelle 5.17 aufgeführt.

Tabelle 5.16 Quantile der Korngrößen [Mikrometer] der Filler 1 bis 8

Filler	10	25	50	75	90
	[Masse-%]	[Masse-%]	[Masse-%]	[Masse-%]	[Masse-%]
1	3.0	10.1	47.9	91.9	---
2	3.9	10.1	29.4	61.1	94
3	3.8	9.6	25.2	52.2	79
4	3.8	10.9	29.4	59.3	91
5	21.1	56.6	81.0	86.8	---
6	5.0	14.8	40.6	69.1	94
7	5.3	13.8	28.8	50.5	74
8	3.5	7.2	16.6	33.5	54

Tabelle 5.17 Korngrößenverteilung der Filler 1 bis 8

Korngrösse d	Filler 1	Filler 2	Filler 3	Filler 4	Filler 5	Filler 6	Filler 7	Filler 8
[mm]	[Masse-%]	[Masse-%]	[Masse-%]	[Masse-%]	[Masse-%]	[Masse-%]	[Masse-%]	[Masse-%]
0.101	80.4	92.0	95.8	92.8	72.0	92.7	96.8	99.3
0.083	70.1	86.4	91.5	87.5	52.6	84.9	93.1	98.0
0.068	61.2	79.4	85.3	80.7	35.6	74.4	87.4	95.4
0.046	49.0	64.5	70.4	65.4	18.6	54.6	71.1	85.7
0.031	41.5	51.6	56.6	51.6	13.1	42.0	53.3	72.5
0.0209	35.4	40.8	44.4	40.1	9.9	32.4	37.4	58.1
0.0172	32.5	36.0	38.9	35.0	8.6	28.0	30.9	51.1
0.0095	24.1	23.9	24.8	22.6	5.2	17.6	17.4	32.5
0.0052	16.5	14.1	14.2	13.7	2.9	10.4	9.9	17.6
0.0043	14.1	11.4	11.4	11.3	2.4	8.6	8.1	13.7
0.0029	9.7	6.8	7.0	7.3	1.5	5.6	5.2	7.6
0.0013	2.2	1.4	1.5	1.6	0.3	1.3	1.2	1.5

5.3 Bindemittel

5.3.1 Charakterisierung der Bindemittel

Tabelle 5.18 fasst die Eigenschaften der Bindemittel im Anlieferungszustand zusammen und stellt sie den Sorten gemäss Lieferung gegenüber. Tabelle 5.19 bewertet die Strassenbaubindemittel gemäss aktuell geltenden Normen [EN12591].

Tabelle 5.18 Eigenschaften der Bindemittel im Anlieferungszustand

Bindemittel	Sorte gemäss alter Norm	Penetration [EN1426]	Erweichungspunkt [EN1427]	Masseänderung [EN12607-1]
		[0.1 mm]	[°C]	[Masse-%]
A	B55/70	70	48.8	-0.08
B	B80/100	95	45.0	-0.06
C	B120/150	148	40.4	-0.11
D	B80/100	82	46	-0.01
F		42	72.4	+0.04
G		52	59.8	-0.13

Tabelle 5.19 Angaben des Lieferanten und abgeleitete Eigenschaften der Bindemittel im Anlieferungszustand

Bindemittel	Sorte gemäss [EN12591]	Konform zu Anforderung
A	50 - 70	Ja
B	70 -100	Ja
C	100 - 150	Ja
D	70 - 100	Ja

5.3.2 Mechanische Eigenschaften

Die Module und Phasen des Bindemittel A sind in Tabelle 5.20 und Tabelle 5.21 zusammengefasst. Die Module sind in Abbildung 5.4 dargestellt. Abbildung 5.5 zeigt das Black-Diagramm.

Tabelle 5.20 Komplexe Module des Bindemittels A als Funktion von Temperatur und Frequenz

Frequenz [s ⁻¹]	0.1	0.2	0.4	0.7	1	1.5	2	4	7	10
Temperatur [°C]	Komplexer Modul [kPa]									
40	10.26	19.54	33.80	53.45	71.56	94.29	116.80	193.60	289.20	371.00
45	4.61	8.56	15.56	24.50	32.91	45.44	56.72	97.42	146.50	192.00
50	2.15	4.00	7.58	11.87	15.79	22.60	28.67	50.18	77.73	103.00
55	0.93	1.76	3.36	5.48	7.57	10.81	13.98	24.80	39.24	52.65
60	0.44	0.82	1.63	2.69	3.70	5.32	6.88	12.66	20.34	27.49
65	0.20	0.38	0.75	1.28	1.77	2.59	3.33	6.20	10.14	13.91
70	0.11	0.21	0.41	0.69	0.96	1.43	1.86	3.55	5.80	7.94

Tabelle 5.21 Phasen des Bindemittels A als Funktion von Temperatur und Frequenz

Frequenz [s ⁻¹]	0.1	0.2	0.4	0.7	1	1.5	2	4	7	10
Temperatur [°C]	Phase [°]									
40	75.8	73.8	71.8	70.0	70.9	67.6	66.9	64.8	62.8	61.6
45	79.6	77.8	76.3	73.9	72.8	71.5	70.7	68.7	67.3	65.7
50	82.1	78.8	79.2	76.9	75.5	74.8	73.9	72.0	70.5	69.5
55	87.2	83.4	81.4	81.9	79.4	77.6	77.8	74.9	73.0	72.8
60	87.6	85.2	82.7	83.5	81.2	79.8	79.1	77.6	76.2	75.1
65	88.0	85.4	86.8	84.2	83.0	82.7	82.0	79.7	78.5	77.6
70	89.0	88.1	87.6	85.2	84.4	84.4	83.5	82.0	80.4	79.4

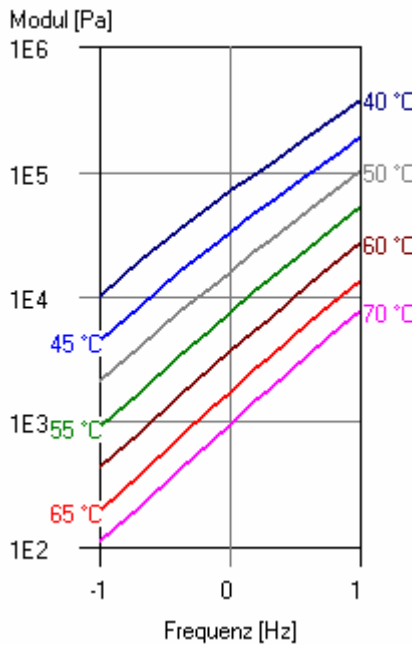


Abbildung 5.4 Module des Bindemittels A in Abhängigkeit der Frequenz für verschiedenen Temperaturen

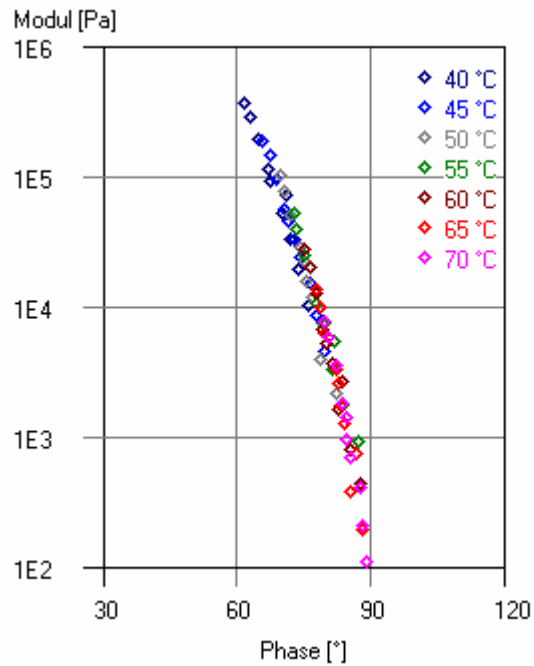


Abbildung 5.5 Black-Diagramm für das Bindemittel A

Die Module und Phasen des Bindemittels B sind in Tabelle 5.22 und Tabelle 5.23 zusammengefasst. Die Module sind in Abbildung 5.6 dargestellt. Abbildung 5.7 zeigt das Black-Diagramm.

Tabelle 5.22 Komplexe Module des Bindemittels B als Funktion von Temperatur und Frequenz

Frequenz [s ⁻¹]	0.1	0.2	0.4	0.7	1	1.5	2	4	7	10
Temperatur [°C]	Komplexer Modul [kPa]									
40	4.803	9.089	16.51	26.53	36.04	49.75	63.32	109.9	167.8	221.6
45	2.096	4.005	7.352	12.56	16.46	23.56	30.75	53.85	84.27	112.4
50	0.9474	1.807	3.452	5.642	7.914	11.26	14.38	26.44	42.05	56.34
55	0.438	0.8726	1.668	2.795	3.922	5.631	7.272	13.52	22.17	30.11
60	0.2279	0.4407	0.8752	1.477	2.058	3.035	3.986	7.382	12.3	16.78
65	0.1132	0.2206	0.4421	0.7847	1.087	1.584	2.07	4.024	6.68	9.355
70	0.0588	0.1188	0.2356	0.4081	0.5803	0.8624	1.146	2.221	3.706	5.19

Tabelle 5.23 Phasen des Bindemittels B als Funktion von Temperatur und Frequenz

Frequenz [s ⁻¹]	0.1	0.2	0.4	0.7	1	1.5	2	4	7	10
Temperatur [°C]	Phase [°]									
40	81.8	79.1	77.3	75.9	74.1	73.8	72.9	71.3	69.6	68.0
45	83.3	83.9	80.4	77.5	77.0	76.1	75.2	73.6	72.5	71.4
50	85.0	82.8	83.0	81.3	80.5	79.3	79.0	75.9	75.4	74.5
55	86.7	85.5	84.4	86.5	83.6	82.0	80.9	79.0	78.0	76.8
60	87.6	87.8	86.9	85.0	84.2	83.4	84.0	81.1	80.4	79.8
65	88.0	88.9	87.6	86.0	84.7	85.5	84.3	83.9	82.5	81.8
70	89.5	89.4	88.4	88.4	88.2	87.1	86.3	85.0	84.5	84.6

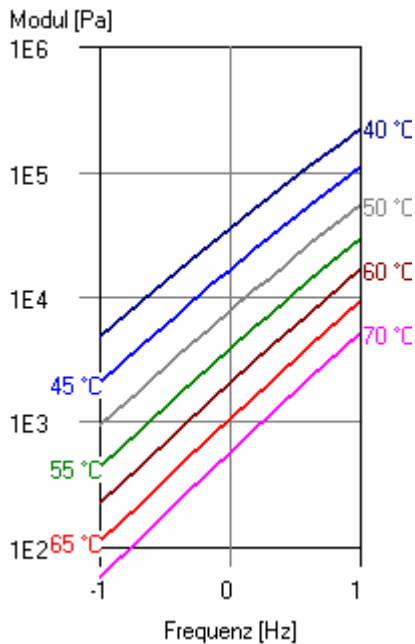


Abbildung 5.6 Module des Bindemittels B in Abhängigkeit der Frequenz für verschiedenen Temperaturen

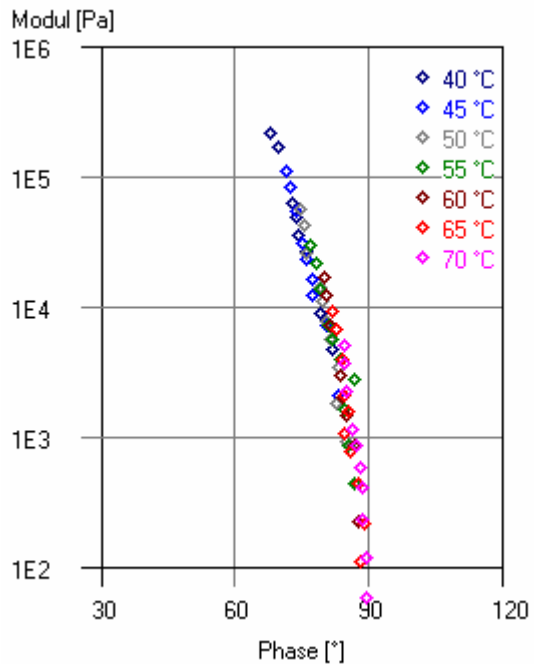


Abbildung 5.7 Black-Diagramm für das Bindemittel B

Die Module und Phasen des Bindemittels C sind in Tabelle 5.24 und Tabelle 5.25 zusammengefasst. Die Module sind in Abbildung 5.8 dargestellt. Abbildung 5.9 zeigt das Black-Diagramm.

Tabelle 5.24 Komplexe Module des Bindemittels C als Funktion von Temperatur und Frequenz

Frequenz [s ⁻¹]	0.1	0.2	0.4	0.7	1	1.5	2	4	7	10
Temperatur [°C]	Komplexer Modul [kPa]									
40	0.7852	1.488	2.887	4.88	6.686	9.93	12.75	23.98	39.36	54.53
45	0.3797	0.7605	1.487	2.557	3.557	5.247	6.881	13.07	21.95	30.45
50	0.1723	0.3404	0.6739	1.165	1.626	2.407	3.231	6.089	10.29	14.39
55	0.0846	0.1703	0.341	0.5777	0.8109	1.207	1.623	3.121	5.307	7.479
60	0.0492	0.1	0.1984	0.3363	0.4742	0.6962	0.92	1.793	3.041	4.253
65	0.0252	0.0507	0.1006	0.1842	0.2668	0.4078	0.5446	1.058	1.83	2.563
70	0.0149	0.0304	0.0629	0.1104	0.1586	0.2242	0.2829	0.5586	0.9886	1.426

Tabelle 5.25 Phasen des Bindemittels C als Funktion von Temperatur und Frequenz

Frequenz [s ⁻¹]	0.1	0.2	0.4	0.7	1	1.5	2	4	7	10
Temperatur [°C]	Phase [°]									
40	86.9	86.0	84.3	86.0	82.1	82.2	82.1	80.7	79.8	78.7
45	87.9	87.8	87.2	87.6	83.7	84.4	84.0	82.8	81.9	81.2
50	89.7	88.8	87.9	87.7	86.2	86.0	85.5	84.3	82.9	82.9
55	89.7	89.9	87.4	88.2	86.0	87.1	87.0	85.3	84.3	83.7
60	89.4	89.5	89.3	89.1	88.4	88.3	87.9	86.3	85.9	85.1
65	89.5	89.8	89.0	89.2	89.0	88.9	89.6	88.9	89.0	88.7
70	89.9	89.7	89.9	89.8	89.6	89.7	87.8	86.9	86.0	86.5

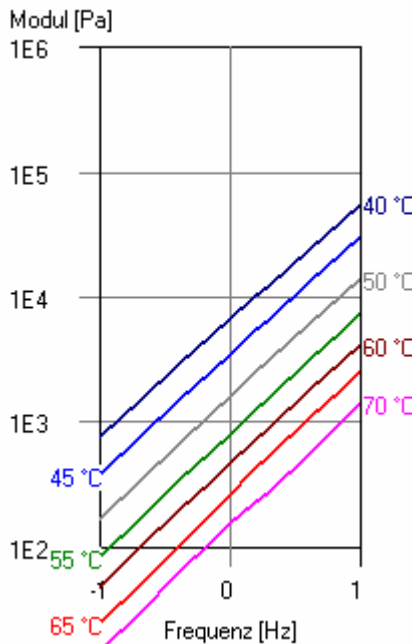


Abbildung 5.8 Module des Bindemittels C in Abhängigkeit der Frequenz für verschiedenen Temperaturen

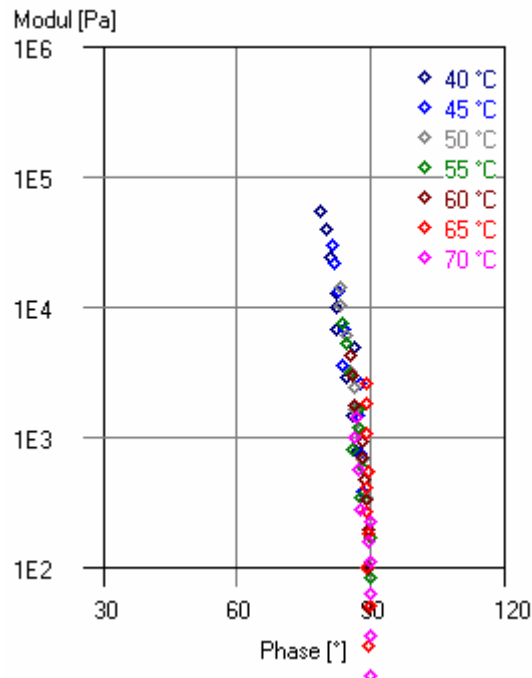


Abbildung 5.9 Black-Diagramm für das Bindemittel C

Die Module und Phasen des Bindemittels D sind in Tabelle 5.26 und Tabelle 5.27 zusammengefasst. Die Module sind in Abbildung 5.10 dargestellt. Abbildung 5.11 zeigt das Black-Diagramm.

Tabelle 5.26 Komplexe Module des Bindemittels D als Funktion von Temperatur und Frequenz

Frequenz [s ⁻¹]	0.1	0.2	0.4	0.7	1	1.5	2	4	7	10
Temperatur [°C]	Komplexer Modul [kPa]									
40	6.331	11.75	21.91	35.11	47.79	66.34	85.52	147.2	228.2	299.7
45	2.68	5.132	9.73	15.63	21.42	30.91	39.46	70.48	112.2	151
50	1.172	2.279	4.365	7.283	9.916	14.42	18.63	34.15	54.84	74.26
55	0.5549	1.094	2.109	3.577	5	7.29	9.388	17.66	28.91	39.65
60	0.278	0.5759	1.111	1.898	2.666	3.9	5.054	9.689	15.96	22.12
65	0.134	0.2799	0.5419	0.9461	1.352	1.954	2.58	4.952	8.39	11.66
70	0.0679	0.1358	0.2716	0.4682	0.6624	1.012	1.328	2.594	4.405	6.203

Tabelle 5.27 Phasen des Bindemittels D als Funktion von Temperatur und Frequenz

Frequenz [s ⁻¹]	0.1	0.2	0.4	0.7	1	1.5	2	4	7	10
Temperatur [°C]	Phase [°]									
40	79.7	80.1	77.7	77.4	76.4	74.3	73.1	71.5	68.8	67.6
45	83.6	83.5	81.5	80.3	80.5	76.8	76.6	74.4	72.6	71.8
50	86.2	84.3	83.2	82.0	81.3	79.9	79.5	77.6	76.3	75.3
55	87.7	86.1	85.9	84.0	83.5	82.3	81.4	80.2	78.3	77.9
60	87.2	86.2	85.5	86.6	85.0	84.5	83.5	82.4	80.7	80.7
65	88.5	88.3	89.2	88.8	87.4	85.7	86.1	83.8	83.4	83.0
70	89.3	89.0	89.5	88.4	89.1	87.0	86.7	85.0	84.5	83.9

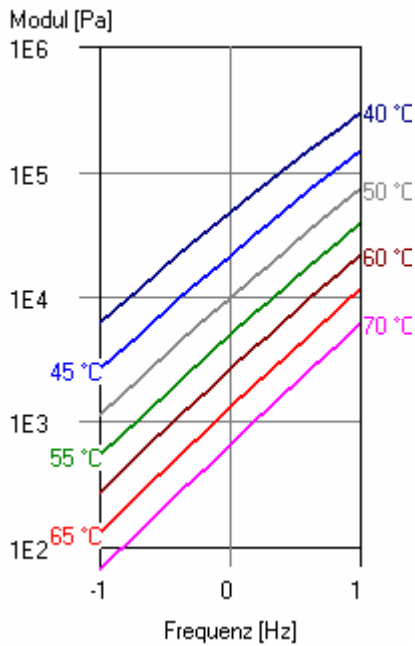


Abbildung 5.10 Module des Bindemittels D in Abhängigkeit der Frequenz für verschiedenen Temperaturen

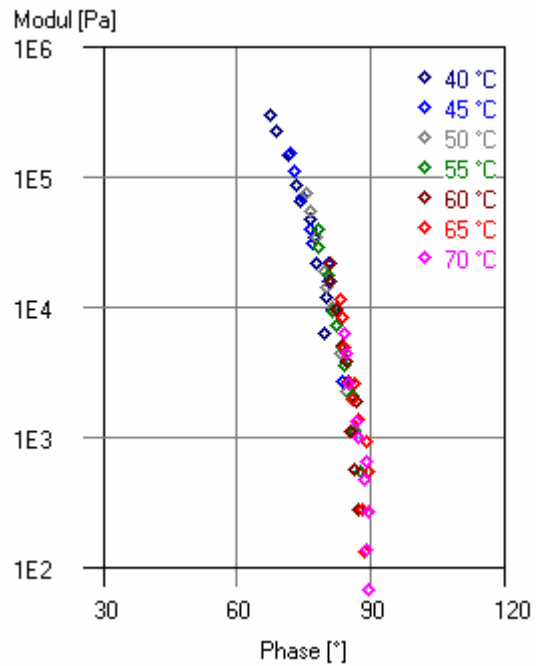


Abbildung 5.11 Black-Diagramm für das Bindemittel D

Die Module und Phasen des Bindemittels F sind in Tabelle 5.28 und Tabelle 5.29 zusammengefasst. Die Module sind in Abbildung 5.12 dargestellt. Abbildung 5.13 zeigt das Black-Diagramm.

Tabelle 5.28 Komplexe Module des Bindemittels F als Funktion von Temperatur und Frequenz

Frequenz [s ⁻¹]	0.1	0.2	0.4	0.7	1	1.5	2	4	7	10
Temperatur [°C]	Komplexer Modul [kPa]									
40	19.86	31.01	48.33	72.65	93.18	120.6	144.5	226.2	323.3	409.8
45	10.91	17	27.6	39.48	50.6	65.86	80.97	127.3	185.8	232.8
50	6.452	9.821	15.64	22.72	29.09	37.64	45.93	72.41	106.3	135.5
55	3.817	5.596	9.039	13.1	16.45	21.78	26.4	41.74	61.38	78.43
60	2.336	3.443	5.376	7.484	9.653	12.65	15.27	24.75	35.51	45.46
65	1.326	2.086	3.132	4.582	5.753	7.499	9.093	14.45	21.05	27.14
70	0.7372	1.151	1.861	2.597	3.262	4.314	5.234	8.357	12.36	15.65

Tabelle 5.29 Phasen des Bindemittels F als Funktion von Temperatur und Frequenz

Frequenz [s ⁻¹]	0.1	0.2	0.4	0.7	1	1.5	2	4	7	10
Temperatur [°C]	Phase [°]									
40	58.3	58.0	60.8	59.5	58.8	59.2	58.5	58.2	57.7	57.0
45	60.2	58.0	59.2	58.9	59.8	59.9	59.1	59.8	59.4	59.3
50	56.0	58.7	59.3	59.3	61.1	60.3	60.6	60.6	60.8	60.3
55	54.5	58.0	58.3	59.1	59.6	60.0	59.6	61.1	61.0	61.3
60	53.5	56.3	58.4	58.5	60.2	59.5	59.5	61.3	61.0	61.8
65	52.3	56.7	57.9	58.9	59.0	59.3	59.5	60.9	61.1	61.9
70	54.8	56.9	58.1	57.4	59.5	60.1	60.5	61.2	61.8	62.4

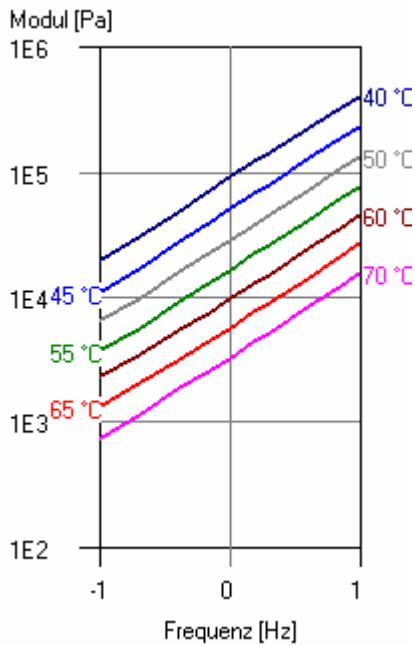


Abbildung 5.12 Module des Bindemittels F in Abhängigkeit der Frequenz für verschiedenen Temperaturen

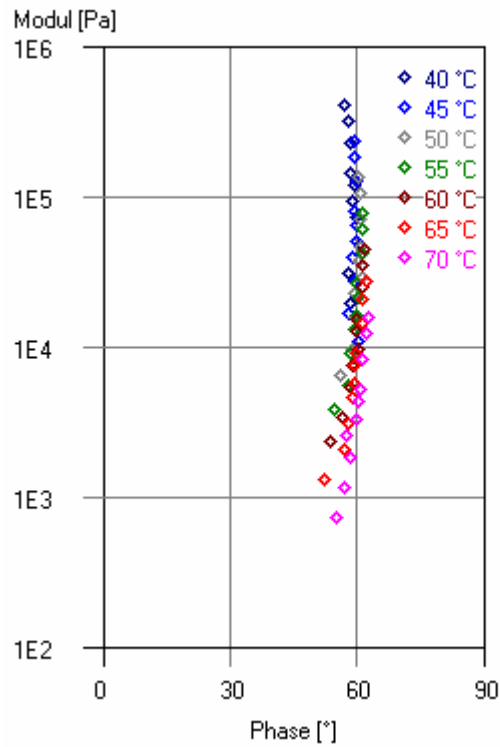


Abbildung 5.13 Black-Diagramm für das Bindemittel F

Die Module und Phasen des Bindemittels G sind in Tabelle 5.30 und Tabelle 5.31 zusammengefasst. Die Module sind in Abbildung 5.14 dargestellt. Abbildung 5.15 zeigt das Black-Diagramm.

Tabelle 5.30 Komplexe Module des Bindemittels G als Funktion von Temperatur und Frequenz

Frequenz [s ⁻¹]	0.1	0.2	0.4	0.7	1	1.5	2	4	7	10
Temperatur [°C]	Komplexer Modul [kPa]									
40	9.316	15.85	26.65	40.19	50.66	66.93	80.78	128.2	186.3	233.4
45	5.151	8.573	14.19	21.12	27.78	37.2	45.62	73.87	107.6	137
50	2.408	4.256	7.309	11.35	14.95	20.29	24.67	41.67	61.43	78.88
55	1.214	2.254	3.867	6.029	7.996	10.92	13.73	23.2	34.79	45.11
60	0.5909	1.074	1.941	3.073	4.043	5.66	7.236	12.35	18.71	24.54
65	0.2825	0.5098	0.9575	1.54	2.079	2.975	3.737	6.526	10.23	13.55
70	0.1564	0.2921	0.5579	0.8957	1.245	1.771	2.251	4.035	6.35	8.547

Tabelle 5.31 Phasen des Bindemittels G als Funktion von Temperatur und Frequenz

Frequenz [s ⁻¹]	0.1	0.2	0.4	0.7	1	1.5	2	4	7	10
Temperatur [°C]	Phase [°]									
40	71.4	67.3	64.8	63.2	61.9	62.0	61.6	59.6	59.3	58.1
45	71.8	69.4	66.2	66.1	63.5	64.6	63.7	62.5	61.7	60.4
50	75.5	71.4	70.7	68.0	67.9	67.3	66.3	64.2	64.2	63.6
55	76.4	74.6	72.7	71.5	70.8	69.7	69.1	68.1	66.4	66.3
60	78.7	77.9	75.8	74.0	72.9	71.8	71.0	69.7	69.3	68.2
65	81.3	80.3	78.4	76.0	76.4	74.6	73.8	72.2	70.6	70.0
70	83.0	82.7	80.5	80.7	78.9	77.0	76.8	74.8	73.9	73.4

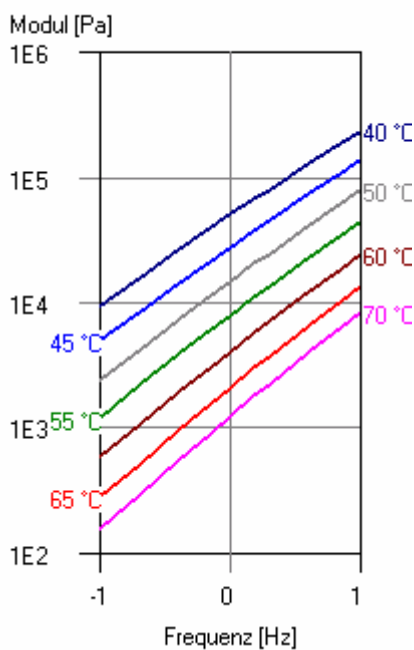


Abbildung 5.14 Module des Bindemittels G in Abhängigkeit der Frequenz für verschiedenen Temperaturen

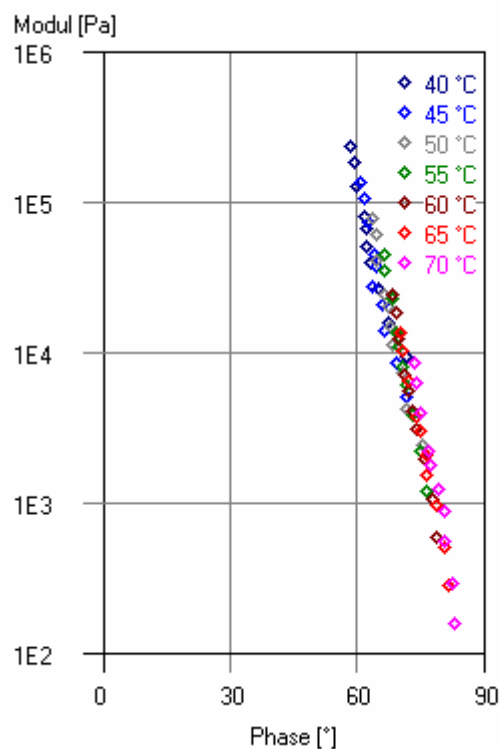


Abbildung 5.15 Black-Diagramm für das Bindemittel G

Tabelle 5.32 Ausgewählte mechanische Eigenschaften der Bindemittel im Anlieferungszustand

Bindemittel	Sorte, Art	Komplexer Modul, 40 °C, 1 Hz	Phase, 40 °C, 1 Hz	Penetration 25°C [0.1mm]	Erweichungspunkt [°C]
		[kPa]	[°]		
A	B55/70	71.56	70.9	70	48.8
B	B80/100	36.04	74.1	95	45.0
C	B120/150	6.69	82.1	148	40.4
D	B80/100	47.79	76.4	82	46.0
F	SBS	93.18	58.8	42	72.4
G	Plastomer	50.66	61.9	52	59.8

5.4 Mastix

5.4.1 Detailergebnisse an ausgewählten Mastixproben

Die Abbildung 5.16 zeigt als Beispiel die Messwerte des Mastix aus Filler 1 mit Bindemittel A ohne katalytische Wirkung. Der Modul zeigt zu Beginn eine leichte Abnahme, steigt aber gegen Ende der Messung wieder etwas an, wobei die anfängliche Abnahme nicht vollständig kompensiert wird. Die Kurve kann am besten erklärt werden, durch eine geringfügig Abnahme infolge der Scherung kombiniert in diesem Beispiel durch eine Zunahme des Moduls, die durch eine leicht sinkende Temperatur während der Prüfung verursacht wird. Die Prüftemperatur beträgt bei Prüfbeginn 55.1 °C und liegt in der 2. Hälfte der Prüfung mehrheitlich bei 54.9 °C. Die verbleibenden Unregelmässigkeiten der Module widerspiegelt die gerätebedingte Standardabweichung der Modulbestimmung. Es ist aus der Abbildung ersichtlich, dass auch die Phasenwerte erhebliche Streuungen aufweisen.

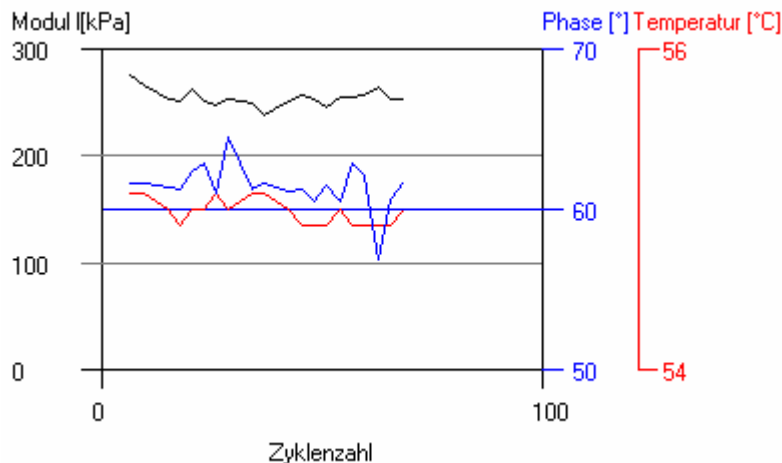


Abbildung 5.16 Entwicklung des Moduls, der Phase und der Temperatur als Funktion der Zyklenzahl am Beispiel von Mastix O1A aus Filler 1 und Bindemittel A

Die Abbildung 5.16 zeigt zudem, dass die gewählte Prüfdauer etwa der Dauer der leichten Temperaturschwankungen entspricht. Durch Bilden von Mittelwerten reduziert sich deshalb die Messunsicherheit wesentlich. Der Modulabfall am Anfang fällt weniger ins Gewicht, die Temperaturschwankungen werden ausgeglichen. Die Standardabweichung reduziert sich gemäss zentralem Grenzwertsatz um die Wurzel der Anzahl der Messungen, wird also durch 4.5 dividiert. Die Tabelle zeigt die statistischen Kennwerte für diese spezielle Prüfung. Der Variationskoeffizient wurde nur für Modul und Dehnung gerechnet, weil die Messunsicherheit bei Phase und Temperatur keine Funktion der Grösse selber darstellt. Die Wiederholpräzision (für die Wiederholung der Messung am eingebauten, ungestörten Prüfkörper) wurde nur für den Modul ermittelt, weil das die für die Bewertung des Verhaltens verwendete Grösse ist.

Tabelle 5.33 Statistische Kennwerte der Messungen an Mastix aus Filler 1 und Bindemittel A

	Mittelwert	Standardabweichung	CV [%]	Wiederholpräzision Mittelwert [%]
Temperatur [°C]	54.98	0.08		
Modul [kPa]	255	8.14	3.2	2.0
Phase [°]	61.4	1.42		
Dehnung [m/m]	0.0100	0.00028	2.8	

Die Abbildung 5.17 zeigt das Verhalten der gleichen Probe bei einer Dehnung von 0.08 [m/m]. Es ist eine deutliche Abnahme des Moduls und eine Zunahme der Phase zu erkennen.

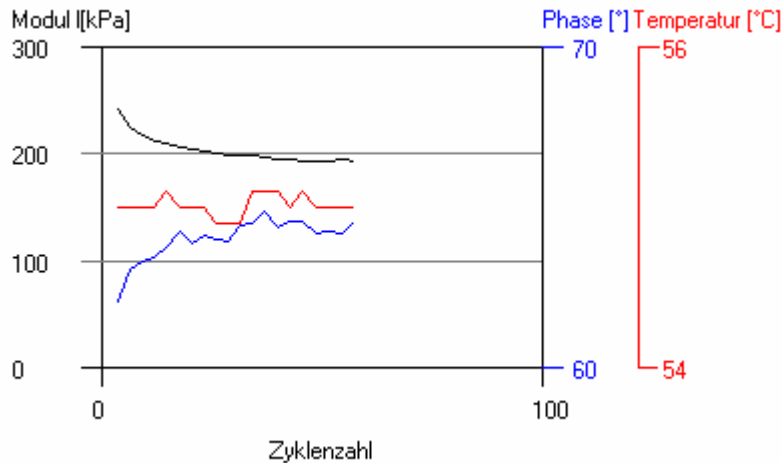


Abbildung 5.17 Entwicklung des Moduls, der Phase und der Temperatur als Funktion der Zykluszahl am Beispiel von Mastix O1A aus Filler 1 und Bindemittel A

Die Abbildung 5.17 zeigt das Verhalten eines Mastix aus Filler 1 und Bindemittel G mit katalytischer Wirkung. Es ist eine deutliche Abnahme des Moduls und eine Zunahme der Phase zu erkennen, die aber auf die Zunahme der Dehnung (siehe Tabelle 5.34) während dem Test zurückzuführen ist und somit ein gerätebedingtes Phänomen darstellt. Die bei höherer Dehnung bestimmten Kurvenäste eignen sich deshalb nicht zur Bestimmung des Alterungsverhalten. Die entsprechenden Messungen wurden im Rahmen dieser Untersuchung nicht weiter ausgewertet.

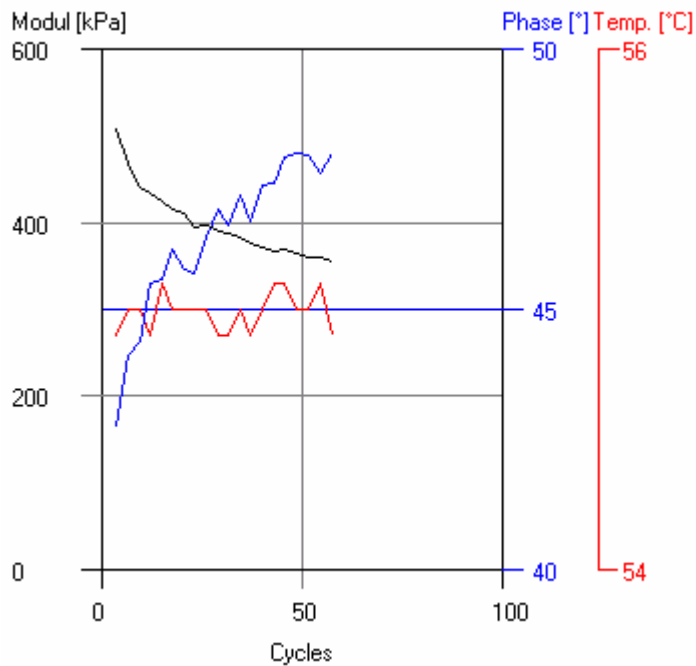


Abbildung 5.18 Entwicklung des Moduls, der Phase und der Temperatur als Funktion der Zyklenzahl am Beispiel von Mastix K1G aus Filler 1 und Bindemittel G

Tabelle 5.34 Mastix aus Filler 1 und Bindemittel G, mechanische Kennwerte der unter katalytischen Bedingungen gealterten Mischungen, Vorgabe Dehnung 0.1 [m/m]

Zyklen [Zahl]	Temperatur [°C]	komplexer Modul [kPa]	Phase [°]	Dehnung [m/m]
3.62	55	242.396	62.0487	0.0670951
6.48	55	224.596	63.0919	0.0724128
9.28	55	217.401	63.3385	0.0748092
12.03	55	212.323	63.4145	0.0765986
14.77	55.1	210.59	63.7781	0.0772289
17.57	55	206.434	64.2333	0.0787838
20.38	55	205.096	63.8527	0.0792977
23.12	55	202.603	64.1061	0.0802735
25.87	54.9	201.203	64.0025	0.0808321
28.61	54.9	199.219	63.9379	0.0816373
31.42	54.9	198.254	64.4502	0.0820347
34.22	55.1	198.318	64.4997	0.0820081
37.02	55.1	196.285	64.8665	0.0828573
39.87	55.1	194.98	64.3512	0.0834122
42.73	55	195.359	64.5694	0.0832501
45.59	55.1	193.839	64.5671	0.0839032
48.61	55	192.805	64.2175	0.0843532
51.46	55	194.056	64.2527	0.0838091
54.43	55	194.145	64.2068	0.0837707
57.29	55	193.206	64.5753	0.0841778

5.4.2 Komplexer Modul des Mastix gealtert ohne und mit katalytischer Wirkung des Fillers

Die Tabelle 5.35 zeigt die katalytische Wirksamkeit des Fillers 1 auf die verschiedenen Bindemittel. Die Alterungsindexe sind in Abbildung 5.19 grafisch als Funktion des Bindemittels dargestellt. Der Filler zeigt in keinem Fall eine eindeutige katalytische Wirkung. Generell scheint die Alterung in Gegenwart des Fillers leicht geringer zu sein als in seiner Abwesenheit. Das kann dadurch erklärt werden, dass der Filler die Diffusion hemmt. Zwischen modifizierten und nicht modifizierten Bindemitteln besteht kein Unterschied. Die Phasenverschiebung steigt bei den modifizierten Bindemitteln nur unwesentlich an. Es kann also davon ausgegangen werden, dass durch diesem Filler kein Abbau des Polymers stattgefunden hat.

Tabelle 5.35 Mastix aus Filler 1 und den Bindemitteln A, B, C, D, F und G, mechanische Kennwerte der ohne katalytische Einwirkung (O) und unter katalytischen Bedingungen gealterten Mischungen (K)

Bindemittel	Katalytische Wirkung des Fillers 1	Komplexer Modul [Pa]	Phase [°]	Alterungsindex
A	O	253097	61.5	
B	O	111354	68.3	
C	O	45245	75.1	
D	O	87498	72.7	
F	O	453479	45.1	
G	O	534326	41.9	
A	K	219482	61.9	0.867
B	K	103686	68.1	0.931
C	K	42100	75.5	0.930
D	K	90705	71.6	1.037
F	K	397590	47.1	0.877
G	K	552321	42.1	1.034
Mittel des Alterungsindex aller Bindemittel				0.946
Mittel des Alterungsindex der nicht modifizierten Bindemittel				0.941

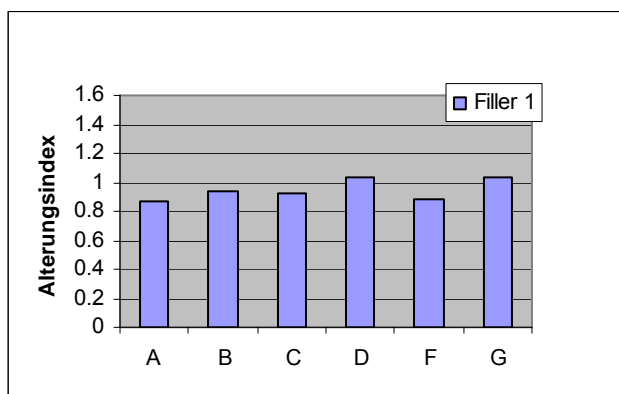


Abbildung 5.19 Abhängigkeit der Alterungsindexe des Fillers 1 vom Bindemittel

Die Tabelle 5.36 zeigt die katalytische Wirksamkeit des Fillers 2 auf die verschiedenen Bindemittel. Die Alterungsindexe sind in Abbildung 5.20 grafisch als Funktion des Bindemittels dargestellt. Der Filler zeigt nur in einem Fall eine deutliche und in zwei Fällen eine schwache katalytische Wirkung. Zwischen modifizierten und nicht modifizierten Bindemitteln besteht kein Unterschied. Die Phasenverschiebung steigt beim modifizierten Bindemittel F merklich

an. Dieses Bindemittel zeigt zugleich einen tieferen Modul. Das deutet darauf hin, dass bei diesem Bindemittel ein leichter Abbau des Polymers stattgefunden hat.

Tabelle 5.36 Mastix aus Filler 2 und den Bindemitteln A, B, C, D, F und G, mechanische Kennwerte der ohne katalytische Einwirkung (O) und unter katalytischen Bedingungen gealterten Mischungen (K)

Bindemittel	Katalytische Wirkung des Fillers 2	Komplexer Modul	Phase	Alterungsindex
		[Pa]	[°]	
A	O	275285	59.8	
B	O	125056	65.9	
C	O	53031	75.5	
D	O	91704	70.9	
F	O	535512	43.2	
G	O	654669	40.3	
A	K	263238	60.6	0.956
B	K	135566	67.6	1.084
C	K	53162	76.6	1.002
D	K	115328	70.9	1.258
F	K	498337	46.2	0.931
G	K	714173	39.3	1.091
Mittel des Alterungsindex aller Bindemittel				1.054
Mittel des Alterungsindex der nicht modifizierten Bindemittel				1.075

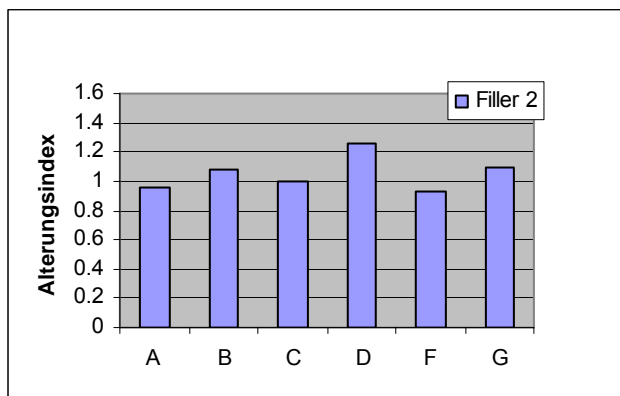


Abbildung 5.20 Abhängigkeit der Alterungsindexe des Fillers 2 vom Bindemittel

Die Tabelle 5.37 zeigt die katalytische Wirksamkeit des Fillers 3 auf die verschiedenen Bindemittel. Die Alterungsindexe sind in Abbildung 5.21 grafisch als Funktion des Bindemittels dargestellt. Der Filler zeigt durchwegs eine mässige katalytische Wirkung. Zwischen den modifizierten und den nicht modifizierten Bindemitteln besteht kein Unterschied. Die Phasenverschiebung steigt wie beim Filler 2 beim modifizierten Bindemittel F merklich an. Dieses Bindemittel zeigt zugleich als einziges einen tieferen Modul. Das deutet darauf hin, dass bei diesem Bindemittel ein leichter Abbau des Polymers stattgefunden hat.

Tabelle 5.37 Mastix aus Filler 3 und den Bindemitteln A, B, C, D, F und G, mechanische Kennwerte der ohne katalytische Einwirkung (O) und unter katalytischen Bedingungen gealterten Mischungen (K)

Bindemittel	Katalytische Wirkung des Fillers 3	Komplexer Modul	Phase	Alterungsindex
		[Pa]	[°]	
A	O	254177	60.5	
B	O	113073	67.3	
C	O	48775	75.8	
D	O	93639	70.9	
F	O	517908	44.0	
G	O	568623	42.0	
A	K	279076	61.4	1.098
B	K	121612	68.7	1.076
C	K	51884	75.5	1.064
D	K	108689	71.9	1.161
F	K	426229	46.9	0.823
G	K	651934	40.8	1.147
Mittel des Alterungsindex aller Bindemittel				1.061
Mittel des Alterungsindex der nicht modifizierten Bindemittel				1.099

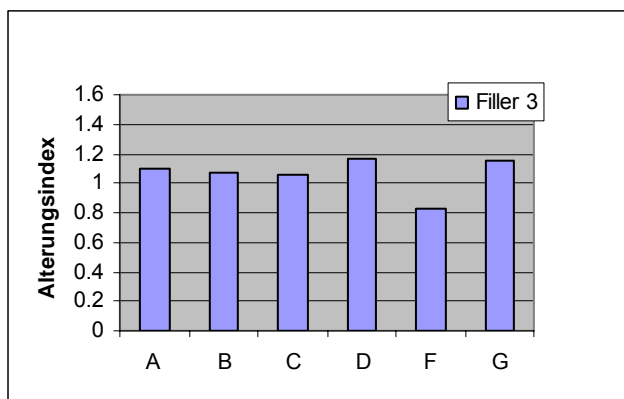


Abbildung 5.21 Abhängigkeit der Alterungsindexe des Fillers 3 vom Bindemittel

Die Tabelle 5.38 zeigt die katalytische Wirksamkeit des Fillers 4 auf die verschiedenen Bindemittel. Die Alterungsindexe sind in Abbildung 5.22 grafisch als Funktion des Bindemittels dargestellt. Der Filler zeigt eine deutliche katalytische Wirkung. Zwischen den modifizierten und den nicht modifizierten Bindemitteln besteht ein deutlicher Unterschied. Die Phase steigt wie beim Filler 2 beim modifizierten Bindemittel F erheblich an. Diese Bindemittel zeigt zugleich als einziges einen tieferen Modul. Das deutet darauf hin, dass bei diesem Bindemittel ein leichter Abbau des Polymers stattgefunden hat. Beim Bindemittel G bleiben dagegen sowohl Modul wie Phase praktisch unverändert.

Tabelle 5.38 Mastix aus Filler 4 und den Bindemitteln A, B, C, D, F und G, mechanische Kennwerte der ohne katalytische Einwirkung (O) und unter katalytischen Bedingungen gealterten Mischungen (K)

Bindemittel	Katalytische Wirkung des Fillers 4	Komplexer Modul	Phase	Alterungsindex
		[Pa]	[°]	
A	O	224765	62.0	
B	O	97776	68.0	
C	O	46023	75.6	
D	O	77151	71.5	
F	O	464339	45.2	
G	O	544566	43.7	
A	K	258772	61.1	1.151
B	K	127359	68.9	1.303
C	K	50328	76.2	1.094
D	K	98692	71.8	1.279
F	K	373321	48.0	0.804
G	K	562065	42.1	1.032
Mittel des Alterungsindex aller Bindemittel				1.110
Mittel des Alterungsindex der nicht modifizierten Bindemittel				1.207

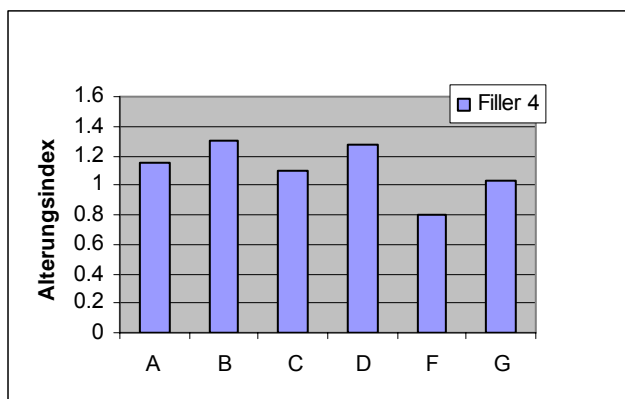


Abbildung 5.22 Abhängigkeit der Alterungsindexe des Fillers 4 vom Bindemittel

Die Tabelle 5.39 zeigt die katalytische Wirksamkeit des Fillers 5 auf die verschiedenen Bindemittel. Die Alterungsindexe sind in Abbildung 5.23 grafisch als Funktion des Bindemittels dargestellt. Der Filler zeigt eine sehr deutliche katalytische Wirkung. Zwischen den modifizierten und den nicht modifizierten Bindemitteln besteht ein deutlicher Unterschied. Die Phase steigt wie beim Filler 2 beim modifizierten Bindemittel F erheblich an. Dieses Bindemittel zeigt zugleich als einziges einen leicht tiefen Modul. Das deutet darauf hin, dass bei diesem Bindemittel ein leichter Abbau des Polymers stattgefunden hat. Beim Bindemittel G steigt der Modul nur geringfügig und die Phase bleibt praktisch unverändert.

Tabelle 5.39 Mastix aus Filler 5 und den Bindemitteln A, B, C, D, F und G, mechanische Kennwerte der ohne katalytische Einwirkung (O) und unter katalytischen Bedingungen gealterten Mischungen (K)

Bindemittel	Katalytische Wirkung des Fillers 5	Komplexer Modul	Phase	Alterungsindex
		[Pa]	[°]	
A	O	211867	61.5	
B	O	103002	68.0	
C	O	45631	76.1	
D	O	66920	72.1	
F	O	425387	45.7	
G	O	573028	44.4	
A	K	317906	59.1	1.500
B	K	124695	66.5	1.211
C	K	51428	74.7	1.127
D	K	98366	70.5	1.470
F	K	389053	48.6	0.915
G	K	631022	42.8	1.101
Mittel des Alterungsindex aller Bindemittel				1.221
Mittel des Alterungsindex der nicht modifizierten Bindemittel				1.327

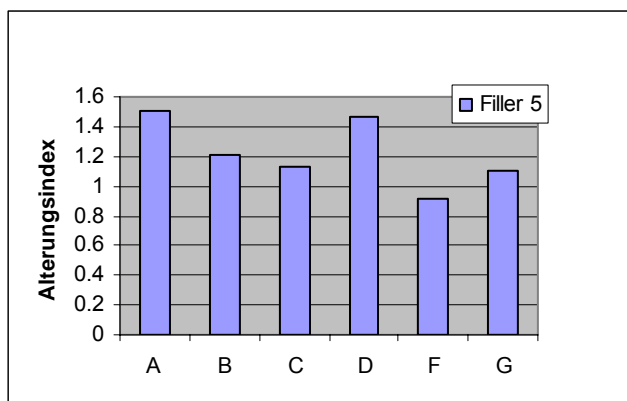


Abbildung 5.23 Abhängigkeit der Alterungsindexe des Fillers 5 vom Bindemittel

Die Tabelle 5.40 zeigt die katalytische Wirksamkeit des Fillers 6 auf die verschiedenen Bindemittel. Die Alterungsindexe sind in Abbildung 5.24 grafisch als Funktion des Bindemittels dargestellt. Der Filler zeigt eine mässige bis deutliche katalytische Wirkung. Zwischen den modifizierten und den nicht modifizierten Bindemitteln besteht ein mässiger Unterschied. Die Phase steigt wie beim Filler 2 beim modifizierten Bindemittel F erheblich an. Dieses Bindemittel zeigt zugleich einen tieferen Modul. Das deutet darauf hin, dass bei diesem Bindemittel ein leichter Abbau des Polymers stattgefunden hat. Beim Bindemittel G bleiben dagegen sowohl Modul wie Phase praktisch unverändert.

Tabelle 5.40 Mastix aus Filler 6 und den Bindemitteln A, B, C, D, F und G, mechanische Kennwerte der ohne katalytische Einwirkung (O) und unter katalytischen Bedingungen gealterten Mischungen (K)

Bindemittel	Katalytische Wirkung des Fillers 6	Komplexer Modul	Phase	Alterungsindex
		[Pa]	[°]	
A	O	221619	61.3	
B	O	103171	67.8	
C	O	47108	76.0	
D	O	78732	72.0	
F	O	429185	44.8	
G	O	557221	44.3	
A	K	287248	60.5	1.296
B	K	130215	67.8	1.262
C	K	46298	75.3	0.983
D	K	97846	70.8	1.243
F	K	382627	48.3	0.892
G	K	581974	42.2	1.044
Mittel des Alterungsindex aller Bindemittel				1.120
Mittel des Alterungsindex der nicht modifizierten Bindemittel				1.196

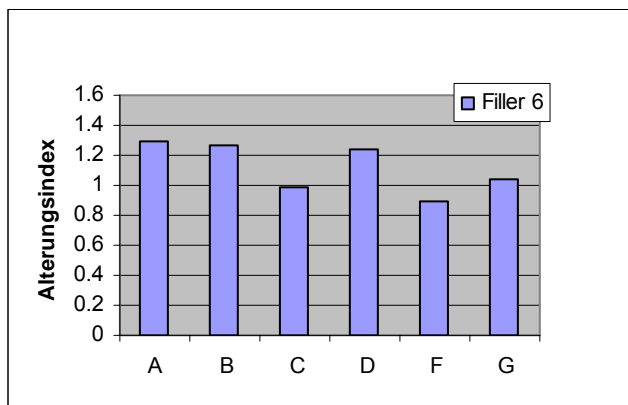


Abbildung 5.24 Abhängigkeit der Alterungsindexe des Fillers 6 vom Bindemittel

Die Tabelle 5.41 zeigt die katalytische Wirksamkeit des Fillers 7 auf die verschiedenen Bindemittel. Die Alterungsindexe sind in Abbildung 5.25 grafisch als Funktion des Bindemittels dargestellt. Der Filler zeigt eine allenfalls schwache katalytische Wirkung. Zwischen den modifizierten und den nicht modifizierten Bindemitteln besteht ein erkennbarer Unterschied. Die Phase steigt wie beim Filler 2 beim modifizierten Bindemittel F erheblich an. Diese Bindemittel zeigt zugleich einen wesentlich tieferen Modul. Das deutet darauf hin, dass bei diesem Bindemittel ein leichter Abbau des Polymers stattgefunden hat. Beim Bindemittel G bleiben dagegen sowohl Modul wie Phase praktisch unverändert.

Tabelle 5.41 Mastix aus Filler 7 und den Bindemitteln A, B, C, D, F und G, mechanische Kennwerte der ohne katalytische Einwirkung (O) und unter katalytischen Bedingungen gealterten Mischungen (K)

Bindemittel	Katalytische Wirkung des Fillers 7	Komplexer Modul	Phase	Alterungsindex
		[Pa]	[°]	
A	O	277744	60.7	
B	O	120469	67.4	
C	O	49767	76.2	
D	O	94279	71.4	
F	O	614531	40.9	
G	O	640046	40.6	
A	K	248081	61.5	0.893
B	K	123670	66.6	1.027
C	K	55194	74.5	1.109
D	K	103861	71.0	1.102
F	K	448940	46.4	0.731
G	K	634994	41.1	0.992
Mittel des Alterungsindex aller Bindemittel				0.976
Mittel des Alterungsindex der nicht modifizierten Bindemittel				1.033

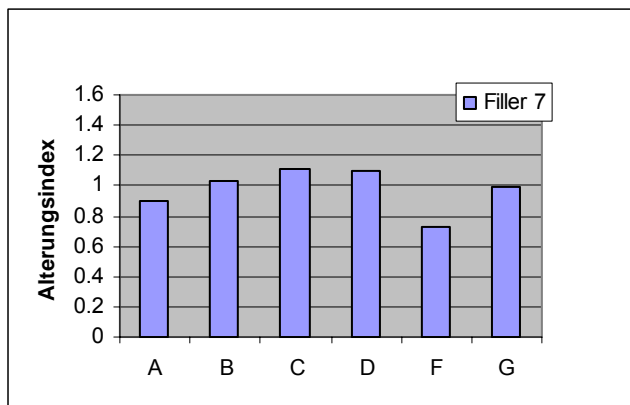


Abbildung 5.25 Abhängigkeit der Alterungsindexe des Fillers 7 vom Bindemittel

Die Tabelle 5.42 zeigt die katalytische Wirksamkeit des Fillers 8 auf die verschiedenen Bindemittel. Die Alterungsindexe sind in Abbildung 5.26 grafisch als Funktion des Bindemittels dargestellt. Der Filler zeigt eine deutliche katalytische Wirkung. Zwischen den modifizierten und den nicht modifizierten Bindemitteln besteht ein erkennbarer Unterschied. Die Phase steigt wie beim Filler 2 beim modifizierten Bindemittel F erheblich an. Dieses Bindemittel zeigt zugleich als einziges einen tieferen Modul. Das deutet darauf hin, dass bei diesem Bindemittel ein leichter Abbau des Polymers stattgefunden hat. Beim Bindemittel G nimmt wohl der Modul deutlich zu, die Phase bleibt aber praktisch unverändert. In dieser Kombination ist anscheinend eine gewisse Verhärtung des Bitumenanteils eingetreten, während der Polymeranteil praktisch unverändert bleibt.

Tabelle 5.42 Mastix aus Filler 8 und den Bindemitteln A, B, C, D, F und G, mechanische Kennwerte der ohne katalytische Einwirkung (O) und unter katalytischen Bedingungen gealterten Mischungen (K)

Bindemittel	Katalytische Wirkung des Fillers 8	Komplexer Modul	Phase	Alterungsindex
		[Pa]	[°]	
A	O	201833	63.2	
B	O	104788	68.1	
C	O	41156	75.5	
D	O	72413	72.3	
F	O	394424	46.1	
G	O	398649	44.5	
A	K	221809	62.6	1.099
B	K	107403	69.2	1.025
C	K	45324	76.2	1.101
D	K	97203	71.6	1.342
F	K	347997	49.6	0.882
G	K	469759	44.3	1.178
Mittel des Alterungsindex aller Bindemittel				1.105
Mittel des Alterungsindex der nicht modifizierten Bindemittel				1.142

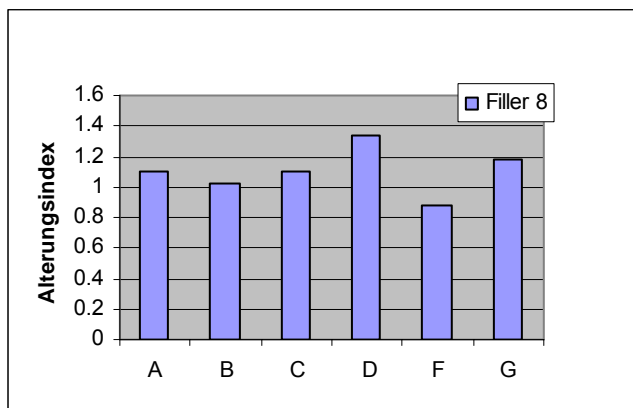


Abbildung 5.26 Abhängigkeit der Alterungsindexe des Fillers 8 vom Bindemittel

Tabelle 5.43 zeigt die katalytische Wirksamkeit verschiedener Filler auf das Bindemittel A. Die in der Tabelle aufgeführten Alterungsindexe sind in Abbildung 5.27 grafisch dargestellt. Dieses Bindemittel ist erkennbar anfällig auf die katalytische Wirkung der Filler. Besonders auffällig ist die Wirkung von Filler 5, deutlich auch noch jene von Filler 6, von den andern wird das Bindemittel nur wenig oder nicht beeinträchtigt.

Tabelle 5.43 Mastix aus Bindemittel A und den Fillern 1 bis 8, mechanische Kennwerte der ohne katalytische Einwirkung (O) und unter katalytischen Bedingungen gealterten Mischungen (K)

Filler	Katalytische Wirkung auf Bindemittel A	Komplexer Modul	Phase	Alterungsindex
		[Pa]	[°]	
1	O	253097	61.5	
2	O	275285	59.8	
3	O	254177	60.5	
4	O	224765	62.0	
5	O	211867	61.5	
6	O	221619	61.3	
7	O	277744	60.7	
8	O	201833	63.2	
1	K	219482	61.9	0.867
2	K	263238	60.6	0.956
3	K	279076	61.4	1.098
4	K	258772	61.1	1.151
5	K	317906	59.1	1.500
6	K	287248	60.5	1.296
7	K	248081	61.5	0.893
8	K	221809	62.6	1.099
Mittel des Alterungsindexes aller Filler				1.108

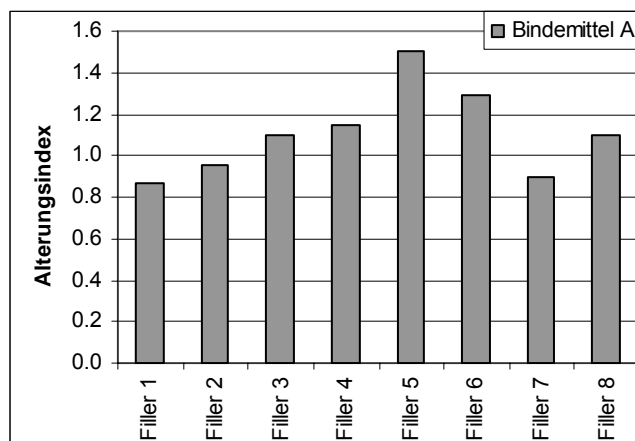


Abbildung 5.27 Abhängigkeit der Alterungsindexe des Bindemittels A vom Filler

Tabelle 5.44 zeigt die katalytische Wirksamkeit verschiedener Filler auf das Bindemittel B. Die in der Tabelle aufgeführten Alterungsindexe sind in Abbildung 5.28 grafisch dargestellt. Das Bindemittel ist erkennbar anfällig auf die katalytische Wirkung der Filler. Die katalytische Wirkung ist bei Filler 4 deutlich und auch bei den Fillern 5 und 6 erkennbar, die andern zeigen kaum Wirkung.

Tabelle 5.44 Mastix aus Bindemittel B und den Fillern 1 bis 8, mechanische Kennwerte der ohne katalytische Einwirkung (O) und unter katalytischen Bedingungen gealterten Mischungen (K)

Filler	Katalytische Wirkung auf Bindemittel B	Komplexer Modul	Phase	Alterungsindex
		[Pa]	[°]	
1	O	111354	68.3	
2	O	125056	65.9	
3	O	113073	67.3	
4	O	97776	68.0	
5	O	103002	68.0	
6	O	103171	67.8	
7	O	120469	67.4	
8	O	104788	68.1	
1	K	103686	68.1	0.931
2	K	135566	67.6	1.084
3	K	121612	68.7	1.076
4	K	127359	68.9	1.303
5	K	124695	66.5	1.211
6	K	130215	67.8	1.262
7	K	123670	66.6	1.027
8	K	107403	69.2	1.025
Mittel des Alterungsindexes aller Filler				1.115

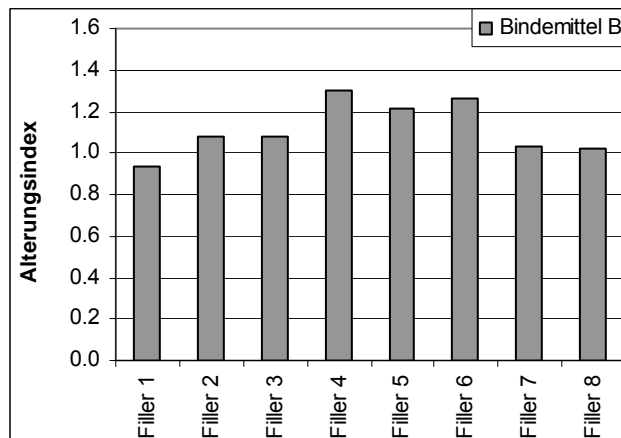


Abbildung 5.28 Abhängigkeit der Alterungsindexe des Bindemittels B vom Filler

Tabelle 5.45 zeigt die katalytische Wirksamkeit verschiedener Filler auf das Bindemittel C. Die in der Tabelle aufgeführten Alterungsindexe sind in Abbildung 5.29 grafisch dargestellt. Es ist insgesamt kaum eine katalytische Wirkung festzustellen, allenfalls eine geringfügige bei Filler 5.

Tabelle 5.45 Mastix aus Bindemittel C und den Fillern 1 bis 8, mechanische Kennwerte der ohne katalytische Einwirkung (O) und unter katalytischen Bedingungen gealterten Mischungen (K)

Filler	Katalytische Wirkung auf Bindemittel C	Komplexer Modul	Phase	Alterungsindex
		[Pa]	[°]	
1	O	45245	75.1	
2	O	53031	75.5	
3	O	48775	75.8	
4	O	46023	75.6	
5	O	45631	76.1	
6	O	47108	76.0	
7	O	49767	76.2	
8	O	41156	75.5	
1	K	42100	75.5	0.930
2	K	53162	76.6	1.002
3	K	51884	75.5	1.064
4	K	50328	76.2	1.094
5	K	51428	74.7	1.127
6	K	46298	75.3	0.983
7	K	55194	74.5	1.109
8	K	45324	76.2	1.101
Mittel des Alterungsindexes aller Filler				1.051

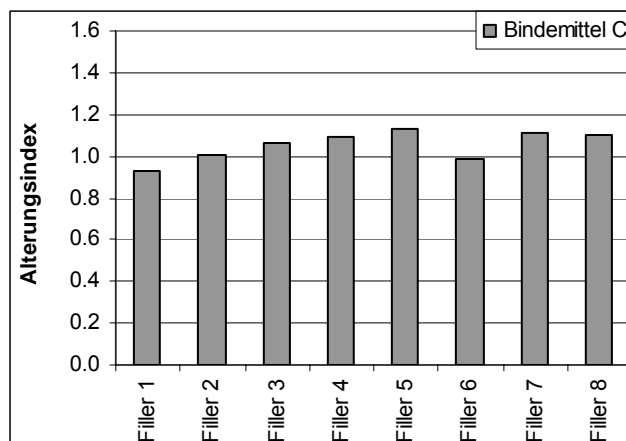


Abbildung 5.29 Abhängigkeit der Alterungsindexe des Bindemittels C vom Filler

Tabelle 5.46 zeigt die katalytische Wirksamkeit verschiedener Filler auf das Bindemittel D. Die in der Tabelle aufgeführten Alterungsindexe sind in Abbildung 5.30 grafisch dargestellt. Das Bindemittel ist ausgeprägt anfällig auf die katalytische Wirkung der meisten Filler. Wiederum bewirkt Filler 5 den ausgeprägtesten Effekt, während der Filler 1 die Alterung nicht, die Filler 3, 4 und 7 sie nur wenig beeinflussen.

Tabelle 5.46 Mastix aus Bindemittel D und den Fillern 1 bis 8, mechanische Kennwerte der ohne katalytische Einwirkung (O) und unter katalytischen Bedingungen gealterten Mischungen (K)

Filler	Katalytische Wirkung auf Bindemittel A	Komplexer Modul	Phase	Alterungsindex
		[Pa]	[°]	
1	O	87498	72.7	
2	O	91704	70.9	
3	O	93639	70.9	
4	O	77151	71.5	
5	O	66920	72.1	
6	O	78732	72.0	
7	O	94279	71.4	
8	O	72413	72.3	
1	K	90705	71.6	1.037
2	K	115328	70.9	1.258
3	K	108689	71.9	1.161
4	K	98692	71.8	1.279
5	K	98366	70.5	1.470
6	K	97846	70.8	1.243
7	K	103861	71.0	1.102
8	K	97203	71.6	1.342
Mittel des Alterungsindexes aller Filler				1.236

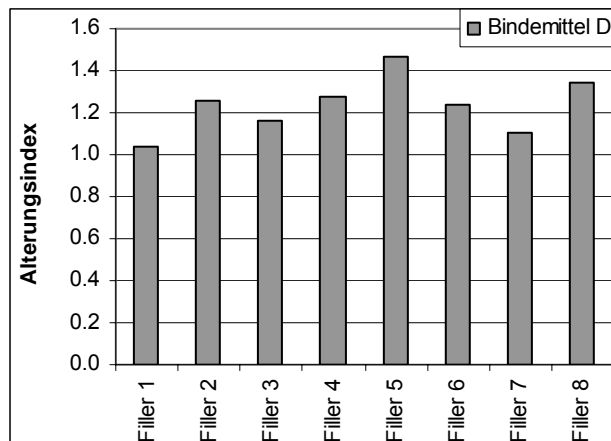


Abbildung 5.30 Abhängigkeit der Alterungsindexe des Bindemittels D vom Filler

Tabelle 5.47 zeigt die katalytische Wirksamkeit verschiedener Filler auf das Bindemittel F. Die in der Tabelle aufgeführten Alterungsindexe sind in Abbildung 5.31 grafisch dargestellt. Wie schon oben diskutiert, fällt die generelle Anfälligkeit des Polymers in diesem Bitumen auf.

Tabelle 5.47 Mastix aus Bindemittel F und den Fillern 1 bis 8, mechanische Kennwerte der ohne katalytische Einwirkung (O) und unter katalytischen Bedingungen gealterten Mischungen (K)

Filler	Katalytische Wirkung auf Bindemittel A	Komplexer Modul	Phase	Alterungsindex
		[Pa]	[°]	
1	O	453479	45.1	
2	O	535512	43.2	
3	O	517908	44.0	
4	O	464339	45.2	
5	O	425387	45.7	
6	O	429185	44.8	
7	O	614531	40.9	
8	O	394424	46.1	
1	K	397590	47.1	0.877
2	K	498337	46.2	0.931
3	K	426229	46.9	0.823
4	K	373321	48.0	0.804
5	K	389053	48.6	0.915
6	K	382627	48.3	0.892
7	K	448940	46.4	0.731
8	K	347997	49.6	0.882
Mittel des Alterungsindex aller Filler				0.857

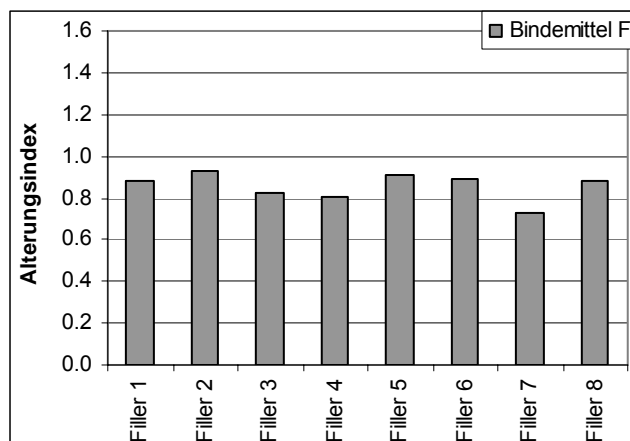


Abbildung 5.31 Abhängigkeit der Alterungsindexe des Bindemittels F vom Filler

Tabelle 5.48 zeigt die katalytische Wirksamkeit verschiedener Filler auf das Bindemittel G. Die in der Tabelle aufgeführten Alterungsindexe sind in Abbildung 5.32 grafisch dargestellt. Das Bindemittel ist generell wenig anfällig auf die katalytische Wirkung der Filler. Weder ist eine ausgeprägte Verhärtung erkennbar, noch zeigt die Phase eine Beeinträchtigung des Polymers an.

Tabelle 5.48 Mastix aus Bindemittel G und den Fillern 1 bis 8, mechanische Kennwerte der ohne katalytische Einwirkung (O) und unter katalytischen Bedingungen gealterten Mischungen (K)

Filler	Katalytische Wirkung auf Bindemittel A	Komplexer Modul	Phase	Alterungsindex
		[Pa]	[°]	
1	O	534326	41.9	
2	O	654669	40.3	
3	O	568623	42.0	
4	O	544566	43.7	
5	O	573028	44.4	
6	O	557221	44.3	
7	O	640046	40.6	
8	O	398649	44.5	
1	K	552321	42.1	1.034
2	K	714173	39.3	1.091
3	K	651934	40.8	1.147
4	K	562065	42.1	1.032
5	K	631022	42.8	1.101
6	K	581974	42.2	1.044
7	K	634994	41.1	0.992
8	K	469759	44.3	1.178
Mittel des Alterungsindexes aller Filler				1.077

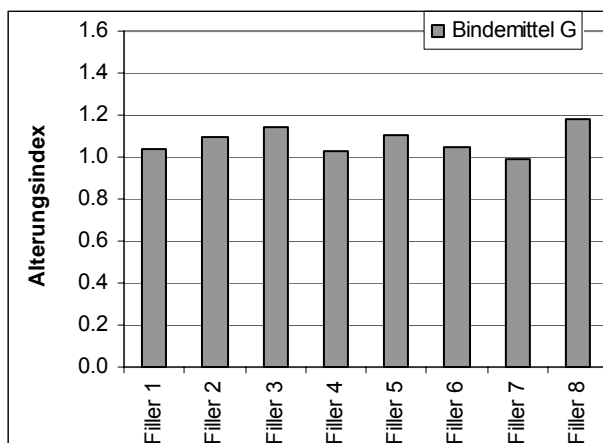


Abbildung 5.32 Abhängigkeit der Alterungsindexe des Bindemittels G vom Filler

5.4.3 Katalytische Wirkung der Filler

Abbildung 5.33 zeigt den gemittelten Wert für den Alterungsindex für alle Bindemittel als Funktion des Fillers. Abbildung 5.34 zeigt den gemittelten Wert für den Alterungsindex nur für die nicht modifizierten Bindemittel. Im zweiten Fall sind die Tendenzen klarer zu erkennen, weil die polymermodifizierten Bindemittel sich teilweise atypisch verhalten. Beide Male ist aber der Filler 5 am ausgeprägtesten katalytisch wirksam.

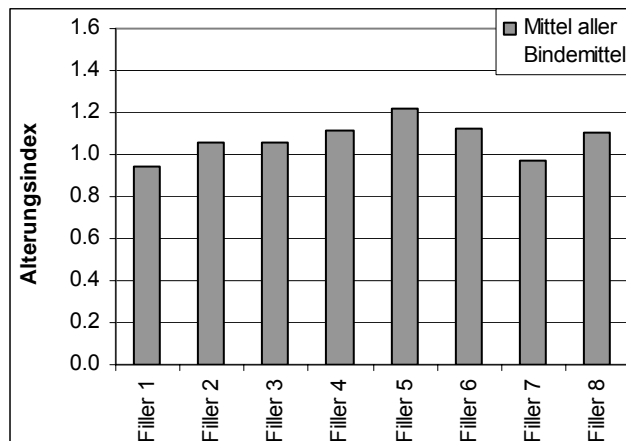


Abbildung 5.33 Abhängigkeit des Mittelwertes des Alterungsindex vom Filler für alle Bindemittel

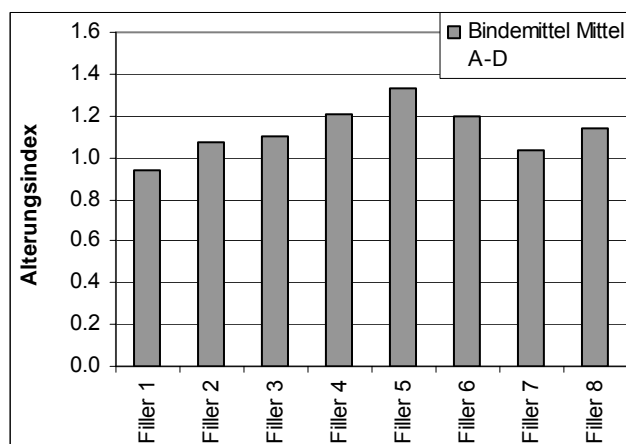


Abbildung 5.34 Abhängigkeit des Mittelwertes des Alterungsindex vom Filler für die nicht modifizierten Bindemittel A bis D

5.4.4 Ermüdungsprüfungen an ausgewählten Mischungen

Die Tendenz zur Rissbildung wurde mittels einer Ermüdungsprüfung für Bindemittel, ähnlich wie sie in [AIR.G04] beschrieben ist, bestimmt. Es wurden die gleichen Mastixproben verwendet wie für das Bestimmen des entsprechenden Alterungsindex. Die Auswahl der Materialien erfolgte unter Berücksichtigung der bestimmten Werte für diesen Index. Sie ist in Tabelle 5.49 erläutert. Es sollte neben einem hohen, ein tiefer und ein mittlerer Wert dabei sein. Eine erste Prüfung am Mastix O1F wurde verworfen, weil sie in zeitlichem Abstand zur übrigen Serie erfolgte. In zwei Fällen wurde beim Ausbau beobachtet, dass die Haftung zwischen dem Stempel und dem Mastix bei Prüfende offensichtlich nicht mehr genügend war. Wiederholungsgründe sind in Tabelle 5.49 zusammengestellt.

Die Ermüdungsprüfungen wurden bei einer Dehnung von 0.02 [m/m], 30 °C und einer Frequenz von 10 Hz durchgeführt. Die Ermüdungskurven für die 8 untersuchten Mastixarten sind in Abbildung 5.35 bis Abbildung 5.42 dargestellt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.50 aufgeführt.

Tabelle 5.49 Auswahl der Mastixarten und Zusammenstellung der Wiederholungen

Bindemittel/Filler	Auswahlkriterium	Wiederholungsgrund
1/D	Ergänzende Referenz	
1/F	Kombination des am wenigsten aktiven Fillers mit unempfindlichem Bindemittel	O1F Vorversuch
5/D	Kombination aktivster Filler mit empfindlichstem Bindemittel	O5D, K5D, Haftung Mastix - Stempel
7/F	Mastix mit tiefstem Alterungsindex	

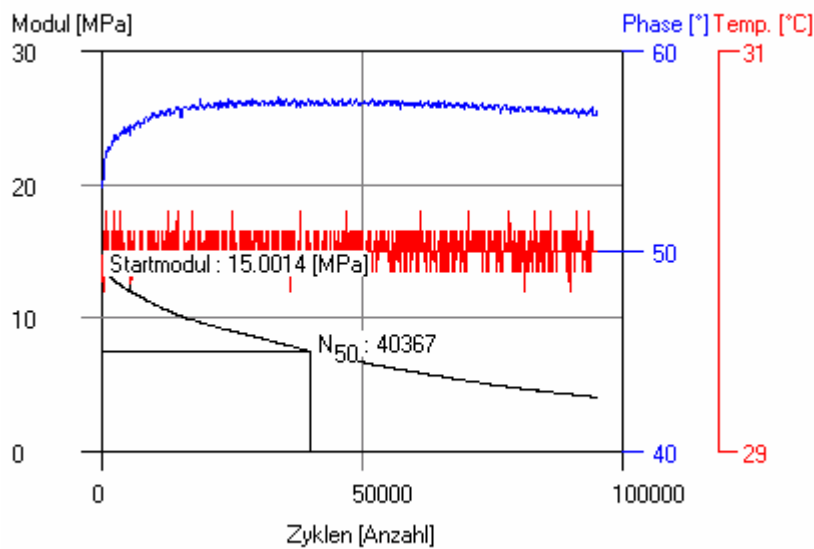


Abbildung 5.35 Ermüdungsprüfung am Mastix O1D

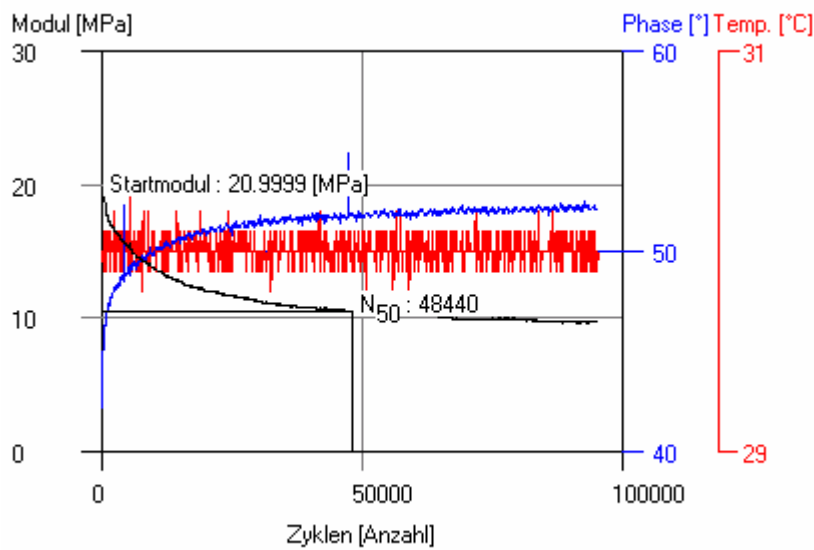


Abbildung 5.36 Ermüdungsprüfung am Mastix O1F

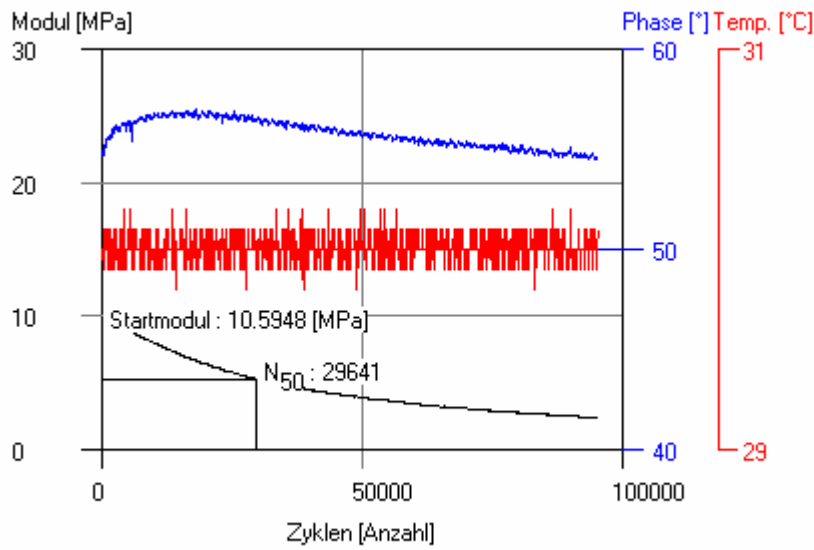


Abbildung 5.37 Ermüdungsprüfung am Mastix O5D

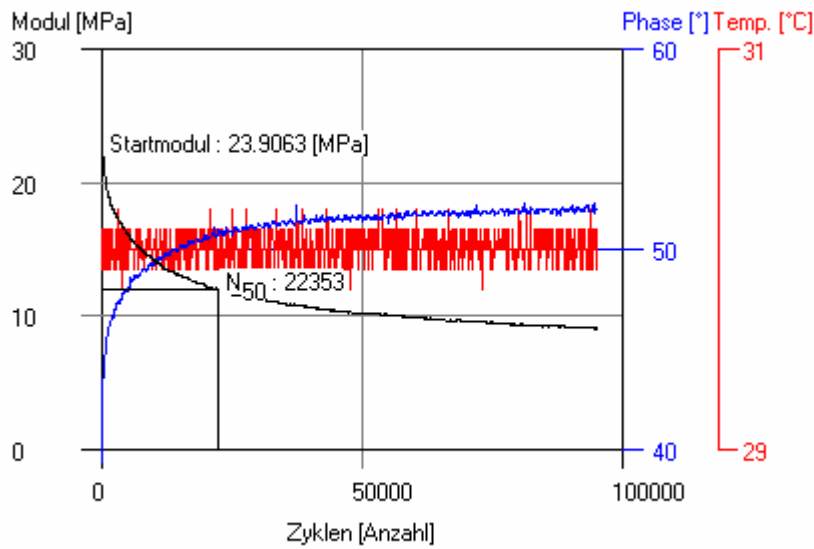


Abbildung 5.38 Ermüdungsprüfung am Mastix O7F

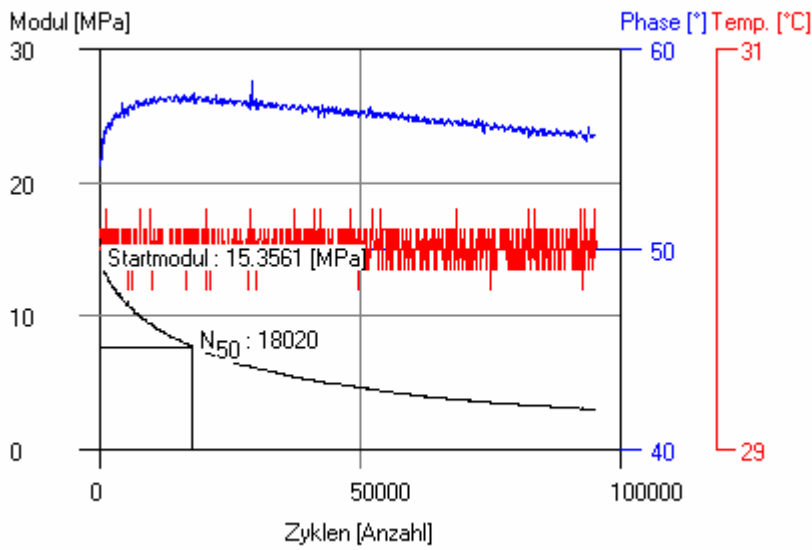


Abbildung 5.39 Ermüdungsprüfung am Mastix K1D

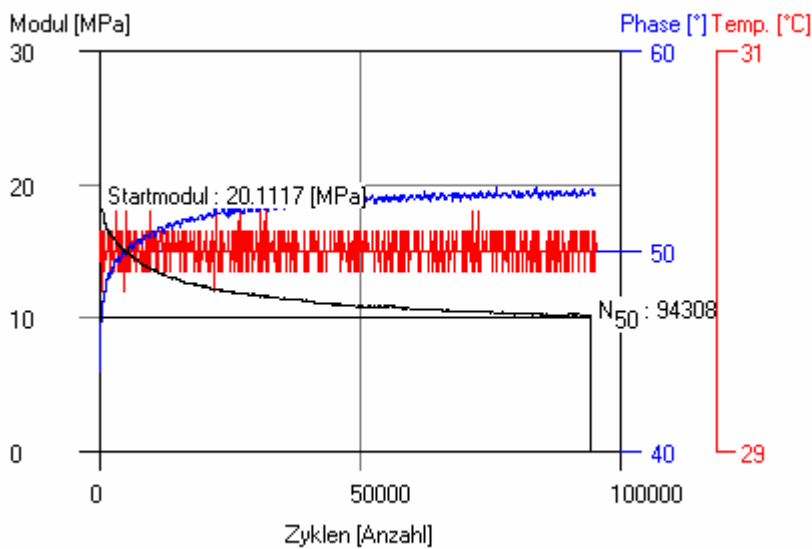


Abbildung 5.40 Ermüdungsprüfung am Mastix K1F

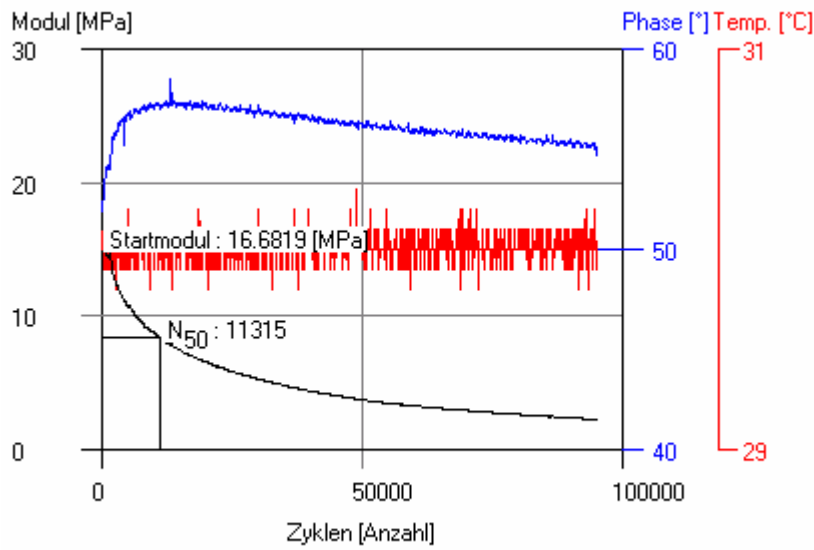


Abbildung 5.41 Ermüdungsprüfung am Mastix K5D

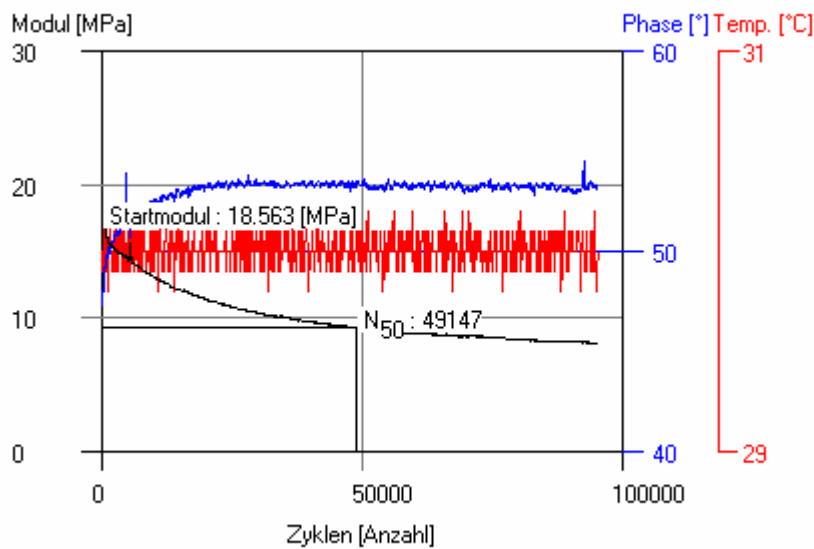


Abbildung 5.42 Ermüdungsprüfung am Mastix K7F

Die Ergebnisse der Ermüdungsprüfung sind in Tabelle 5.50 zusammengestellt. Aufgeführt sind jeweils der Modul zu Beginn der Prüfung, also der Startmodul und die Lastzyklenzahl N₅₀, bei der der Modul auf 50% des Startmoduls abgenommen hat.

Tabelle 5.50 Startmodule und Lastzyklenzahl N₅₀

Filler/Bindemittel	Ohne katalytische Wirkung		Mit katalytischer Wirkung	
	Startmodul [MPa]	N ₅₀	Startmodul [MPa]	N ₅₀
1/D	15.00	40367	15.36	18020
1/F	21.00	48440	20.11	94308
5/D	10.59	29641	16.68	11315
7/F	23.91	22353	18.56	49147

6 Schlussfolgerungen

6.1 Aussagefähigkeit der Methode

Die in Tabelle 5.11 aufgeführte Wiederholung der Modulbestimmung und der Vergleich des Alterungsindex aus der Seriebestimmung und aus der Prüfung auf Ermüdung in Tabelle 6.3 zeigen, dass der Alterungsindex auf etwa 0.1 genau bestimmt werden kann. Die Methode ist damit durchaus in der Lage, Kombinationen von Bindemitteln/Fillern nach ihrem Risiko vorzeitiger Alterung zu klassieren. Unterschiede im Alterungsindex von weniger als 0.1 sind in Anbetracht der Messgenauigkeit der Methode als nicht relevant einzustufen. Unterschiede zwischen 0.1 und 0.2 sind wohl messtechnisch relevant, es ist aber auch zu bedenken, dass Alterungsvorgänge im Feld weniger kontrolliert ablaufen als im Labor. Deshalb sind nur Unterschiede von grösser als 0.2 im Alterungsindex als relevant zu bewerten. Das erlaubt eine provisorische Einstufung von Kombinationen von Bindemitteln und Fillern wie folgt:

- Ein Alterungsindex von <1.2 zeigt kein Risiko an
- Ein Alterungsindex von 1.2 bis 1.4 zeigt eine deutliche Neigung zu einer rascheren Alterung an, eine ausgeprägte Verkürzung der Gebrauchsdauer der Strasse ist aber nur im Zusammenhang mit Konzeptions- oder Einbaufehlern wie ungenügender Verdichtung, Wahl eines zu harten Bindemittels oder ungenügendem Bindemittelgehalt zu erwarten.
- Ein Alterungsindex von über 1.4 sollte bei offenporigen bitumenhaltigen Schichten und bei Schichten von Dicken im Bereich von bis zu 30 mm kombiniert mit höherem Hohlraumgehalt nicht vorliegen.

6.2 Alterungsverhalten der Bindemittel

Tabelle 6.1 zeigt die Zusammenhänge zwischen Bindemittleigenschaften und Alterungsindex. Unabhängig von ihrer Härte zeigen die Bindemittel A, B, C und G eine nur geringe Neigung, in Gegenwart von Fillern schneller zu altern. Eine relative hohe Neigung zur Alterung zeigt dagegen das Bindemittel D anderer Provenienz. Wenn es also darum geht, die Neigung eines Bindemittels zur katalytischen Oxidation durch Filler zu beurteilen, scheint die Provenienz wesentlicher zu sein als die Härte. Es genügt somit, das am meisten eingesetzte Bindemittel mit einem kritischen Filler zu prüfen.

Einen Spezialfall stellt das Bindemittel F dar, bei dem in Gegenwart von Fillern die Verhärtung geringer ausfällt. Wie bereits oben gezeigt (z.B. in Tabelle 5.35 bis Tabelle 5.41), ändert sich bei diesem Bindemittel systematisch die Phase. Sie steigt im Mittel um 3.2 °C an. Das deutet auf einen Polymerabbau hin. Die katalytische Wirkung der Filler bewirkt hier also eine Reduktion der Funktionalität des Polymers.

Tabelle 6.1 Bindemittleigenschaften und Alterungsindex

Bindemittel	Sorte, Art	Penetration [0.1 mm]	Erweichungspunkt [°C]	Alterungsindex
A	B55/70	70	48.8	1.108
B	B80/100	95	45.0	1.115
C	B120/150	148	40.4	1.051
D	B80/100	82	46	1.238
F	SBS	42	72.4	0.857
G	Plastomer	52	59.8	1.077

6.3 Einfluss der Eigenschaften von Fillern auf das Alterungsverhalten

6.3.1 Bewertung der Filler in Hinblick auf Norm

Die Bewertung der Filler erfolgt nach der Norm [SN 760'760], weil sich ihre Untersuchung an dieser orientierte. Zu beachten ist, dass die petrografische Beurteilung den Gehalt an quellfähigen Glimmermaterialien nur abschätzt. Für die vorliegende Forschung stellen diese Einschränkungen keinen wesentlichen Nachteil dar, weil die Abschätzung der Anteile ausreicht, um Hinweise auf wirksame petrografische Bestandteile zu erhalten. Eine Abklärung der Reaktionsmechanismen würde die Herstellung von Kunstfillern erfordern und sprengt den Rahmen dieser Forschung.

Von den 8 in der Schweiz verbreitet eingesetzten Fillern genügen nur 5 den entsprechenden Anforderungen für den Gebrauch in Deck- und Tragschichten. Bei Filler 1 liegt dabei der Anteil von Tonmineralien im für Deckschichten kritischen Bereich.

Filler 3 weist viel Glimmer und Chlorit auf und genügt den Anforderungen zum Gebrauch für Deckschichten nicht. Er genügt wahrscheinlich auch nicht den Anforderungen zum Gebrauch in Tragschichten.

Filler 5 weist einen zu kleinen Anteil im feinen Bereich auf (10 Masse-% statt 25 bis 65 Masse-% für den Anteil kleiner 0.02mm, 5 Masse-% statt 10 bis 15 Masse-% für den Anteil kleiner 0.005 mm).

Filler 7 weist einen zu hohen Anteil von Tonmineralien für Deckschichten auf, dürfte aber für die Tragschichten noch genügen.

6.3.2 Bewertung der Filler hinsichtlich Feinheit

Filler 5 ist ein grober Filler.

Filler 8 ist ein ungewöhnlich feiner Filler.

Filler 6 hat einen relativ hohen Anteil grober und einen eher geringen Anteil feiner Körner, Filler 1 hat ebenfalls einen relativen hohen Anteil grober aber einen relativ hohen Anteil feiner Körner.

Die Filler 2, 3, 4 und 7 haben eine durchschnittliche Korngrößenverteilung.

6.3.3 Katalytisches Verhalten der Filler

Tabelle 6.2 stellt die petrografischen Eigenschaften der Filler dem katalytischen Verhalten gegenüber. Neben dem Mittelwert des Alterungsindex aller Bindemittel für den jeweiligen Filler ist auch der Mittelwert der nicht modifizierten Filler angeführt. Die meisten Filler sind als unkritisch zu betrachten. Filler 5 ist ein Spezialfall. Er ist der einzige, bei dem Glimmer und ähnliche Mineralien völlig fehlen. Die Tabelle 6.2 erweckt zusammen mit Tabelle 5.14 und Tabelle 5.15 den Eindruck, dass die Anwesenheit von Quarz und Kalk als Hauptbestandteile die Oxidation fördern, während silikatische Schichtmineralien ihr entgegenwirken. Das müsste in weiteren Forschungen gezielt abgeklärt werden.

Probe	Karbonatgehalt [Masse-%]	Hauptbestandteile des säureunlösli- chen Anteils	Zentralwert der Korn- grösse [μ]	Mittelwert des Al- terungsindex	
				alle	unmodi- fizierte
				Bindemittel	
Filler 1	96 \pm 5	Quarz, Kaolinit	47.9	0.946	0.941
Filler 2	4 \pm 5	Quarz, Feldspat	29.4	1.054	1.075
Filler 3	20 \pm 5	Quarz	25.2	1.061	1.099
Filler 4	58 \pm 5	Quarz	29.4	1.110	1.207
Filler 5	34 \pm 5	Quarz	81.0	1.221	1.327
Filler 6	52 \pm 5	Quarz	40.6	1.120	1.196
Filler 7	65 \pm 5	Quarz	28.8	0.976	1.033
Filler 8	100 \pm 5	Quarz	16.6	1.105	1.142

6.4 Evaluation kritischer Kombinationen von Fillern und Bindemitteln

Das wichtigste: Filler 5 ist besonders katalytisch aktiv und führt bei den Bindemitteln A und D zu einer kritischen Kombination. Von den beiden polymermodifizierten Bindemitteln neigt F zu einem Polymerabbau mit allen Fillern, während G sich ausgezeichnet verhält.

6.5 Verifikation der Praxisrelevanz des Alterungsindex mittels der Ermüdungsprüfung

Die Ermüdungsprüfung mit dem DSR muss als eine anspruchsvolle Prüfung bewertet werden, weil es zu Ablösungen zwischen Platte und Bindemittel kommen kann. Eine weitgehende Ablösung wird zwar beim Ausbau der Probe entdeckt, eine geringfügigere reduzierte Haftung könnte aber nur mit einer mikroskopischen Untersuchung festgestellt werden. Insgesamt lassen sich dennoch folgende Folgerungen ziehen:

- Der Alterungsindex „Ermüdung“ stimmt innerhalb von maximal 0.12 gut mit dem zuvor bestimmten Alterungsindex überein. Dabei ist anzumerken, dass die Serienuntersuchung und die Ermüdungsprüfung mit einem anderen Prüfprogramm und bei anderen Prüfbedingungen durchgeführt worden sind.
- Die Übereinstimmung der beiden Alterungsindexe schliesst einen Absorptionsmechanismus von Bitumenbestandteilen in Poren des Fillers als wesentlichen Mechanismus aus (siehe Kapitel 1.1.4).
- Der katalytische Einfluss auf die Verhärtung betrifft somit nicht nur die Prüftemperatur von 55 °C für die Bestimmung des Alterungsindex, sondern tritt auch im für die Rissbildung auf der Strasse wichtigeren Bereich von 30 °C auf.
- Beim empfindlichen Bindemittel D ist eine ausgeprägte Abnahme des den Widerstand gegen Ermüdung charakterisierenden Wertes N_{50} festzustellen
- Beim unempfindlichen Bindemittel F ist dagegen eine Zunahme dieses Wertes festzustellen.

Tabelle 6.3 Ermüdungsverhalten und Alterungsindex

Mastix	Ohne katalytische Wirkung		Mit katalytischer Wirkung		Alterungsindex	
	Modul zu Beginn [MPa]	N ₅₀	Modul zu Beginn [MPa]	N ₅₀	Ermüdung	Serien-Untersuchung
1/D	15.00	40367	15.36	18020	0.98	1.04
1/F	21.00	48440	20.11	94308	0.96	0.88
5/D	10.59	29641	16.68	11315	1.59	1.47
7/F	23.91	22353	18.56	49147	0.72	0.73

Insgesamt bestätigt diese Untersuchung des Ermüdungsverhaltens die Praxisrelevanz des Alterungsindex. Das betrifft sowohl den Modul zu Beginn wie auch das Ermüdungsverhalten selber.

6.6 Einschränkung von Anwendungsgebieten für Filler

Vorsicht ist bei offenporigen Asphalten mit Fillern wie Typ 5 geboten. Kritisch sind auch andere Asphalte mit relativ hohem Hohlraumgehalt, insbesondere, wenn sie in dünnen Schichten eingebaut werden. Im weiteren drängt sich die Frage auf, was bei den hohen Temperaturen wie beim Einbau von Gussasphalt passiert. Hier besteht durchaus noch Forschungsbedarf.

6.7 Verfahrensbeschreibung

Obwohl im Forschungsantrag ein Vorschlag für eine Richtlinie eingeschlossen ist, macht das nur wenig Sinn. Der Stand der europäischen Normierung lässt eine normative Festlegung eines Grenzwert für den Alterungsindex nicht zu. Erfolgversprechender ist deshalb eine internationale Publikationstätigkeit und eine Einflussnahme auf die europäische Normierung. Anstelle eines Normentwurfes für eine Richtlinie beschreibt dieses Kapitel das Verfahren in seinen wesentlichen Punkten. Der Beschrieb ist so gegliedert, dass er als Vorlage für eine Prüfnorm verwendbar ist.

6.7.1 Prinzip der Prüfung

Ein Mastix mit einem Fillergehalt von 57 Masse-% wird mittels zwei Methoden hergestellt.

Methode O, ohne Möglichkeit einer katalytischen Wirksamkeit des Fillers, umfasst die Schritte:

- Durchführen der Prüfung auf Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft [EN12607]
- Anschliessend durchführen der Alterung im Druckgefäss gemäss [PAV97]
- Mischen des so gewonnenen Bindemittels mit Filler bis zur völlig homogenen Durchmischung
- Abkühlen und lagern bis zur Prüfung
- Bestimmen des komplexen Moduls M_o mittels DSR [DSR95]

Methode K, mit Möglichkeit einer katalytischen Wirksamkeit des Fillers, umfasst die Schritte:

- Herstellen einer Mischung von Bitumen mit 25 Masse-% Filler (fillerisiertes Bindemittel)
- Durchführen der Prüfung auf Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft [EN12607]
- Mischen des so gewonnenen fillerisierten Bindemittels mit weiterem Filler bis zur völlig homogenen Durchmischung

- Anschliessend durchführen der Alterung im Druckgefäss gemäss [PAV97]
- Abkühlen und lagern bis zur Prüfung
- Bestimmen des komplexen Moduls M_k mittels DSR [DSR95]

Der Quotient der Modulwerte ergibt den Alterungsindex A gemäss Gleichung (1).

6.7.2 Prüfgeräte

Dynamic Shear Rheometer geeignet zur Bestimmung des komplexen Moduls bei den Bedingungen Temperatur = 55 °C, Frequenz = 1 Hz, Dehnung = 0.01 m/m. Dabei werden während mindestens 60 s mindestens 10 Messungen gemacht werden sollen, um sicherzustellen, dass die Lastangriffe nicht die Materialeigenschaften verändern

Rolling Thin Film Oven gemäss [EN12607]

Pressure Aging Vessel gemäss [PAV97]

Rührwerk mit stufenloser Regulierung der Drehzahl bis 120 Umdrehungen pro Minute und Röhreinsätzen, die es erlauben, homogene Mischungen von Filler und Bitumen in den gewählten Mischgefässen herzustellen.

Mischgefäss Gefäss aus Metall, ca. 30 bis 50 ml, geeignet, um unter dem Rührwerk auf einer Heizplatte mit gutem Kontakt befestigt werden zu können; mit Deckel zum Aufbewahren der hergestellten Mischungen

Ofen einstellbar bis 220 °C zum Aufschmelzen des Bindemittels und zur Trocknung der Filler, einstellbar auf ± 5 °C

Heizplatte regulierbar bis 180 °C

Allgemeines Labormaterial

6.7.3 Durchführen der Prüfung

Grundsätzlich ist je nach verwendeten Gerätschaften die Durchführung so zu optimieren, dass die angegebenen Bedingungen erfüllt sind. So kann etwa die optimale Rührgeschwindigkeit je nach Gefäss und Röhreinsatz ändern.

Arbeit	Beschreibung
Heizplatte einstellen	Temperaturmessung im auf die Heizplatte gestellten Mischgefäss installieren und Regulierung der Heizplatte so einstellen, dass die gewünschte Mischtemperatur im mit Sand gefüllten Mischgefäss erreicht wird.
Aufschmelzen von Bindemitteln	gemäss [EN12954].
Aufschmelzen von Mastix	In Anlehnung an [EN12954].
Herstellung von Mastix	Mischen bei einer Temperatur von 150 °C unter konstantem Rühren, so dass das Bindemittel den Filler absorbiert aber kein Schäumen auftritt. Das Gefäss mit Filler ist ebenfalls auf die Heizplatte zu stellen. Der Filler ist dabei in kleinen Portionen nicht schneller zuzugeben, als er vom Bindemittel absorbiert werden kann.

Homogenisieren des Mastix	Die Mischung ist nach dem völligen absorbieren des Fillers noch eine Minute lang bei etwa 50 bis 70 % der zuvor verwendeten Rotationsgeschwindigkeit zu rühren.
Abkühlen des Mastix	Die Mischung ist so rasch wie möglich von der Heizplatte zu nehmen und auf eine kalte Unterlage (am besten Metallplatte) zu stellen, damit die Mischung rasch abkühlt und keine Entschichtung durch Sedimentation entsteht.
Lagern des Mastix	Der Mastix ist bei Raumtemperatur in einem verschlossenen Gefäss zu lagern.
Verhärten des Bindemittels	Gemäss [EN12607]: Fillerisiertes Bindemittel kann wie normales Bindemittel dieser Prüfung unterzogen werden, die Konzentration des Fillers darf aber 25 Masse-% nicht überschreiten. Bei höheren Konzentrationen kann der Mastix aus den RTFO-Gläsern austreten.
Altern von Bindemittel	Gemäss [PAV97] bei 100 °C: Der Mastix wird bei gleichen Bedingungen gealtert. Dabei sedimentiert der Filler, der Mastix muss deshalb sorgsam gesammelt und dann gemischt werden.
Bestimmen des komplexen Moduls	In Anlehnung an [DSR95]: Es ist ein Prüfprogramm zu verwenden, das während mindestens einer Minute den komplexen Schubmodul misst. Es sind mindestens 10 Werte zu erfassen.
Prüfbedingungen DSR	Temperatur: 55 °C Frequenz: 1 Hz Dehnung: 0.01 m/m
Auswertung	Die erhaltenen Messwerte sind grafisch darzustellen und zu überprüfen. Wenn sie einen Trend aufweisen, beeinflusst der Messvorgang die Steifigkeit, das heisst, diese nimmt durch die Belastung ab. Die Messung muss dann bei geringerer Dehnung wiederholt werden. Der erste Messwert ist hin und wieder ein Ausreisser. Er ist dann auf Grund der visuellen Beurteilung oder besser eines Ausreissertest zu streichen. Der Mittelwert der verbleibenden Messwerte gilt dann als M_0 oder M_k .
Alterungsindex A	Wird als Quotient von M_k durch M_0 berechnet.

6.7.4 Auswertung

Der Alterungsindex A wird nach Gleichung (1) berechnet.

7 Forschungsbedarf

7.1 *Konditionierung des Fillers*

Eigenfiller und Fremdfiller werden in den Mischanlagen sehr unterschiedlichen thermischen Belastungen ausgesetzt. Im Rahmen des Forschungsauftrages konnte nicht auf diese Problematik eingegangen werden, da das zusätzlich eine genaue, auf das Problem zugeschnittene Abklärung bei Mischwerken erfordert hätte. Eine telefonische Umfrage zeigte auf, dass das im finanziellen Rahmen des Auftrages nicht machbar war. Als Konsequenz hätten zudem bei verschiedenen Fillern zusätzliche Untersuchungen mit abweichenden Konditionierungen durchgeführt werden müssen. Entsprechende Untersuchungen sind empfehlenswert, weil sie verhindern, dass Filler falsch bewertet werden.

7.2 *Untersuchungen des Einflusses höherer Mischtemperaturen*

Bei Gussasphalt treten höhere Mischtemperaturen auf. Es wäre wünschenswert, abzuklären, ob unter solchen Umständen bereits beim Mischen eine katalytisch verursachte Versprödung des Bindemittels stattfindet.

7.3 *Untersuchung des Einflusses der Petrografie*

Die Ergebnisse (Abschnitt 6.3.3) geben erste Hinweise über den Einfluss der Petrografie auf den Alterungsindex. Weitere Abklärungen wären zu begrüssen. Dabei wäre mit gezielt hergestellten Kunstfillern genau definierter Zusammensetzung und Korngrössenverteilung zu arbeiten.

7.4 *Untersuchung von Schadenfällen*

Wie bei vielen Prüfmethode ist auch hier der Zusammenhang der Kenngrösse mit real auftretenden Schäden ungeklärt. Diesem Aspekt sollte in Zukunft generell mehr Beachtung geschenkt werden.

8 Literaturverzeichnis

8.1 Fachliteratur

- [JUN.J74] Junker J.P., Weber J. Fritz H.W. **Untersuchung von Steinmehlen zur Erarbeitung von Prüf- und Qualitätsvorschriften**, FA6/71, 1974
- [GUB.R77] R. Gubler, H.W. Fritz, FA 8/77, **Anforderungen an Strassenbaubitumen**, EMPA-Bericht 37957, Eidgenössisches Departement des Inneren, 1974
- [BER.A89] A. Bernhard, R. Gubler, FA 3/83, **Filler für bituminöses Mischgut**, Empa-Bericht 48500, Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, Bericht 172, 1989
- [SCH.T96] Scholz, T.V.; "Brown, S.F.; **Rheological Characteristics of Bitumen in Contact with Mineral Aggregates**" AAPT 1996.
- [YOU.K97] Younger, K.D., Partl, M.N., Fritz, H.W., Gubler, R.: **Asphalt Concrete Shear Testing with the Coaxial Shear Tester**. Proceedings of 5th Int. RILEM Symposium on Mechanical Tests for Bituminous Materials MTBM '97, Lyon, France, 14-16May. pp189-195, (1997)
- [GUB.R98] Gubler, R., Liu, Y., Anderson, D.A.: **Effects of Mineral Filler on Aging of Asphalt Binders**. 3rd International Conference on Road & Airfield Pavement Technology ICPT'98, Beijing, P.R. China, 28-30 April, Vol.1, pp54-62, (1998)
- [GUB.R99] Gubler, R., Liu, Y., Anderson, D.A., Partl, M.N.: **Investigation of the System Filler and Asphalt Binders by Rheological Means**. Journal of the AAPT, Vol.68, p284- 304, (1999)
- [GUB.R03] Gubler, R., Partl, M.N., Riedi, M. Angst, Ch.: **Test Methods for the Behaviour of Bituminous Binders at Low Temperature**. Proceedings of 6th Int. RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials PTEBM03, Zürich, Switzerland, 14-16April, edited by M.N. Partl, RILEM Publications S.A.R.L., ISBN 2-912143-35-7, pp442-449 (2003)
- [AIR.G04] Airey G.D., Thom N.H., Osman S., Huang H., Collop A.C., **A comparison of bitumen/mastic fatigue data from different test methods**, Fifth Rilem Conference: Cracking in Pavements, Mitigation, Risk assessment, and Prevention, May 5-7, 2004
- [SOK.K05] Sokolov, K., Gubler, R., Partl, M.N.: **Extended Numerical Modeling and Application of the Coaxial Shear Test for Asphalt Pavements**, J. of Materials & Structures Nr 279, June, pp 515...522 (2005)
- [ROE.F] Röthlisberger, F. et al: **Base pour une actualisation des normes suisse SN 670'135 (filler pour enrobés bitumineux) en SN 670'850 (teneur en minéraux argileux)**, FA 1999/276, Forschung im Gange.
- [PAR.M] Partl, M.N., Gubler, R.: **Forschungsantrag zu COST 343 und 345 aufgrund des Schlussberichtes Substanzerhaltung, FP2 Dauerhafte Komponenten**, FA 2000/420, Forschung im Gange.

8.2 Schweizer Normen

Die in dieser Forschung verwendeten schweizerischen Normen sind aufgelistet. Wegen der Übernahmen europäischer Normen sind sie mehrheitlich nicht mehr in Kraft. Das ist jeweils mit *) angedeutet. Auf die grundsätzliche Aussagekraft dieser Forschung hat dieser Sachverhalt jedoch keinen Einfluss. Im Falle der Normen SN 671'740a und SN 671'743a besteht zwischen schweizerischer und europäischer Norm eine weitgehende Übereinstimmung.

SN 670'760a, Filler für bituminöses Mischgut *)

SN 670'810c, Korngrößenverteilung von Filler, Sand, Kies, Splitt und Schotter

SN 679'818, Sedimentationsanalyse nach Andreasen *)

SN 671'110e, Bitumen, Qualitätsvorschriften *)

SN 671'740a, Penetration bituminöser Bindemittel *)

SN 671'719a, Aschegehalt bituminöser Bindemittel

SN 671'743a, Erweichungspunkt Ring und Kugel *)

8.3 Andere Normen

[DSR95] TP5 Test Method for Determining Rheological Properties of Asphalt Binders Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR), AASHTO, 1995

[PAV97] PP1 Standard Practise for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV), AASHTO, 1997

[EN933] EN933-10:2001: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 10: Beurteilung von Feinanteilen, Kornverteilung von Füller (Luftstrahlsiebung)

[EN1426] EN1426:1999: Bitumen und Bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Nadelpenetration (1999)

[EN1427] EN1427:1999: Bitumen und Bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring und Kugel-Verfahren (1999)

[EN12591] EN12591:1999: Bitumen und Bitumenhaltige Bindemittel – Anforderungen an Strassenbaubitumen (1999)

[EN12954] EN12954:1999: Bitumen und Bitumenhaltige Bindemittel – Vorbereitung von Untersuchungspben

[EN12607] EN12607-1:1999: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft – Teil 1: RTFOT-Verfahren (1999)

[ISO5725] ISO 5725 Accuracy (Trueness and Precision) of Measurement Methods and Results Part 1 and Part 2

Anhänge

A3.3.1 Bestimmung des komplexen Moduls an Bindemittel bei einer Prüfbedingung

Vorbereiten des Gerätes

Das Bohlin DSR muss eingeschaltet und betriebsbereit sein. Mit Hilfe des DOS-Programmes wird die Einbautemperatur eingestellt und es muss abgewartet werden, bis das Temperaturgleichgewicht erreicht ist. Die Prüftemperatur ist zugleich die Einbautemperatur. Das Einstellen des Messspaltes erfolgt nach Einstellen des Temperaturgleichgewichtes. Wird mehrmals das gleiche Prüfprogramm bei der gleichen Temperatur verwendet, genügt eine Einstellung des Messspaltes.

Probenvorbereitung

Ein Polylöffel wird im Bunsenbrenner kontrolliert während 20 s erwärmt. Die benötigte Menge Bindemittelmenge wird ausgestochen und Bindemittel schmelzen gelassen. Wenn nötig wird der Löffel nochmals für 5 s in die Flamme halten. Dann wird das Bindemittel auf den Stempel gegossen, 2 Minuten abkühlen gelassen, eingebaut und nach Vorschrift in Prüfzustand gebracht.

Prüfen

Das Prüfen erfolgt mit dem DOS-Programm des Bohlin DSR-Gerätes unter Verwenden eines vordefinierten Prüfablaufes gemäss Tabelle 0.1. Vor Start wird die eingebaute Probe auf Temperatur gebracht und 5 Minuten temperiert. Die Prüfung erfolgt automatisch und dauert je Strainlevel etwas mehr als eine Minute.

Datenspeicherung

Die Daten werden vom System automatisch unter fixen Dateinamen als Binärdateien abgespeichert. Es wird deshalb eine Software eingesetzt, die diese Dateien unmittelbar nach dem Prüfen auf projektgerecht bezeichnete Dateien abspeichert. In einem Dialog werden dabei Bindemittel, Filler, Fillerkonzentration und Art der Alterung abgefragt und daraus die Dateinamen für die definitive Speicherung berechnet. Pro Prüfung werden zwei Dateien erzeugt, die die Ergebnisse der Prüfung bei niedrigem und bei hoher Dehnung enthalten.

Anmerkung: Beim Bestimmen des Moduls von Bindemitteln wird einfach die Fillerkonzentration 0 eingesetzt.

Tabelle 0.1 Prüfbedingungen für das Bestimmen der komplexen Module

Art der Prüfung	Oszillation
Art des Prüfablaufes	automatisiert
Vorbereitung	55 °C, 60 s temperieren
Prüfvorgang 1	55 °C, Dehnung 0.01 [m/m], 54 Sekunden messen
Prüfvorgang 2	55 °C, Dehnung 0.1 [m/m], 54 Sekunden messen

Anmerkung: In den methodischen Untersuchungen wurde teilweise mit abweichenden Prüftemperatur gearbeitet, insbesondere mit 52 °C.

Auswertung

Die detaillierte Auswertung ist in Abschnitt 4.3 beschrieben.

A3.3.2 Bestimmung des komplexen Moduls zur Charakterisierung des Bindemittels

Prinzipien und Probenvorbereitung

Es wird gleich wie beim Verfahren A3.3.1 vorgegangen.

Prüfen

Das Prüfen erfolgt mit dem DOS-Programm des Bohlin DSR-Gerätes unter Verwenden eines vordefinierten Prüfablaufes gemäss Tabelle 0.2. Vor Start wird die eingebaute Probe auf die erste Prüftemperatur gebracht und 5 Minuten temperiert. Die Datenspeicherung erfolgt wie bei Verfahren A3.3.1.

Tabelle 0.2 Prüfbedingungen für das Charakterisieren von Bindemitteln

Art der Prüfung	Oszillation
Art des Prüfablaufes	automatisiert
Vorbereitung	40 °C, 60 s temperieren
Prüfvorgang	Variation von Temperatur und Frequenz von 40 bis 70 °C und 0.1 bis 10 Hz

A3.4 Herstellen von Mastix*Portionieren*

Die benötigte Menge Bindemittel wird im Anlieferungszustand kalt entnommen. Es wird in abgedeckter Pfanne bei 150 °C im Ofen aufgewärmt, bis es fließfähig ist und dann in beschriftete Aufschmelzgefässe eingewogen. Diese werden für spätere Verwendung bei Raumtemperatur gelagert.

Mischen

Das Bindemittel wird in gedeckten Gefässen im Ofen auf 150 °C aufgewärmt. Der eingewogene und konditionierte Filler wird ebenfalls im Ofen gelagert. Die Heizplatte wird auf ca. 170 °C Oberflächentemperatur aufgewärmt. Gemäss Messungen ergibt das im Mischgefäss eine Bindemitteltemperatur von 140 bis 150 °C. Das Bindemittelgefäss wird dem Ofen entnommen, mit einer passenden Klammer befestigt und mit 80 bis 90 Umdrehungen pro Minute gerührt. Anschliessend wird der getrocknete und heiss gehaltene Filler portionenweise während 3 bis 6 Minuten zugegeben. Dann wird gemäss Rührprogramm in Tabelle 0.3 homogenisiert. Sichtbarer Filler muss dabei völlig vom Bindemittel aufgenommen werden. Am Rührstab klebender Filler muss so weit wie möglich durch leichtes Klopfen an den Rührstab in die Mischung befördert werden. Dann wird eine halbe bis eine Minute bei geringer Drehzahl gerührt, um die Luft aus der Probe entweichen zu lassen. Nach dem Herausziehen des Rührstabes lässt man diesen kurz abtropfen, um zu grosse Verluste an Mastix zu vermeiden. Es darf aber nicht länger als 10 s gewartet werden, damit keine Sedimentation einsetzt. Der Tiegel wird dann von der Heizplatte genommen und auf eine kalte Platte gestellt. Auf die Heizplatte wird zweckmässig ein Reinigungspapier gelegt, das allenfalls weiter tropfenden Mastix auffängt.

Tabelle 0.3 Rührprogramm für das Homogenisieren der Filler-Bitumenmischungen

Rührvorgang	Rührerstellung	Umdrehungen pro Minute	Dauer
Sichtbarer Filler einmi-	Knapp über dem Ge-	ca. 130	Bis kein Filler

schen			mehr sichtbar ¹⁾
Fertigmischen	fässboden	ca. 130	1 bis 2 Minuten
Entlüften		60	0.5 bis 1 Minute
Abtropfen	völlig herausgezogen	0	5 bis 10 s ²⁾

1) Eventuell nachhelfen wie oben beschrieben

2) Es muss ein Reinigungspapier greifbar sein. Den Rührer herausnehmen, dem Abtropfen eventuell mit Reinigungspapier nachhelfen, sodass nicht zu viel Mastix verloren geht. Restliche Tropfnase abputzen, damit nicht die Heizplatte verschmutzt wird. Dose dann sofort von der Heizplatte nehmen und auf kalte Unterlage stellen. Das ist wichtig, damit sie möglichst rasch abkühlt und keine Sedimentation eintritt.

A3.5 Alterung und Herstellung des Mastix

Die Herstellung der zu untersuchenden Mischung auf Filler und Bitumen (Mastix genannt) erfolgt auf den zwei Wegen K mit katalytischer Wirkung des Fillers und O ohne katalytische Wirkung des Fillers.

Beim Weg K, mit katalytischer Wirkung des Fillers bei der Alterungen, wird

- im Schritt 1 das ungealterte Bindemittel fillerisiert
- im Schritt 2 dann die Verhärtung nach RTFOT durchgeführt
- im Schritt 3 das fillerisierte Bindemittel zum K-Mastix gemischt und
- im Schritt 4 der K-Mastix im PAV gealtert.

Beim Weg O, ohne katalytische Wirkung des Fillers, wird

- im Schritt 1 Bindemittel im RTFOT verhärtet
- im Schritt 2 das verhärtete Bindemittel im PAV gealtert und
- im Schritt 3 das gealterte Bindemittel zum O-Mastix gemischt.

A3.5.2 Konditionieren des Fillers

Je 10 bis 15 g Filler werden im Ofen bei Temperaturen gemäss Angaben in Tabelle 0.4 aufgeheizt. Anschliessend wird der Filler im gedeckten Tiegel im Ofen bei 160 °C gelagert und am gleichen Tag gebraucht.

Tabelle 0.4 Temperaturen für das Konditionieren von Fillern

Art der Prüfung	Konditioniertemperatur	Konditionierdauer
Konditionieren des Fillers	220±25 °C	4±0.5 Minuten

A3.5.3 Herstellen von fillerisiertem Bindemittel

Unter fillerisiertem Bindemittel wird eine Mischung von Filler und Bitumen mit 25 Masse-% Filler verstanden. Die Herstellung einer erfolgt zweckmässigerweise direkt in den RTFOT-Gläsern. Die RTFOT-Gefässe werden im Ofen vorgewärmt. 32±0.50 g Bindemittel werden in RTFOT-Gefäss eingewogen und abkühlen gelassen. Die Einwaage wird durch 3 dividieren um die Masse des benötigten Fillers zu bestimmen. Die benötigte Menge Filler wird im Tiegel konditioniert und heiss verwendet. Das RTFOT-Glas mit Bindemittel wird für 10 Minuten in den auf 163 °C vorgewärmten RTFOT-Ofen gestellt. In das so aufgeschmolzene Bindemittel wird der Filler direkt aus dem Tiegel zugeben. Das RTFOT-Glas wird schief gehalten und durch Drehen aus dem Handgelenk wird vorgemischt bis der Filler vom Bindemittel aufgenommen worden ist. Nötigenfalls ist das Glas nochmals ca. 10 Minuten im Ofen aufzuwärmen und dann ist durch Drehen des Glases fertig zu mischen. Es werden 2 RTFOT-Gefässe benötigt um anschliessend die Alterung im PAV durchführen zu können.

A5.5.5 Herstellen von Mastix aus gealtertem Bindemittel

Vom gealterten Bindemittel werden 16 g in das Mischgefäss eingewogen und bei 150 °C temperiert. Die benötigte Menge Filler wird aus der Einwaage des Bindemittels berechnet und konditioniert. Anschliessend wird das Bindemittel während 3 bis 6 Minuten wie oben gerührt und der Filler beigegeben. Zuletzt wird gemäss Tabelle 0.3 homogenisiert.

A3.6.1 Bestimmung des komplexen Moduls an Mastix

Prinzipien

Jedes Aufschmelzen und Handhaben des verflüssigten Mastix birgt das Risiko von Entmischung in sich. Die Probenvorbereitung ist so gestaltet, dass dieses Risiko minimiert wird. Die Proben werden deshalb nicht in Formen gegossen, sondern kalt entnommen, rasch aufgeschmolzen und gerade auf den Stempel gegossen. Es werden bei konstanter Temperatur (55 °C) und Frequenz (1 s^{-1}) jeweils 20 Messungen bei tiefer und 20 Messungen bei hoher Dehnung durchgeführt. Das erlaubt es:

- Ausreisser zu eliminieren (am häufigsten der erste Wert)
- Sicherzustellen, dass die Messung selber nicht die Ergebnisse beeinträchtigt
- Durch Wiederholung dieses Vorganges bei höherer Dehnung dessen Einfluss zu ermitteln

Probenvorbereitung und Einbau

Der Polylöffel wird im Bunsenbrenner während 20 s kontrolliert erwärmt. Die benötigte Menge Mastixmenge wird aus der Dose ausgestochen. Dann wird während ca. 30 s zugewartet, ob der Mastix schmilzt. Wenn nötig wird der Polylöffel nochmals für 5 s in die Flamme gehalten. Sobald der Mastix aufgeschmolzen ist, wird er mit einem dünnen Glasstab durchgerührt und auf Stempel gegossen, 2 Minuten abkühlen gelassen und ins Gerät eingebaut. Nach Vorschrift wird dann der Stempel von 25mm auf einen Spalt von 1.05 bis 1.08 mm abgesenkt. Es wird 15 s gewartet, um der Probe Zeit zu geben sich anzupassen. Dann wird die Probe getrimmt, das heisst der aus dem Spalt ausgequetschte Mastix mit Hilfe eines vorgewärmten Spatels entfernt. Anschliessend wird der Stempel auf 1.00 mm abgesenkt und die Probe geflutet und 3 bis 5 Minuten temperiert.

Prüfen

Das Prüfen erfolgt mit dem DOS-Programm Bohlin DSR-Gerät unter Verwenden eines vordefinierten Prüfablaufes gemäss Tabelle 0.5. Der automatisierte Ablauf umfasst einen Wartezeit von 60 s, damit sich das beim Trimmen gestörte Temperaturgleichgewicht wieder einstellen kann. Dem schliesst sich eine Messung bei einer niedrigen Dehnung, die den eigentlichen Kennwert, den komplexen Modul liefert. Dem folgt zum Schluss eine Messung bei hoher Dehnung. Dessen Ergebnisse können der Kontrolle dienen, indem der dabei auftretende Modulabfall Hinweise auf Defekte im Prüfkörper geben kann.

Datenspeicherung

Die Datenspeicherung erfolgt gemäss A3.3.1. Filler und seine Konzentration müssen nun angegeben werden.

Tabelle 0.5 Prüfbedingungen für das Bestimmen der komplexen Moduln

Art der Prüfung	Oszillation
Art des Prüfablaufes	automatisiert
Wartezeit	55 °C, 60 s temperieren
Prüfvorgang 1	55 °C, Frequenz 1 Hz, Dehnung 0.01 [m/m], 20 Messungen

Prüfvorgang 2	55 °C, Frequenz 1 Hz, Dehnung 0.1 [m/m], 20 Messungen
---------------	---

Auswertung

Die Auswertung erfolgt unter Windows mit einem speziell entwickelten Programm. Es dekodiert die binäre Datei, die vom Messgerät erzeugt worden ist und zeigt für die 20 Messungen Messzeit, komplexer Modul und Phase an. Zur Information wird der Dateiname nach Bindemittel und Filler aufgeschlüsselt. Als Information werden die Einstellungen von Frequenz und Temperatur angezeigt. Die Mittelwerte der Messtemperaturen, der gemessenen Werte für den Strain, Module und Phasen werden angezeigt. Die Daten sind als Beispiel in Tabelle 0.6 zusammengestellt.

Tabelle 0.6 Anfallende Rohdaten beim Bestimmen des komplexen Moduls

Zeit [s]	komplexer Modul [kPa]	Phase [°]
6.26	221.869	60.0545
9.12	229.342	59.6547
11.92	220.924	61.4358
14.66	218.131	63.4115
17.46	212.783	61.7253
20.27	219.324	61.986
23.01	219.871	61.6975
25.76	217.834	60.0618
28.56	227.066	60.6706
36.8	221.976	63.8906
39.6	219.023	61.9403
42.4	218.823	61.9084
45.2	217.437	63.6377
48.17	215.064	63.5288
51.02	224.321	61.3265
54.04	228.322	61.5084
59.65	217.844	62.8053
62.61	212.362	63.2401
65.47	209.047	61.8096
73.98	218.279	61.4684
Auswertung von Datei	C:\EmpaDaten\AUFTTRAG\ALTBDMF\k1\K1A57L6	mit Mastix K1A57L6
Bindemittel	A	
Filler	1	
Temperatur:	55	
Frequenz:	1	
Mittlerer Strain	0.00998151955447995	
Mittelwert Temperaturen	55.035	
Mittelwert Module	219.482	
Mittelwert Phasen	61.8881	
Meldung zur Auswertung	Datei bearbeitet	
96 Datensätze vorhanden		

Für Temperatur, Modul und Phase wird dabei nach der Methode von Grubbs [ISO5727] ein Ausreissertest durchgeführt. Sobald damit ein Werte als fragwürdig erkannt wird, wird der ganze Datensatz ausgeschlossen. Das Ausschliessen wird fortgesetzt, bis keine Ausreisser mehr gefunden wurden, dann wird der Mittelwert berechnet.

A3.6.3 Bestimmen des Ermüdungsverhalten als Mass für das Rissverhalten

Prinzipien

Grundsätzlich gelten die gleichen Prinzipien wie beim Bestimmen des komplexen Moduls am Mastix. Die Prüfung umfasst aber knapp 100000 Belastungszyklen und es fallen 1010 Daten-

sätzen an. Es werden nicht Mittelwerte gebildet, sondern die Entwicklung des Modul als Funktion der Zykluszahl ausgewertet.

Vorbereiten des Gerätes, Probenvorbereitung und Einbau

Diese beiden Punkte erfolgen analog wie bei der Bestimmung des Moduls an Mastix, aber bei anderen Prüfbedingungen.

Prüfen

Das Prüfen erfolgt mit dem DOS-Programm des Bohlin DSR-Gerätes unter Verwenden eines vordefinierten Prüfablaufes gemäss Tabelle 0.7. Der automatisierte Ablauf umfasst einen Wartezeit von einer Minute, damit sich das beim Trimmen gestörte Temperaturgleichgewicht wieder einstellen kann. Dem schliesst sich eine Messung mit 10 Messungen in möglichst raschem Rhythmus an, die dem Bestimmen des Anfangsmoduls dient. Dem folgt eine Messerie von 100 Messung in Abständen von 5 s und abschliessend wird eine Messerie von 900 Messungen in Abständen von 10 s durchgeführt.

Datenspeicherung

Die Datenspeicherung erfolgt analog zu A3.3.1

Tabelle 0.7 Prüfbedingungen für das Bestimmen des Ermüdungsverhaltens

Art der Prüfung	Oszillation
Art des Prüfablaufes	automatisiert
Wartezeit	40 °C, 60 s temperien
Prüfvorgang 1	40 °C, Frequenz 10 Hz, Dehnung 0.02 [m/m], 10 Messungen
Prüfvorgang 2	40 °C, Frequenz 10 Hz, Dehnung 0.02 [m/m], 100 Messungen
Prüfvorgang 3	40 °C, Frequenz 10 Hz, Dehnung 0.02 [m/m], 900 Messungen

Auswertung

Die Auswertung erfolgt unter Windows mit einem speziell entwickelten Programm. Es dekodiert die binäre Datei, die vom Messgerät erzeugt worden ist und berechnet für die ersten 10 Messungen den Mittelwerte des komplexen Moduls als Modul am noch nicht ermüdeten Material. Er wird als Startmodul bezeichnet. Dann wird laufend Modul, Phase und Temperatur aus den binärend Daten extrahiert (siehe als Beispiel Abbildung 5.35). Durch Vergleich des allmählich abnehmenden Moduls mit dem Startmodul wird die Zykluszahl N_{50} ermittelt, bei der der Modul auf 50% des Startmoduls gesunken ist.