Die approbierte Originalversion dieser Dissertation ist in der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.
http://www.ub.tuwien.ac.at

The approved original version of this thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology.
http://www.ub.tuwien.ac.at/eng

DOCTORAL THESES

Interlink between the production process and the long term behaviour of asphaltic facings in hydraulic engineering

---

DISSERTATION

Zusammenhang des Herstellungsprozesses und des Langzeitverhaltens von Asphaltbeton Dichtschichten im Wasserbau

verfasst von

Dipl.-Ing. **Mathias Smesnik**
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
Forschungsbereich für Wasserbau
Fakultät für Bauingenieurwesen
Technische Universität Wien

Erstgutachter

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. **Peter Tschernutter**
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
Forschungsbereich für Wasserbau
Fakultät für Bauingenieurwesen
Technische Universität Wien

Zweitgutachter

Dr.-Ing. habil. **Uwe Müller**
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Abteilungsleiter Wasser, Boden, Wertstoffe;
Lehrbeauftragter/Dozent an der Fakultät für Bauingenieurwesen
Technische Universität Dresden

Wien, September 2016

Inhaltsverzeichnis

I. Allgemeines 11

1. Bitumen und Asphaltbeton 13

1.1. Bitumenzusammensetzung und Bitumenmodelle (Materialmodelle) 14
1.2. Bitumenbestandteile (Fraktionen) 15
1.2.1. Maltene (engl. maltenes) 15
1.2.2. Asphaltene (engl. asphaltenes) 16
1.2.3. Harze (engl. resins) 17
1.2.4. Aromaten (engl. aromatics) 18
1.2.5. Paraffine; gesättigte-, linear- und zyklisch- verzweigte- Kohlenwasserstoffe (engl. Saturates) 18
1.3. Alterung von Bitumen 19
1.3.1. Alterungsprozesse 21
1.4. Polymermodifizierte Bitumen 21
1.4.1. Bautechnisch relevante Vor- und Nachteile der SBS Modifikation von Bitumen [42] 25
1.5. Alterung von SBS modifizierten Bitumen 26
1.5.1. Degradation von Molekülkolloiden des verwendeten Polymers 26
1.6. Anforderungen an Bitumen und polymermodifizierte Bitumen im Wasserbau 27

2. Simulation des Kurzzeitalterungsprozesses (STA) im Labor 29

2.1. Allgemeines 29
2.2. STA Mischgutalterungsversuch - Versuchsabläufe 30
2.2.1. Abkühlkurven Asphaltmischgut Bitumen 70/100 31
2.2.2. Abkühlkurven Asphaltmischgut PmB 45/80-65 33
2.3. STA Mischgutalterungsversuch - Versuchsstand 34
2.4. STA Mischgutalterungsversuch - Reproduzierbarkeit 37

II. Laboruntersuchungen 39

3. Materialeignungsprüfungen für die Laborversuche 41

3.1. Sieblinie für die Laboruntersuchungen 41
3.1.1. Bestimmung der Korngrößenverteilung in den Fraktionen 41
3.1.2. Siebliniendesign 44

3.2. Bestimmung der Affinität, des Hohlraumgehaltes sowie des optimalen Bindemittelgehalts . . . 47
3.2.1. Untersuchungsparameter und Laborproben für den optimalen Hohlraumgehalt . . . 47
3.2.2. Ergebnisse der Laborprüfungen . . . 47
3.2.3. Bestimmung der Affinität zwischen Bindemittel und Gesteinskörnung 52
3.2.4. Bestimmung der Standsicherheit (Standfestigkeit) . . . 52
3.2.5. Bestimmung der Flexibilität (Verformbarkeit) von Asphaltbetonoberflächendichtung . . . 53
3.3. Bestimmung der Bindemitteleigenschaften Bitumen 70/100 . . . 60
3.4. Bestimmung der Bindemitteleigenschaften B520 . . . 64

4. Weiterführende Bindemittelanalysen 67
4.1. Bestimmung der chemischen Bestandteile der Bindemittel (B520 und B533) mittels FTIR-ATR . . . 67
4.1.1. Interpretation der Spektren B520 (A) Charge 13:30 und B520 (A) Charge 17:10 . . . 68
4.1.2. Untersuchungen zur Eignung der FTIR-ATR Spektroskopie in Bezug auf die Beschreibung des Alterungszustandes von Bitumen . . . 69
4.1.3. Schlussfolgerungen zur Eignung der FTIR-ATR Spektroskopie . . . 81
4.2. Bestimmung der Polymerverteilung und Struktur . . . 82
4.2.1. Untersuchung der Polymerverteilung mittels Fluoreszenzmikroskopie 82
4.2.2. Mögliche Gründe für die Inhomogenitäten des untersuchten PmBs (B520) . . . 87
4.2.3. Abgleich gemittelte Ergebnisse der physikalischen Untersuchungen des ungealterten PmBs (B520) mit den Mikroskopaufnahmen . . . 87

5. Ergebnisse Laboruntersuchungen TPA Köln 89
5.1. Einfluss der STA Mischgutalterungsversuche auf den Erweichungspunkt Ring und Kugel, Bitumen 70/100 . . . 90
5.2. Einfluss der STA Mischgutalterungsversuche auf die Nadelpenetration, Bitumen 70/100 . . . 93
5.3. Einfluss der STA Mischgutalterungsversuche auf den Erweichungspunkt Ring und Kugel, B520 . . . 96
5.4. Einfluss der STA Mischgutalterungsversuche auf die Nadelpenetration, B520 99
5.5. Einfluss der STA Mischgutalterungsversuche auf die elastische Rückstellung, B520 . . . 101
5.6. Veränderung der Steifigkeit einer fertigen AF in Abhängigkeit des herstellungsbedingten Versprödungssustandes des Bindemittels . . . 103
5.6.1. Herstellung der Probekörper für die indirekte Zugprüfung . . . 103
5.6.2. Berechnung des Steifemoduls nach ÖNORM EN 12697 - 26 2012-11-01 104
5.6.3. Phasenwinkel . . . 106
5.6.4. Laborergebnisse aus der indirekten Zugprüfung . . . 107

5.6.5. Unterschied Oxidations- und Kombinationsversuche 118

6. Ergebnisse Laboruntersuchungen TU Wien 119
6.1. Einfluss der STA Mischgutalterungsversuche auf den Erweichungspunkt Ring und Kugel, B533 119
6.2. Einfluss der STA Mischgutalterungsversuche auf die Nadelpenetration, B533121
6.3. Einfluss der STA Mischgutalterungsversuche auf die elastische Rückstellung, B533 122
6.4. DSR Untersuchungen zu den STA Mischgutalterungsversuchen 123
6.4.1. DSR Messungen B533 128

7. Interpretationen der Laborergebnisse 135
7.1. STA Mischgutalterungsversuche versus Roling Thin Film Oven Test (RTFOT) 135
7.1.1. Vergleich RTFOT Untersuchungsergebnisse mit [11] 138
7.2. Bitumen versus polymermodifiziertes Bitumen 139
7.3. Bitumenbezeichnung und Klassifikation 140

III. Auswertung von Bestandsdaten 141

8. Bestandsdaten AF - Reservoirs 145
8.1. AF 1 145
8.1.1. Allgemeines 145
8.1.2. Bestandsdaten 1958 145
8.2. AF 2 147
8.2.1. Allgemeines 147
8.2.2. Bestandsdaten 1975 147
8.2.3. Sanierung AF 2006 148
8.3. AF 3 149
8.3.1. Allgemeines 149
8.3.2. Bestandsdaten 1973 149
8.3.3. Sanierung 2008 150
8.4. AF 4 151
8.4.1. Allgemeines 151
8.4.2. Bestandsdaten 1989 151
8.5. AF 5 154
8.5.1. Allgemeines 154
8.5.2. Bestandsdaten 1980 154
8.6. AF 6 156
8.6.1. Allgemeines 156
8.6.2. Bestandsdaten 1963 156
8.6.3. Sanierung 2011 159

8.7. AF 7 . . . 160
8.7.1. Allgemeines . . . 160
8.7.2. Bestandsdaten 1988 . . . 160
8.8. AF 8 . . . 161
8.8.1. Allgemeines . . . 161
8.8.2. Bestandsdaten 2010 . . . 161
8.9. AF 9 . . . 163
8.9.1. Allgemeines . . . 163
8.9.2. Bestandsdaten 2012 . . . 163
8.10. AF 10 . . . 166
8.10.1. Allgemeines . . . 166
8.10.2. Bestandsdaten 1972 . . . 166
8.10.3. Sanierung 2010 . . . 167
8.11. AF 11 . . . 172
8.11.1. Allgemeines . . . 172
8.11.2. Bestandsdaten 1972 . . . 172
8.12. AF 12 . . . 175
8.12.1. Allgemeines . . . 175
8.12.2. Bestandsdaten 1982 . . . 175
8.13. AF 13 . . . 177
8.13.1. Allgemeines . . . 177
8.13.2. Bestandsdaten 1973 . . . 177
8.14. AF 14 . . . 179
8.14.1. Allgemeines . . . 179
8.14.2. Bestandsdaten 1979 . . . 179
8.15. AF 15 . . . 181
8.15.1. Allgemeines . . . 181
8.15.2. Bestandsdaten 1984 . . . 181

9. Bestandsdaten AF - Kanäle 183
9.1. Ausleitungskanal . . . 183
9.1.1. Allgemeines . . . 183
9.1.2. Bestandsdaten . . . 183
9.2. Oberwasserkanal . . . 186
9.2.1. Allgemeines . . . 186
9.2.2. Bestandsdaten . . . 186

10. Abgleich und Interpretation der erhobenen Bestandsdaten mit Teil II 187
10.1. AF - Reservoirs . . . 187
10.1.1. Beschreibung und Interpretation der Bestandsdaten . . . 188
10.1.2. Vergleich der realen Kurzzeitalterung (STA) mit den Laborergebnissen 190
10.1.3. Auswertung der Langzeitalterung (LTA) . . . 192
10.2. AF - Kanäle . . . 194

10.3. Allgemeine Bemerkungen zum Einbauprozess 195

IV. Resümee **201**

10.4. Anwendbarkeit und Vorteile - STA Mischgutalterungsversuch 205
10.5. Ausblick und Forschungsbedarf 206

A. Anhang **223**

A.1. Daten Laborversuche 223
A.2. Steifigkeit - indirekte Zugprüfung (CIT-CY) 242
A.3. Gemessene Abkühlkurven während Alterungsversuchen 247
A.4. DSR Messdaten - B533 252
A.5. Gesteinskörnung - Datenblätter 259
A.6. Fluoreszenzmikroskopaufnahmen 282

Kurzfassung

Um die Dauerhaftigkeit und das Langzeitverhalten von Oberflächendichtungen aus Asphaltbeton beurteilen zu können, muss ein fundiertes Wissen über die Alterungsprozesse des Asphaltbetons und seiner Bestandteile, im Speziellen des Bindemittels, vorhanden sein. Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, gezielt die Einflüsse während des Herstellungsprozesses auf das Asphaltmischgut so realitätsnah wie möglich zu simulieren und die daraus resultierenden Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit zu untersuchen. Um den herstellungsinduzierten Alterungsprozess (Versprödungsprozess) im Labor nachbilden zu können, wurde speziell dafür ein Versuchsstand samt Versuchsablaufplan entwickelt. Ein Unterschied zu den aktuell in den Normen angeführten Alterungsversuchen ist, dass das gesamte Mischgut (Bitumen + Gesteinskörnung) dem Alterungsprozess unterzogen wird und nicht nur das Bitumen selbst. Dieser Umstand bildet die Grundlage für die realitätsnahe Abbildung des Alterungsprozesses im Labor.

Für die Untersuchungen wurden die zwei für die Dichtungsherstellung in Österreich am häufigsten verwendeten Bindemittelsorten (Bitumen 70/100 und PmB 45/80-65) jeweils mit denselben Designsieblinien aus Kalkstein hinsichtlich ihres Versprödungsverhaltens untersucht. Neben den konventionellen Prüfmethoden wurden gebrauchsverhaltensorientierte Prüfungen wie auch chemische Analysen durchgeführt.

Um die Laborergebnisse aus dem zweiten Teil (siehe Teil II) dieser Arbeit mit Versprödungs- und Versteifungskennwerten bestehender Anlagen abzugleichen, wurden im dritten Teil (siehe Teil III) Bestandsdaten erhoben und aufbereitet. Für einen Vergleich wiesen nicht alle untersuchten Anlagen eine ausreichend hohe Dokumentationsdichte auf. Um keine verfälschten Ergebnisse und Interpretationen zu erhalten wurde die Betrachtung von Asphaltbetonoberflächendichtungen (AF) bei Speichern (Reservoirs) und Kanälen getrennt durchgeführt.

Abstract

In order to provide the possibility of a reliable forecast of the long-term behavior of asphaltic facings (AF), it is important to know the material aging processes of the asphalt. Good performance characteristics of asphalt deteriorate due to thermal and oxidative processes. The entire process can be summarized by the term aging. Asphalt is a mixture of bitumen and aggregates, wherein the bitumen accredits for a major part of the impact on the deterioration of the performance characteristics during its life cycle. The aging process is divided into short-term (STA) and long-term (LTA) aging. The STA includes the manufacturing process of the mixed material and the placement. The LTA describes the aging process while in service. As an effect of the aging process, bitumen becomes stiffer and more brittle. AF, which are frequently applied for reservoirs, canals and disposals must be able to absorb strains without cracks. If bitumen becomes stiff and brittle, the risk of cracking and leakage under stress increases. The aging effects of bitumen have a strong impact on the performance characteristics of asphaltic concrete. Water reservoir construction sites have different requirements to asphalt related to STA due to exposure and associated transport times. Due to deviating demands (hot material manipulation time) no satisfactory forecasts can be concluded with the RTFOT for asphalt mixtures which is usually applied for AF. These circumstances resulted in the development of a necessary and appropriate STA laboratory test, which also considers extended transportation terms. Therefore an STA test for hydraulic engineering considering the specific requirements in this area was developed during the process of composing this thesis.

The two most commonly used types of bitumen (70/100 and PmB 45/80-65) for AF in Austria were tested. For the performed tests, asphalt concrete with a maximum nominal aggregated size of 11 mm (AC 11) was used. The coarse aggregates used for the mixture was limestone, the filler was powdered limestone. To analyze the aging process in different experiment stages, mechanical and chemical analyzes were performed.

In order to compare the laboratory test results with data of existing facings, it was important to sort and edit the inventory data. To avoid wrong interpretations, the existing data was separated into canals and reservoirs (different influences).

Danksagung

Die vorliegende Arbeit *Zusammenhang des Herstellungsprozesses und des Langzeitverhaltens von Asphaltbeton Dichtschichten im Wasserbau* entstand während meiner Zeit als Assistent am Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Forschungsbereich für Wasserbau, an der Technischen Universität Wien.

Ich möchte mich herzlich bei Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Tschernutter bedanken, welcher mir das gewünschte Thema der Dissertation ermöglichte. Er hat mich mit seinen vielen Vorlesungen durch das gesamte Studium begleitet und maßgeblich mein Interesse am Asphaltwasserbau während meiner Zeit als Studienassistent geprägt. Das unter seiner Führung am Institut für Wasserbau erworbene Fachwissen ist für meinen zukünftigen Werdegang von essenzieller Bedeutung.

Besonders bedanken möchte ich mich bei meinem Zweitgutachter Herrn Dr.-Ing. habil. Uwe Müller für sein Interesse und seine Flexibilität in Bezug auf die Besprechungen und Betreuungstermine. Speziell in der finalen Phase der Dissertation hat er durch seine wertvollen und kompetenten Anmerkungen maßgebend zur Qualität dieser Arbeit beigetragen.

Der große Laborprüfungsumfang wäre ohne die Unterstützung und Bereitstellung von Laborzeiten sowie Ressourcen von Herrn Dr. Markus Limbach (STRABAG International GmbH) und Herrn Dr. Norbert Simmleit (TPA Köln) nicht möglich gewesen. Weiters möchte ich mich bei den österreichischen EVUs für die Bereitstellung von Bestandsdaten und bei der OMV für die zur Verfügung gestellten Bindemittelproben bedanken.

Der größte Dank gebührt meiner Familie, allen voran meinen Eltern Claudia und Helmut, die mir das Studium erst ermöglicht haben und mich in allen Lebenslagen tatkräftig unterstützten. Zudem möchte ich mich bei meinem Bruder Peter bedanken, der mich in Wien immer wieder aus dem Studienalttag erfolgreich befreit hat.

Ein besonderer Dank gilt meiner Freundin Hanna, die mir in den letzten Jahren immer eine verlässliche Partnerin war und mir stets mit Rat und Tat, auch während arbeitsintensiver Zeiten sowie meinem Deutschlandaufenthalt in Köln zur Seite gestanden ist. Sie war eine hervorragende Korrekturleserin und motivierte mich durch Ihr Interesse an meiner Arbeit diese stets zu verbessern.

Abschließend möchte ich mich bei allen Kollegen des Instituts für Wasserbau und Ingenieurhydrologie sowie des Instituts für Straßenbau für die Unterstützung bedanken.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
(A)	Bitumen ungealtert
AC	asphaltic concrete, Asphaltbeton
AF	Asphaltbetonoberflächendichtung
Asphalt	≙ Asphaltbeton
DSR	Dynamisches Scherrheometer
EAAW	Empfehlungen für die Ausführungen von Asphaltarbeiten im Wasserbau
Ela.R.	Elastische Rückstellung [%]
G*	Komplexer Schubmodul
GVO	Gebrauchsverhaltensorientierte Bitumenprüfung (z.B.: DSR Prüfung)
KK-LKW	konventioneller Kipp-LKW
KW	Kraftwerk
L3RT	3-fach RTFOT Laboralterung
LRTF	RTFOT Laboralterung
LTA	Langzeitalterung (long-term-aging)
m%	Masseprozent
m.ü.A	Angabe der Höhe über dem Meeresspiegel (Triest, 1875)
OW	Oberwasser
PAV	Pressure Aging Vessel
PEN	Nadelpenetration [1/10 mm]
PmB	Polymermodifiziertes Bitumen
R&K	Ring- und Kugel Wert [°C]
RAAW	Richtlinien für Arbeiten im Asphaltwasserbau
ROS	Reaktive oxidative Spezies
RTFOT	Rolling Thin Film Oven Test
SB	Schwankungsbereich
SBS	Styren-Butadien-Styren
SHRP	Strategic Highway Research Program
STA	Kurzzeitalterung (short-term-aging)
TA-LKW	thermoisoliertes Transportfahrzeug mit Abschiebetechnik
TFOT	Thin Film Oven Test
UW	Unterwasser
vol%	Volumenprozent
δ	Phasenwinkel
4PBV	Vierpunkt Biegeversuch

Laborcode und Bindemittelprobenbezeichnung

Abkürzung	**Bindemittelsorte**
70/100	Bitumen 70/100 von BP Europa SE, BP Sorten Nr. 72010500000, Raffinerie Gelsenkierchen
B287	Bitumen 70/100
B288	Polymermodifiziertes Bitumen 45/80-65, Eigenproduktion Modifikation 3,7 m% SBS (Grundbitumen B287)
B520	Polymermodifiziertes Bitumen 45/80-65, Deutscher Bitumenhändler (keine weiteren Angaben)
B533	Polymermodifiziertes Bitumen 45/80-65, Eigenproduktion Modifikation 4,3 m% SBS

Teil I.

Allgemeines

1. Bitumen und Asphaltbeton

Asphaltbeton ist ein heterogenes, visko-elasto-plastisches Material dessen Materialmatrix (siehe Abbildung 1.2) aus einem Gesteinsgemisch mit abgestuften Korngrößenverteilungen (siehe Abbildung 3.2) und Bitumen zusammen gesetzt ist. Während des gesamten Lebenszyklusses von Asphaltbeton kommt es zu einer irreversiblen und fortschreitenden Veränderung der Gebrauchseigenschaften. Dieser Prozess wird als Alterung beziehungsweise Versprödung/Versteifung bezeichnet. Diverse Untersuchungen zeigen, dass der Einfluss der Gesteinskörnung auf den Alterungsprozess des Asphalts im Vergleich zum Bitumen gering ist. In dieser Arbeit werden hauptsächlich Veränderungen der Bitumeneigenschaften aufgrund herstellungsinduzierter Einflüsse (STA) untersucht. Der gesamte Alterungsprozess des Bitumens kann in drei Alterungsstufen unterteilt werden.

1. **Ungealtert (A):** Frischbitumen aus der Raffinerie

2. **Kurzzeitgealtert (STA):** In dieser Arbeit wird unter Kurzzeitalterung der Misch-, Transport und Einbauprozess verstanden.

3. **Langzeitgealtert (LTA):** Dieser Alterungszustand stellt eine Kombination aus Kurzzeitalterung und Einflüsse während der Dichtungsliegedauer dar. Bisherige Versuche die Langzeitalterung im Labor akkurat beziehungsweise realitätsnah abzubilden zeigten mäßige Erfolge auf. Der gesamte Alterungsprozess wird in folgender Gleichung beschrieben.

$$A_{ges.} = A_{kurz} + A_{lang} \tag{1.1}$$

   Die einzelnen Alterungszustände, beziehungsweise deren zugehörigen Veränderungen der Materialparameter, werden mittels Laboruntersuchungen bestimmt. Durch Abzug der Kurzzeitalterung von der Gesamtalterung wird in Teil III indirekt auf die Langzeitalterung geschlossen.

$$A_{lang} = A_{ges.} - A_{kurz} \tag{1.2}$$

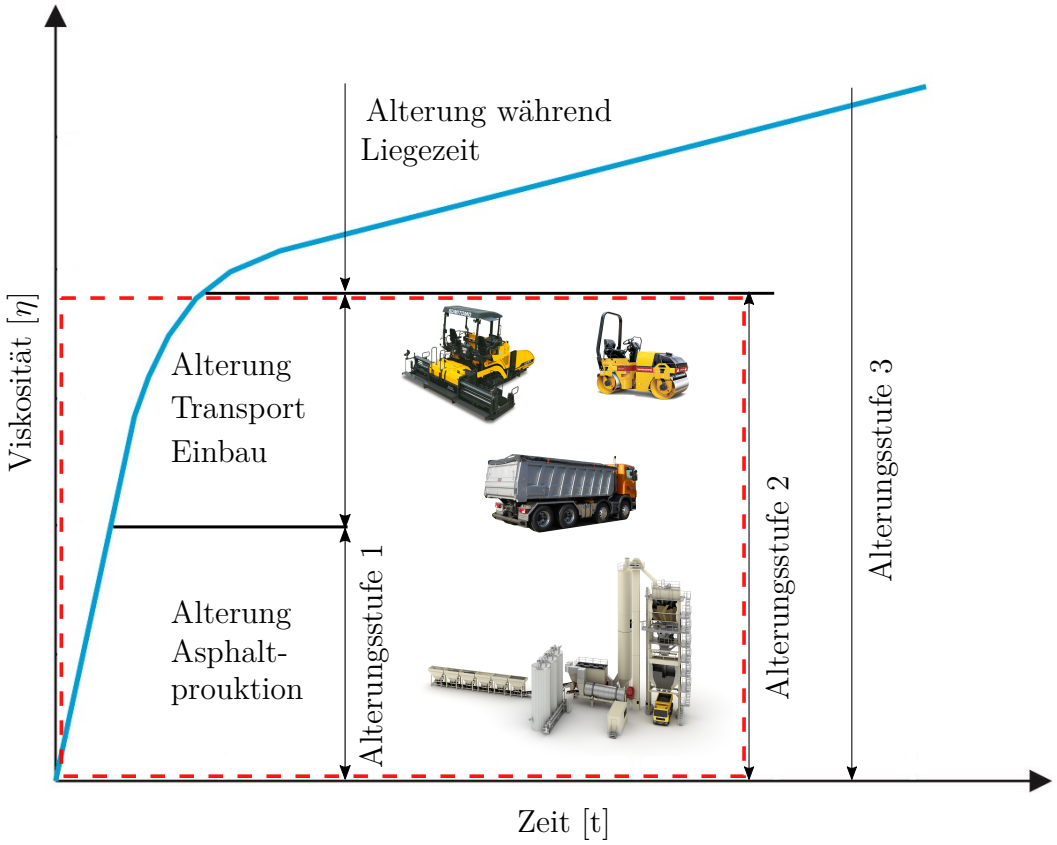


Abbildung 1.1.: Bitumenalterungsstufen, Kurzzeitalterung rot markiert

1.1. Bitumenzusammensetzung und Bitumenmodelle (Materialmodelle)

Seit dem SHRP (**s**trategic **h**ighway **r**esearch **p**rogram) Programm im Jahr 1987 haben die kolloidalen Bitumenmodelle eine weite Verbreitung und hohe Akzeptanz erlangt. Bitumen wurde in stark vereinfachter Weise meist als kolloides 2-Phasensystem aus höher molekularen Partikeln (Asphaltene) in einer niedermolekularen Matrix (Maltene) dargestellt. Heute wird Bitumen eher als Lösung von unterschiedlichen, zufällig verteilten Molekülen mit verschiedenen Größen angesehen. Abbildung 1.3 zeigt das Modell einer Micelle. Links mit einer Sol und rechts mit einer Gelstruktur. Ob sich ein Gel- oder Sol-Typ von Bitumen einstellt hängt hauptsächlich von der Konzentration beziehungsweise dem Molekulargewicht der Asphaltene ab. Sind diese relativ gering bildet sich mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Sol-Typ Bitumen.[35] Das in [20] und [35] definierte Micellen Modell weist aus rheologischer Sicht nach [7] und [16] dahin gehend schwächen auf, dass zum einen Bitumen meist nicht direkt eine Sol- oder Gelstruktur aufweist (Mischform) und zum anderen nicht die existierenden kristallinen Strukturen im Bitumen erklärt werden.

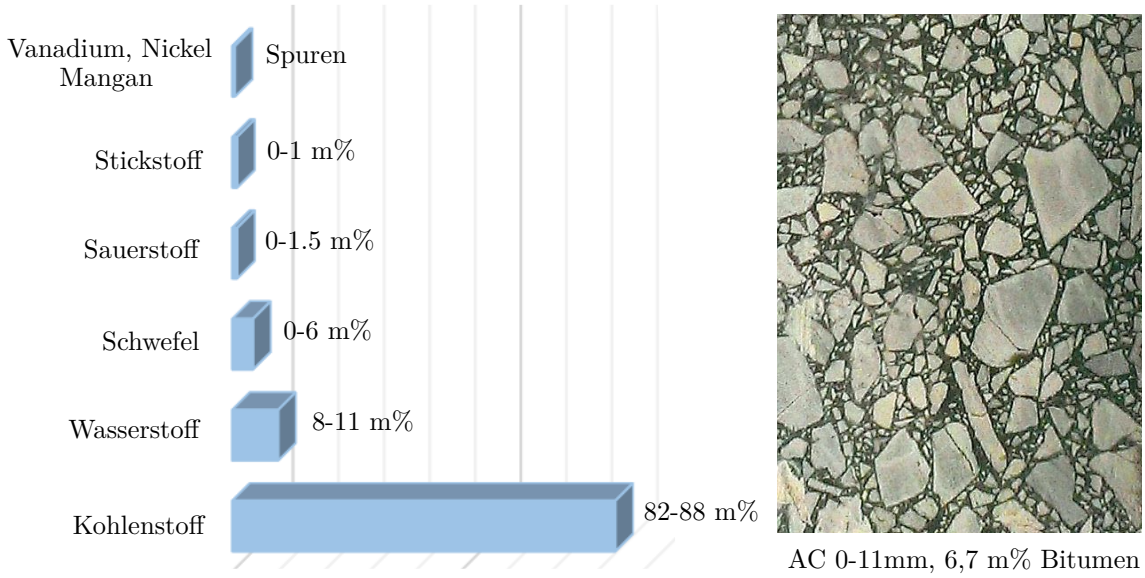


Abbildung 1.2.: links: Zusammensetzung Bitumen nach [20], rechts: Asphaltbetonmatrix

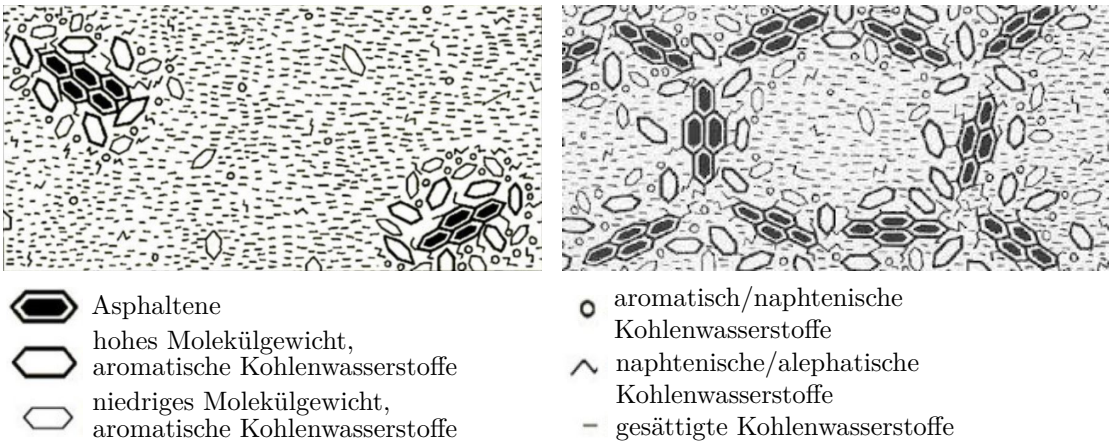


Abbildung 1.3.: Micellen Modell: links.) Sol-Typ Bitumen; rechts.) Gel-Typ Bitumen [35]

1.2. Bitumenbestandteile (Fraktionen)

In Anlehnung an [5] werden im folgenden Abschnitt die Bitumenbestandteile nach deren Löslichkeit eingeteilt. Angaben zu den mengenmäßigen Bestandteilen [m%] wurden [23], [35] und [38] entnommen.

1.2.1. Maltene (engl. maltenes)

[23] definiert Maltene als in n-Heptan löslicher Bitumenbestandteil. Diese lassen sich in die weiteren Fraktionen Aromate (engl. aromatics), Harze (engl. resins) und Parafine (engl. saturates) separieren. Aus diesem Grund wird bei der Bitumenfraktionierung oft von den SARA Fraktionen (**s**aturates, **a**romatics, **r**esins, **a**sphaltenes) gesprochen. Maltene weisen eine Dichte von $\approx 1\ g/cm^3$ auf, sind weniger viskos als Bitumen und erscheinen für das

menschliche Auge im Bereich des sichtbaren Lichtes schwarz. Maltene haben eine große Auswirkung auf zeitabhängige Effekte wie die sterische Härte [27].

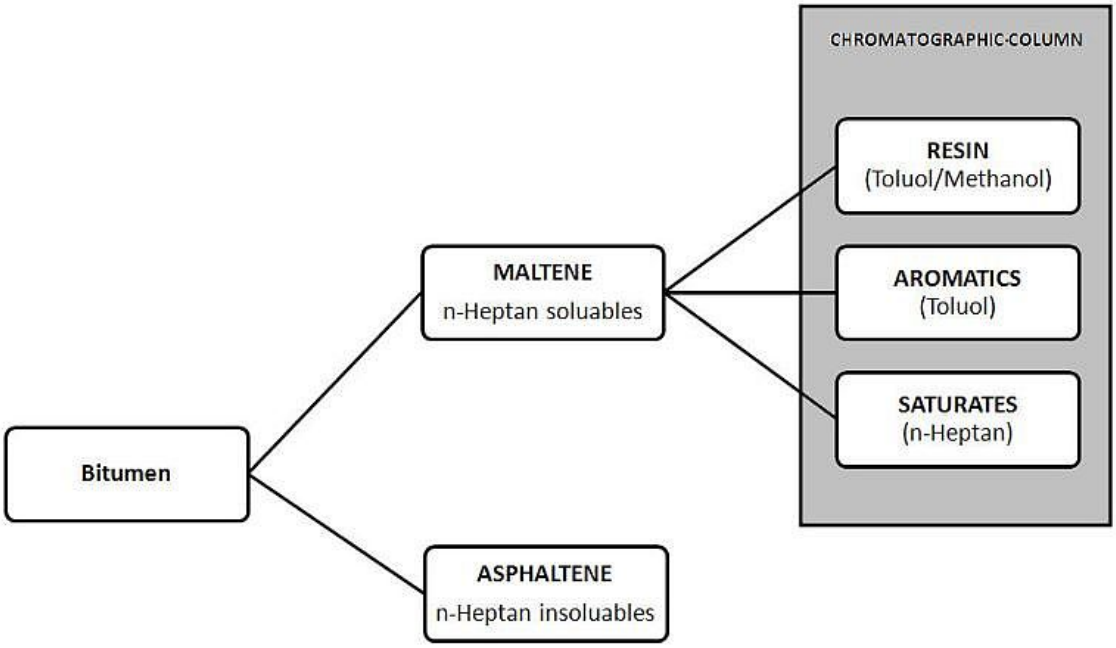


Abbildung 1.4.: Bitumenfraktionen nach [15]

1.2.2. Asphaltene (engl. asphaltenes)

Asphaltene stellen chemisch gesehen den in n-Heptan unlöslichen und in Toluol löslich Bitumenbestandteil dar. Diese Bestandteile machen je nach Rohölprovenienz 5 bis 25 m% des Bitumen aus. Asphaltene weisen eine ungefähre Dichte von 1,15 g/cm^3, ein Molekulargewicht von 800 bis 3500 g/mol auf und haben eine Partikelgröße von zirka 2 - 5 nm. Nach [23] beläuft sich das H/C Verhältnis auf 0,98 bis 1,6. Diese Moleküle besitzen im Bitumen das größte Molekulargewicht sowie Aromatizität. Die Menge-, der Aggregationsgrad- und die Anordnung der Asphaltene hat den Haupteinfluss auf die physikalischen Eigenschaften des Bitumens. Mit steigendem Asphaltengehalt steigt die Viskosität und Dichte des Bitumens. Ein durchschnittliches Molekül besteht aus einem einzelnen polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoff-Ringsystem (engl. PAH, meist 4 bis 10 kondensierte aromatische Ringe) mit aliphatischen Ketten. Darüber hinaus enthält ein Asphaltenmolekül einen bestimmten Anteil an Heteroatomen (siehe Abbildung 1.5). Die Zusammensetzung von Bitumen und Asphaltenen variieren von Provenienz zu Provenienz, auch Asphaltenmoleküle in einer Fraktion weisen zum Teil Unterschiede in Größe, Funktionalität und Aufbau auf. Dieser Umstand macht eine genaue chemische und physikalische Analyse sehr schwer. Asphaltene bilden zusammen mit Harzen die Mizellen (siehe Abbildung 1.3). Dies ist möglich, da Harzmoleküle einen ähnlichen Molekülaufbau wie Asphaltenmoleküle aufweisen und daher in der Lage sind Aggregate zu bilden. [8] [14] [23]

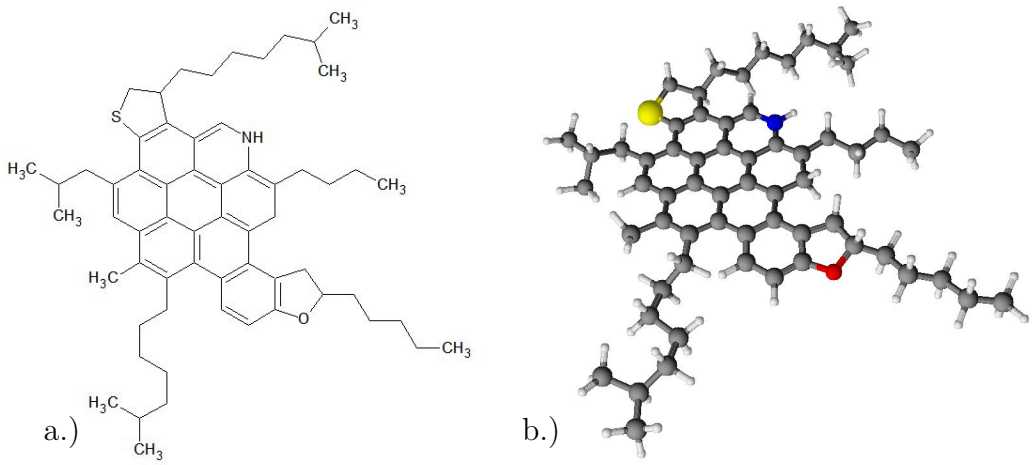


Abbildung 1.5.: Mögliche Molekularstruktur eines Asphaltenmoleküls ($C_{61}H_{79}NOS$), a.) Strukturformel b.) Kugel-Stab-Modell

1.2.3. Harze (engl. resins)

Harze weisen im Zentrum gleich wie Asphaltene ein konjugiertes polyzyklisches aromatisches Ringsystem auf (vergleiche Abbildung 1.5 und 1.6). Diese Moleküle besitzen eine Dichte von $\approx 1{,}07\ g/cm^3$ und sind bei Raumtemperatur annähernd fest. Ein Anstieg der Temperatur führt zu einer Verflüssigung. Der Anteil an Harzen beträgt zwischen 30 bis 45 m% des Bitumens. Harze bestehen nach [4] und [23] aus zwei bis vier zusammenhängenden aromatischen Ringen mit möglichen Seitenketten (siehe Abbildung 1.6). Diese Moleküle können stärkere Polaritäten als Asphaltene aufweisen und haben gemeinsam mit den Asphaltenen den größten Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften des Bitumens. Durch die hohe Grenzflächenaktivität können Harze die Anordnung der Asphaltene stören oder auch verhindern. Harze und Asphaltene weisen unterschiedliche Löslichkeiten aufgrund der Größe und Funktionalität auf, wodurch diese leicht von den Asphaltenen trennbar sind. Diese Verbindungen weisen ein Molekulargewicht von 780 bis 1400 g/mol auf und haben ein H/C Verhältnis von 1,4 bis 1,7. [8] [14] [20]

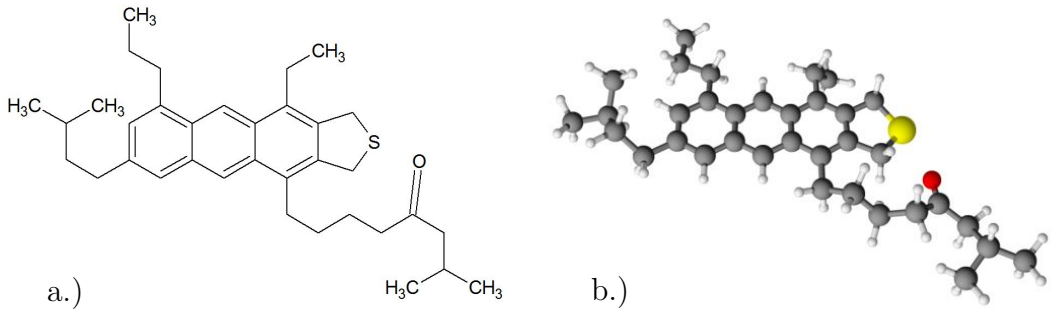


Abbildung 1.6.: Mögliche Molekularstruktur eines Harzes ($C_{35}H_{48}OS$), a.) Strukturformel b.) Kugel-Stab-Modell

1.2.4. Aromaten (engl. aromatics)

Aromaten oder Polyaromaten weisen ein ungefähres Molekulargewicht von 570 - 980 g/mol auf und bilden 40 bis 65 m% des Bitumens. Diese Verbindungen erscheinen bei Raumtemperatur als viskose dunkelbraune Flüssigkeit und besitzen ein H/C Verhältnis zwischen 1,4 bis 1,6. [4] [23] [23]

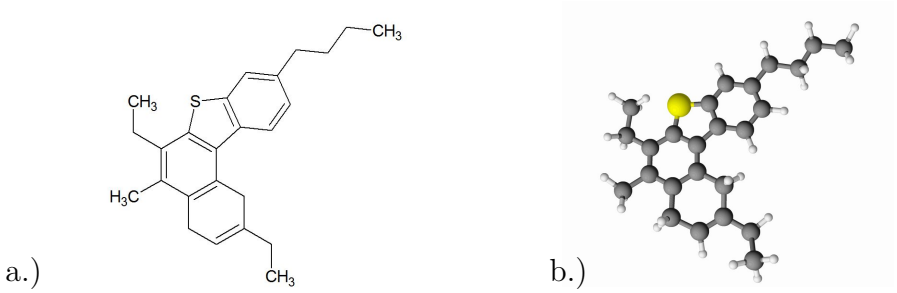


Abbildung 1.7.: Mögliche Molekularstruktur eines Aromaten ($C_{25}H_{30}S$), a.) Strukturformel b.) Kugel-Stab-Modell

1.2.5. Paraffine; gesättigte-, linear- und zyklisch- verzweigte-Kohlenwasserstoffe (engl. Saturates)

Paraffine sind bei Raumtemperatur flüssig, haben eine Dichte von $\approx 0,9\ g/cm^3$ und weisen ein Molekulargewicht zwischen 470 - 880 g/mol auf. Das H/C Verhältnis beträgt nach [23] zirka 2. Der Anteil dieser Verbindungen im Bitumen beläuft sich auf 5 bis 20 m%. Paraffine sind meist geradkettig oder verzweigt, enthalten jedoch zum Teil aromatische Ringe.

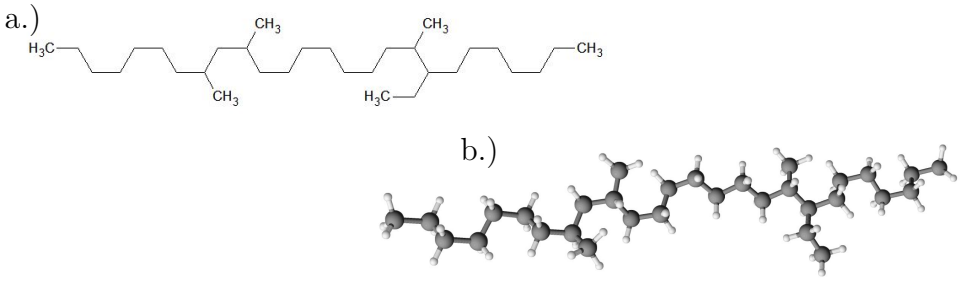


Abbildung 1.8.: Mögliche Struktur eines Paraffinmoleküls ($C_{31}H_{64}$), a.) Strukturformel b.) Kugel-Stab-Modell

1.3. Alterung von Bitumen

Der Alterungsprozess von Bitumen ist aufgrund der komplexen chemischen Zusammensetzung des Bitumens, der Interaktion mit reaktiven oxidativen Spezies (ROS) aus der Umwelt sowie dem Einfluss der Solarstrahlung (UV-Strahlung) nicht restlos geklärt. Während des Alterungsprozesses laufen chemische Vorgänge ab, welche direkte Auswirkungen auf die physikalischen Eigenschaften des Bitumens haben. Abbildung 1.9 zeigt den prozentuale Anteil der einzelnen SARA Fraktionen während des Alterungsprozesses (STA + LTA).

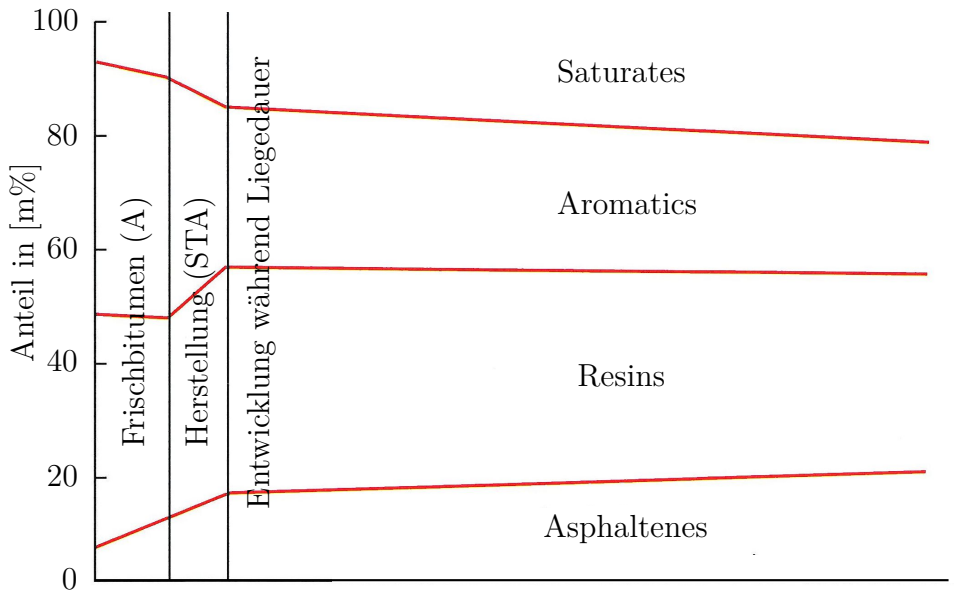


Abbildung 1.9.: Veränderung der Bitumenzusammensetzung während des Herstellungsprozesses und der Liegedauer [20]

Auf dem Niveau der einzelnen Fraktionen zeigt sich während des STA eine prozentuale Verringerung der Aromaten wobei der Anteil an Asphaltenen und Harzen steigt. Der Sauerstoffgehalt steigt an, was zu einer Erhöhung von Ketonen und Anhydriden führt. Während des Herstellungsprozesses hat der Luftsauerstoff einen sehr großen Einfluss auf die Alterung (Versteifung/Versprödung), dieser Einfluss reduziert sich nach der Dichtungsherstellung, da in der Atmosphäre Radikale mit einem größeren Oxidationspotential vorhanden sind (siehe Tabelle 1.1). [14] [34] Im Bitumenmodell (siehe Abbildung 1.3) wird davon ausgegangen, dass es sich um eine Dispersion handelt, bei der unbegrenzt oder nur sehr begrenzt in einer Matrix lösliche Moleküle agglomerieren und Ausscheidungen, sogenannte Mizellen, bilden. Für die Einstellung einer funktionierenden Dispersion, müssen die Asphaltene von einem Mantel umgeben sein, der einen stetig verlaufenden Polaritätsgradienten zur niederpolaren Matrix herstellt. Die niederpolare Maltenphase ist sehr reaktionsträge in Bezug auf Oxidation, mit ansteigender Polarität steigt dieses aber an. Da hochpolare Asphaltenkerne durch den Mantel umgeben sind, greifen reaktive oxidative Spezies (ROS) zunächst den Mantel an. Mit fortlaufender Zeit wandert die

Alterung schließlich bis in den Kern der Mizelle vor. Durch die fortschreitende Oxidation des Mantels kommt es zu einem Anstieg der Polarität.

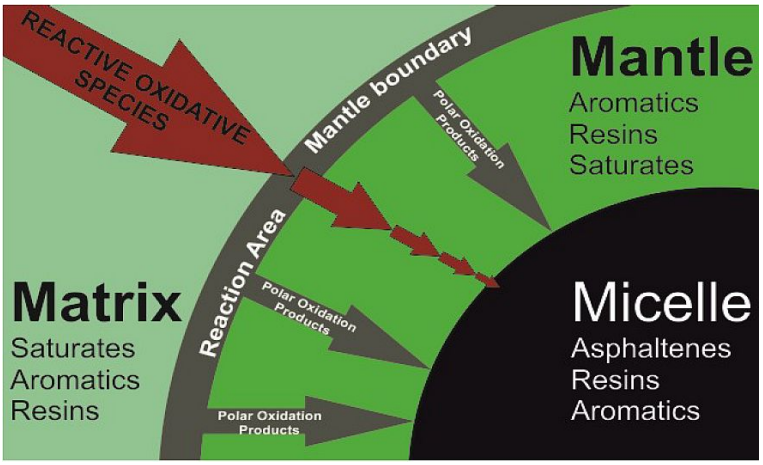


Abbildung 1.10.: ROS und Micelle [16]

Die Veränderung der Polarität führt zu einer abnehmenden Kompatibilität zwischen Mizellen und Maltenen - es bildet sich quasi eine Sollbruchstelle am Interface zwischen Mantel und Maltenmatrix aus. Mechanisch zeigt sich diese Verschiebung im Polaritätsverlauf durch zunehmende Versprödung des Materials. [18] Der Alterungsprozess zeigt sich bei unmodifizierten Bitumen durch einen Abfall des Penetrationswertes (PEN) bei gleichzeitigem Anstieg des Ring- und Kugelwertes (R&K). Der Phasenwinkel (siehe 5.6.3) wird geringer (Indikator für die Erhöhung der elastischen Anteile des Bitumens) bei gleichzeitigen Anstieg der Steifigkeit (Erhärtung). [2] In Abhängigkeit der Eindringtiefe in den Asphaltbeton lassen sich ROS in drei Gruppen einteilen (siehe Tabelle 1.1).

Tabelle 1.1.: Reale Alterungsbelastungen während des Lebenszyklusses von Asphaltbetonaufbauten [21]

Oberflächennah	**Mehrere Zentimeter**	**Gesamter Asphaltaufbau**
	*Gasförmige Oxidationsmittel:***	*Flüssige Oxidationsmittel:***
UV-Strahlung*	NO_X - Stickoxide	HNO_2 - Salpetrige Säure
Mineralstäube	O_3 - Ozon	H_2SO_4 - Schwefelsäure
	OH - Radikale	H_2O_2 - Wasserstoffperoxid

*UV-Strahlung erzeugt homolytisch Bindungsbrüche, woraus Radikale entstehen die anschließend mit dem diradikal Sauerstoff reagieren (= Oxidation)

**nicht alle Oxidationsmittel bei Oberflächendichtungen vorhanden

1.3.1. Alterungsprozesse

Die Alterung des Bitumens wird in drei Alterungsprozesse (Arten) mit unterschiedlichen Vorgängen unterschieden.

1.3.1.1. Destillative Alterung

Durch thermische Destillationsvorgänge werden leichtflüchtige Ölanteile verdampft, dies ist ein rein physikalischer Vorgang. Mit zunehmender Bitumenhärte nimmt die Neigung zu diesem Prozess ab. Der Grad der Bitumenalterung hängt dabei von der Bitumensorte, der Temperatur und der spezifischen Oberfläche ab.

1.3.1.2. Oxidative Alterung

Ein chemischer Vorgang, welcher durch Luftsauerstoff, Ozon, Radikale und in Wasser gelösten Bestandteilen hervorgerufen wird. Die Geschwindigkeit und das Ausmaß der Oxidation hängt von der Temperatur, der spezifischen Oberfläche, der Luftzutrittsmöglichkeit und der UV-Strahlung ab. Je höher die Temperatur, spezifische Oberfläche und Intensität der UVStrahlung, desto schneller verläuft die Oxidation. Die Eindringtiefe der UVStrahlung ist mit 5 μm auf die Oberfläche begrenzt. Das UV-Licht kann jedoch zur Bildung von Radikalen führen, welche in tiefere Schichten eindringen. Je rissiger eine Asphaltoberfläche ist, desto leichter ist der Zutritt für ROS, einhergeht eine Verstärkung (Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit) des Oxidationsprozesses. [31]

1.3.1.3. Strukturalterung

Die Strukturalterung beschreibt die Veränderungen der kolloidalen Struktur des Bitumens und ist als strukturelle Betrachtungsweise der destillativen und oxidativen Alterung und weniger als eigenständige Alterungsform zu sehen. Durch Alterung werden die kolloidal dispergierten Teilchen vergrößert und koagulieren zu größeren Aggregaten. Das Bitumen geht vom Sol- zum Gel-Zustand über. Der Gehalt an Asphaltenen nimmt zu, jener der Maltene nimmt ab. Durch die fortschreitende Strukturierung gewinnt das Bitumen an Strukturviskosität, es wird härter. [19]

Als weiteren weitgehend eigenständigen Alterungseffekt wird das „physical hardening" angesehen, dieser Prozess ist jedoch noch nicht restlos geklärt und derzeit Gegenstand der Forschung (siehe [23], [6]). Dieser Alterungsprozess wird der Vollständigkeit halber angeführt.

1.4. Polymermodifizierte Bitumen

Die Wirkungsweise polymermodifizierter Bindemittel ist wesentlich durch ihren strukturellen Aufbau sowie dem mikro- und nanostrukturellen Zusammenwirken zwischen Polymer und Bitumen bestimmt. Weltweit findet das Polymer Styren-Butadien-Styren (SBS)

mit zirka 75 % die größte Anwendung. Das lineare Copolymer (Styren - Butadien - Styren, SBS) besteht aus einem zentralen Butadien Molekül an dessen Enden sich jeweils eine Polystyren Kette befindet (siehe Abbildung 1.11). Durch fortlaufende Polymerisation von Styren und Butadien Monomeren können mit Hilfe eines Vernetzers di-block Präkursoren hergestellt werden, welche auch als radiale SBS Polymere bezeichnet werden. Aufgrund der Zugabe von radialen im Vergleich zu linearen Copolymeren steigt die Viskosität und der Erweichungspunkt R&K des entstehenden polymermodifizierten Bitumens (PmB) stärker an. [20]

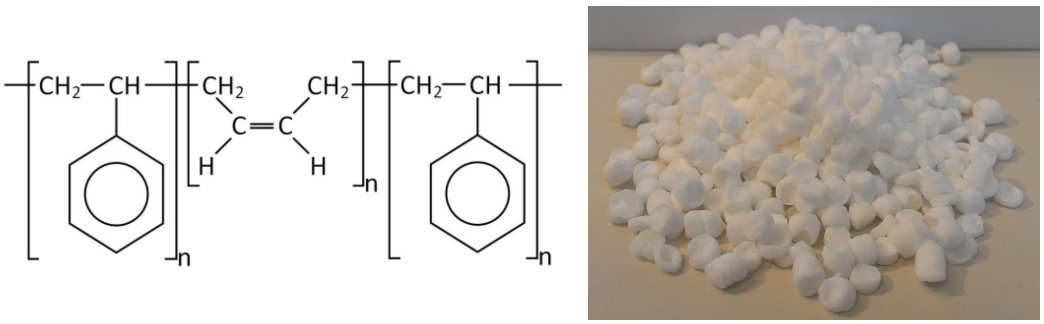


Abbildung 1.11.: links: SBS Copolymer, rechts: SBS Granulat

Die sehr hohen Festigkeits- als auch Elastizitätseigenschaften des SBS lassen sich durch die dreidimensionalen Vernetzungen der Polymerketten erklären (siehe Abbildung 1.12). Die Polystyren Endblöcke sind maßgeblich für die Festigkeit und die Polybutadien Mittelblöcke für die Elastizität verantwortlich. [39]

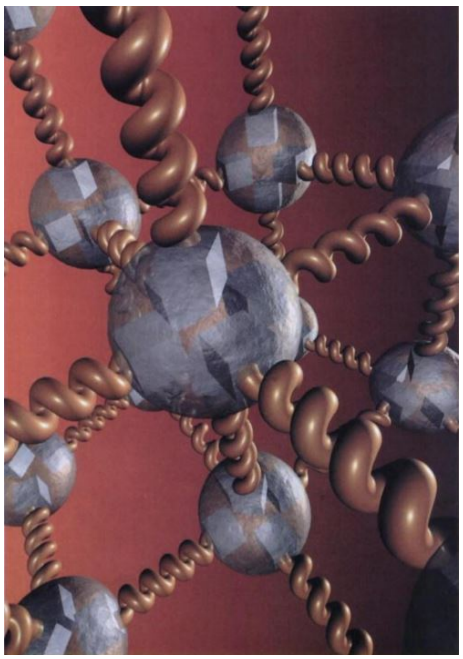


Abbildung 1.12.: Schematische Struktur eines thermoplastischen Elastomers bei Raumtemperatur [35]

Bis zu einer Temperatur von zirka 95 °C behalten SBS modifizierte PmBs die angestrebten Eigenschaften. Bei Temperaturen über der Glasübergangstemperatur von Polystyren (ca. 100 °C) wird dieses weich und dissoziiert unter Belastung. Dieser Vorgang bildet die Grundlage für die Verarbeitbarkeit bei Temperaturen im Bereich von 170 - 185 °C. Unter Voraussetzung nicht zu starker Materialerhitzung stellen sich die Festigkeits- und Elastizitätseigenschaften des Polymers (PmBs) nach dem Abkühlprozess ($\leq$ 100 °C) wieder ein. [20]

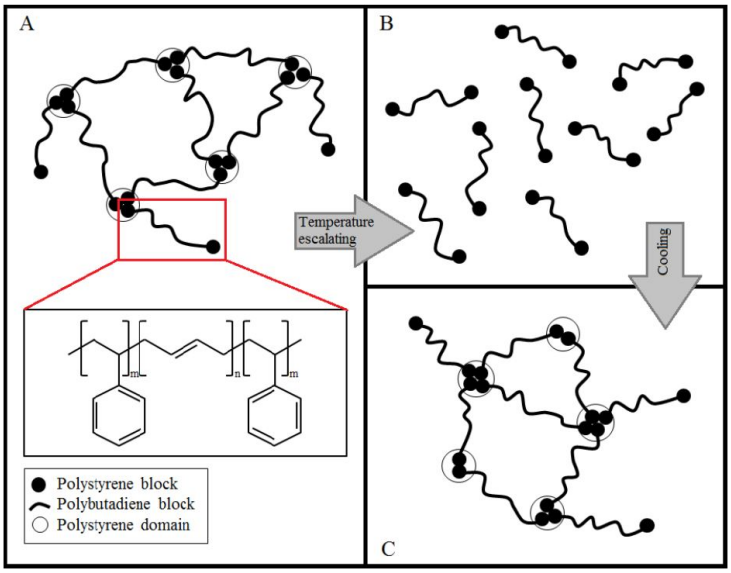


Abbildung 1.13.: Struktur von Styren-Butadien-Styren (SBS) und schematische Darstellung von reversiblen Querverbindungen [42]

Beim Mischvorgang von Polymer und Bitumen quillt die Polybutadien Phase durch Eindiffusion/Lösung der Maltene. Das Volumen vergrößert sich um das bis zu neunfache. Polymermodifizierte Bitumen (SBS) werden in Abhängigkeit der Viskosität zwischen 170 °C und 185 °C gemischt. [42] Für im Wasserbau eingesetzte PmBs ist eine Polymerzugabe an SBS von zirka 3 bis 5 (6) m% üblich. Nach dem Mischprozess von Bitumen und Polymer entsteht bei Polymerkonzentrationen $\geq$ 4 m% eine gleichmäßige polymerreiche Phase hingegen bei $\leq$ 3m% eine mehr bitumenreiche Phase (siehe Abbildung 1.14).

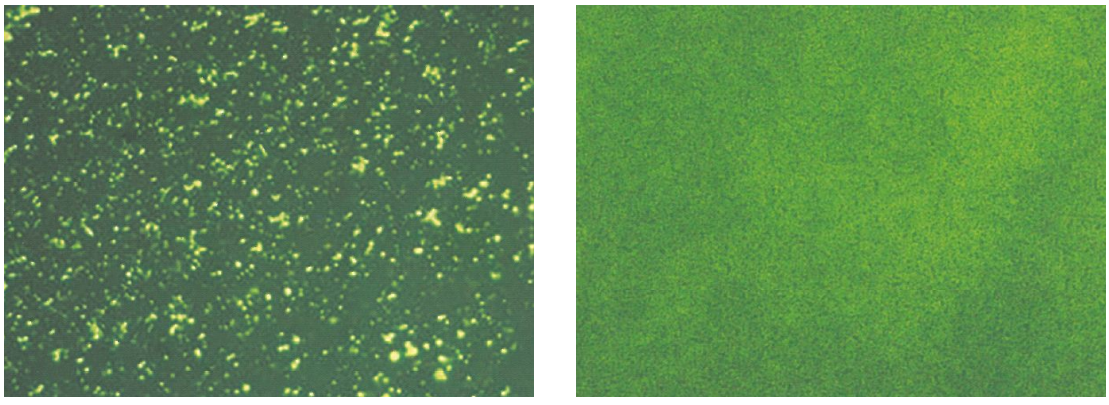


Abbildung 1.14.: UV Fluoreszenzmikorskopie, links: 3 m% SBS rechts: 4,5 m% SBS [20]

Die Morphologie von PmB hängt sehr stark vom Ausgangsbitumen sowie vom Polymergehalt ab. Die folgenden Fluoreszenzmikroskopieaufnahmen verdeutlichen dies.[1]

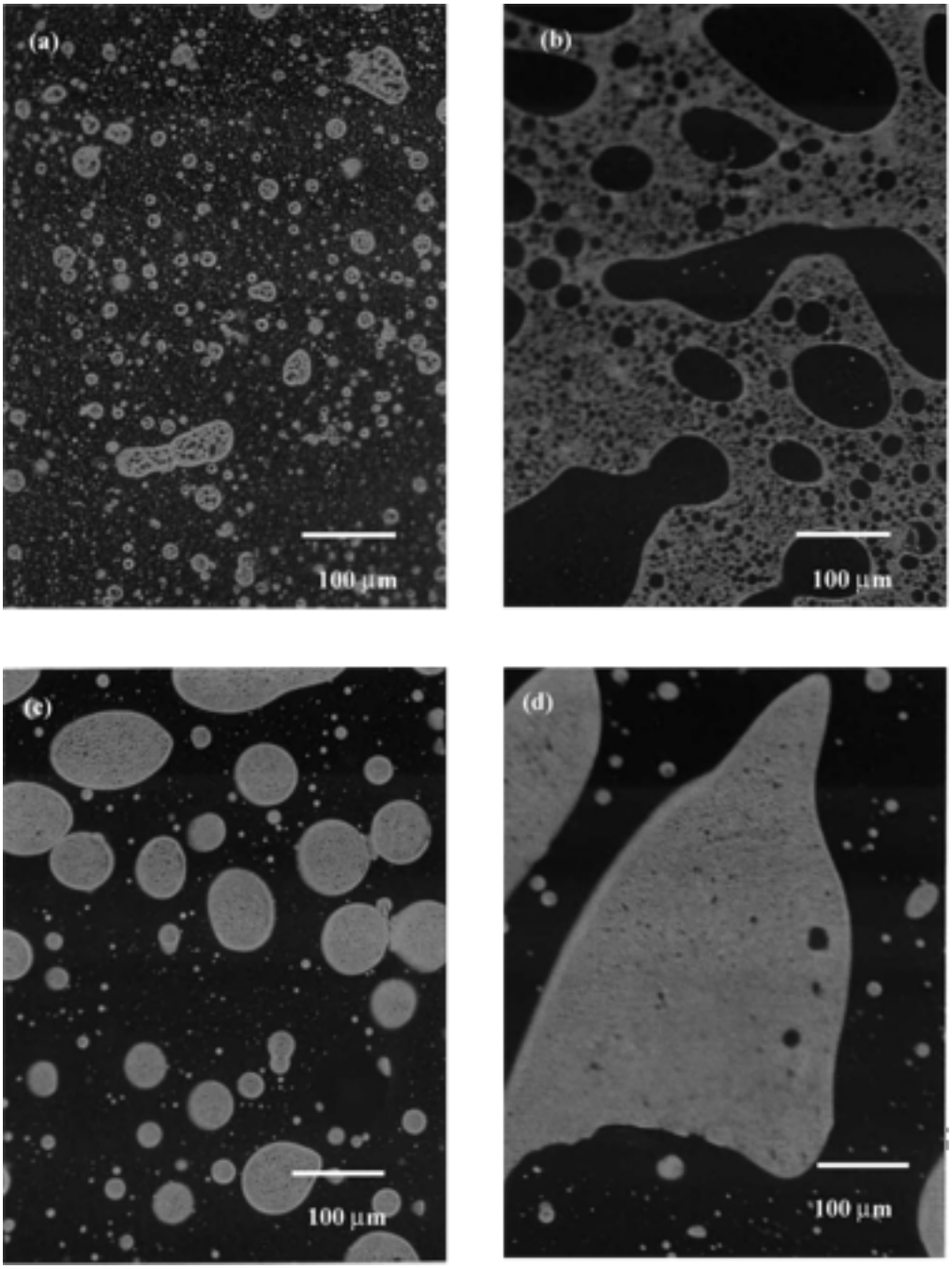


Abbildung 1.15.: Morpholgoie von SBS PmBs

a) Ausgangsbitumen A, 5 m% SBS
b) Ausgangsbitumen A, 7 m% SBS
c) Ausgangsbitumen B, 5 m% SBS
d) Ausgangsbitumen B, 7 m% SBS

Durch die Zugabe an SBS verringert sich der Penetrationswert, der Erweichungspunkt R&K sowie die elastische Rückstellung steigen. Die Veränderung der Messwerte in Abhängigkeit des Ausgangswertes hängen vom Bitumentyp, dem Polymergehalt und der

chemischen Struktur des Polymers ab (linear, radial). Abbildung 1.16 zeigt den mittleren Anstieg des Erweichungspunkts R&K in Abhängigkeit des Polymergehalts.

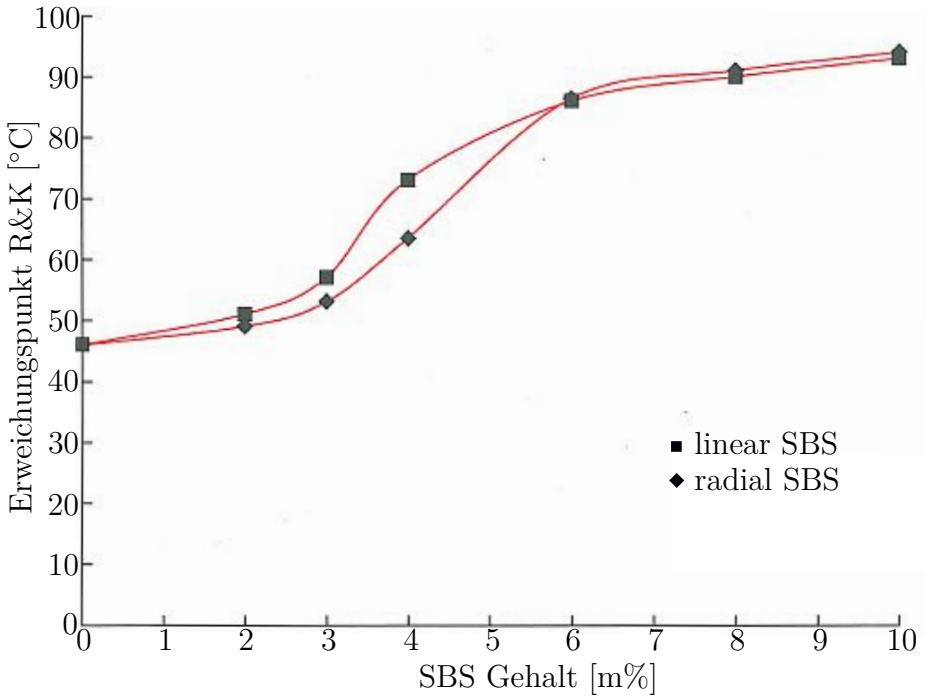


Abbildung 1.16.: Veränderung Erweichungspunkt R&K in Abhängigkeit des SBS Gehaltes [20]

In [19] wurde gezeigt, dass PmB 45/80-65 (Bitumen 70/100 mit 4,3 m% SBS) im Vergleich zu Bitumen 70/100 ab einer Temperatur von 25 °C höhere Steifigkeiten aufweist. Durch die vernetzenden Eigenschaften von SBS bildet sich beim Phasenwinkel ab einer Temperatur von zirka 30 °C ein Plateau aus. Die besseren elastischen Eigenschaften verringern auch irreversible Verformungen (siehe Abschnitt 6.4).

1.4.1. Bautechnisch relevante Vor- und Nachteile der SBS Modifikation von Bitumen [42]

Vorteile

- Erhöht Steifigkeit
- Reduziert Temperaturempfindlichkeit
- Verbessert die elastischen Eigenschaften

Nachteile

- Nicht mit allen Ausgangsbitumensorten kompatibel
- Geringe Beständigkeit gegen hohe Temperaturen, Oxidation und UV-Strahlung (Doppelbindung im Butadien ist durch UV-Strahlung leicht spaltbar, daraus entstehen Radikale die wiederum mit Sauerstoff oxidieren)

1.5. Alterung von SBS modifizierten Bitumen

Im Vergleich zu nicht modifizierten Bindemitteln ist der Alterungsprozess von PmBs wesentlich komplexer. Bei diesem Vorgang handelt es sich um eine Kombination der Alterung des Grundbitumens (durch Einbau von Sauerstoff steigt das Bitumenmolekülgewicht) und jener des Polymers (aufbrechen von Butadienbindungen). Durch den Alterungsprozess (Polymerdegradation) erleiden SBS Polymere eine erhebliche Verschlechterung ihrer Eigenschaften. In [24] wurde gezeigt, dass sich im allgemeinen die Molekülgröße der Polymerphase verringert, während jene des Bitumens steigen. Dieser Effekt verstärkt sich mit fortlaufendem Alterungsprozess. Durch die Alterung steigt der Anteil an Carbonylverbindungen und Sulfoxiden. Während des Alterungsprozesses hängen die rheologischen Eigenschaften des PmBs von einer Kombination der Bitumenoxidation und der Polymerdegradation ab. Dieser Effekt ist abhängig von der Ausgangsbitumensorte, dem Polymer und dem Polymeranteil. In [2] wurden zwei Ausgangsbindemittel mit unterschiedlicher Provenienz jeweils mit 3, 5 und 7 m% SBS modifiziert. Tabelle 1.2 zeigt die jeweiligen PEN_{Indexe} und $\text{R\&K}_{Indexe}$ der Proben.

Tabelle 1.2.: Veränderung R&K und PEN mit variierenden Polymeranteilen, Frischbitumen - Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) [2]

Bitumen	PEN_{Index} (RTFOT/(A))	$\text{R\&K}_{Index}$ (RTFOT/(A))
B1 3% SBS	0,70	1,07
B1 5% SBS	0,74	0,82
B1 7% SBS	0,80	0,95
B2 3% SBS	0,70	1,11
B2 5% SBS	0,76	0,87
B2 7% SBS	0,78	0,88

In [41] wurde das Verhalten von SBS modifizierten Bitumen hinsichtlich des Phasenwinkels und der Steifigkeit untersucht. Über das Verhalten während des Alterungsprozesses kann keine allgemeine Aussage getroffen werden. Untersuchungen zeigen, dass PmBs (SBS) einen erhöhten Widerstand gegen Versprödung aufweisen als nicht modifizierte Bitumen (PmB selbes Ausgangsbitumen wie nicht modifizierte Bitumen).

1.5.1. Degradation von Molekülkolloiden des verwendeten Polymers

Dieser Vorgang ist bei PmBs zu berücksichtigen. Durch die Alterung werden die langkettigen Polymere immer kürzer und verlieren ihre vernetzenden Eigenschaften. Durch chemische Vorgänge kann es auch zu einer Abstoßungsreaktion zwischen Bitumen und Polymer kommen.[23]

1.6. Anforderungen an Bitumen und polymermodifizierte Bitumen im Wasserbau

Die in Österreich geltenden Anforderungen an Bindemittel sind in den Richtlinien für Arbeiten im Asphaltwasserbau (RAAW) definiert.

Tabelle 1.3.: Anforderungen an Bitumen für den Wasserbau [44]

Prüfung Bezeichnung	**Prüfverfahren**	**70/100**	**50/70**
Penetration bei 25 °C (1/10mm)	EN 1426	80-100	50-80
Erweichungspunkt* (°C)	EN 1427	42-49	47-54
Penetrationsindex, höchstens	EN 1427	+ 0,5	+ 0,5
Brechpunkt Fraaß (°C)	EN 12593	-10	-10
Kraft-Duktilität bei 10 °C (cm),	EN 13589	anzugeben	anzugeben
Parafingehalt, max(Masse %)	EN 13589	2	2
durch Lieferanten anzugeben			
Dichteverhältnis zu Wasser	EN ISO 3838	1-1,04	1-1,04
Erhitzungsprüfungen im Rotationsverdampfer (165 °C, Einwaage 100 g Bitumen)* in Luft			
1. Masseverlust max. (Masse %)		mind. 70 % vom Ausgangsw., min 70**	mind. 70 % vom Ausgangsw., min 50**
2. Verbleibende PEN [1/10 mm]		mind. 70 % vom Ausgangsw., min 70**	mind. 70 % vom Ausgangsw., min 50**
3. Zunahme R&K [°C]		6	6

*Es können darüber hinausgehend Prüfbedingungen, wie z.B. Prüftemperatur 190°C oder Einwaage 50g vereinbart werden
**Abweichung zur NORM, Anforderung hat besondere Bedeutung für Lebensdauer

Tabelle 1.4.: Anforderungen an polymermodifiziertes Bitumen für den Wasserbau [44]

Prüfung Bezeichnung	**Prüfverfahren**	**45/80-65**	**45/80-50**
Penetration bei 25 °C (1/10mm)	EN 1426	45-80	45-80
Mittlere Verarbeitungstemperatur			
Erweichungspunkt* (°C)	EN 1427	≥65	≥60
Erhöhte Verarbeitungstemperatur			
Kraft-Duktilität bei 5 °C (J/cm), EN 13703	EN 13589	≥1	≥1
Verbleibende Penetration*, RTFOT (%), nach EN 12607-1	EN 1426	≥60*	≥60*
Elastische Rückstellung* bei 25 °C (%)	EN 13589	≥70	≥60
Flammpunkt (°C)	EN ISO 2592	≥250	≥250
Brechpunkt Fraaß* (°C)	EN 12593	≤-10	≤-10
Lagerbeständigkeit, Diff. EWP(°C)	EN 13399	≤5	≤5
Lagerbeständigkeit, Differenz der Penetration, (1/10 mm)***	EN 1426	≤20	≤20
Elastische Rückstellung**, 25 °C, RTFOT (%), nach EN 12607-1	EN 13398	≥70	≥60

*strengere Anforderungen für Asphaltwasserbau
**Im Bedarfsfall nachzuweisen

*** Gemäß DIN EN 14023

2. Simulation des Kurzzeitalterungsprozesses (STA) im Labor

2.1. Allgemeines

Für die Herstellung von Asphaltbetondichtschichten im Wasserbau ist das Asphaltmischgut entweder vor Ort herzustellen oder aus einer nahe gelegenen Mischanlage zu liefern. In beiden Fällen, sind die Transportwege und die damit verbunden Transport- und Umschlagzeiten so gering als möglich zu halten. Zu den Transportzeiten zählen neben dem eigentlichen Transport im LKW auch die Verladezeiten von der Mischanlage in den LKW sowie vom LKW in den Fertiger (siehe Abbildung 1.1). Hinzu kommt die benötigte Einbauzeit. Das Mischgut sollte während der gesamten Arbeitsschritte (Mischen, Verladen, Transport und Einbau) thermisch als auch oxidativ so gering als möglich belastet werden, da diese Vorgänge eine Materialalterung (Versprödung und Versteifung) bewirken. Durch die Verwendung von thermoisolierten Transportfahrzeugen mit Abschiebetechnik (TA-LKWs) beziehungsweise abgedeckten (z.B.: Planen) konventionellen Kipp-LKWs (KK-LKWs) lässt sich der Alterungsprozess durch Oxidation, welche aufgrund des Fahrtwindes begünstigt wird, reduzieren. Nach der Übergabe vom LKW in den Fertiger wird das Mischgut vor dem Einbau durch eine Schnecke erneut durchmischt (Homogenisierung der Temperatur). Der Abkühlgradient des Mischgutes von der Verladung bis zum Einbau wird mit 0,13 °C pro Minute angenommen. Diese Rate wurde aus diversen Erfahrungswerten festgelegt und gilt für gute klimatische Bedingungen (zirka 20 °C Außentemperatur sowie kein Wind). Aus den festgelegten Temperaturgrenzwerten für Asphaltmischgut bei der Herstellung von Asphaltdichtschichten in den RAAW (sieh Tabelle 2.1) und drei aus Erfahrungswerten festgelegten Zeitbereichen für die Herstellung (60 min, 120 min und 210 min) werden drei lineare Abkühlkurven ($T_{gesteigert(gut)}$) je Bindemittel (siehe Abschnitt 2.2.1 und 2.2.2) errechnet, welche den Versuchsabläufen zugrunde gelegt werden.

Tabelle 2.1.: Verarbeitungstemperaturen Asphaltmischgut laut Richtlinien für Arbeiten im Asphaltwasserbau [44]

Temperaturbereiche Verarbeitung Asphaltmischgut			
	B 50/70	**B 70/100**	**PmB**
T [°C] Silo	155-180	155-180	155-190
T [°C] Übergabe Fertiger	150-180	150-180	150-180
T [°C] erster Walzgang	Min. 120	Min.120	*
T [°C] für letzen Walzgang	90-120	80-120	*

*Temperatur gemessen mittig in seitlicher Dichtlage, spezielle Festlegung vor Arbeitsbeginn bzw. während Einbauversuch

2.2. STA Mischgutalterungsversuch - Versuchsabläufe

In den Versuchen wird der Einfluss der Oxidation durch Luftsauerstoff und der Temperatur in Kombination sowie getrennt auf die Versprödung und Versteifung des Materials (Bitumen/Asphaltbeton) untersucht. Um dies zu ermöglichen teilt sich der Versuchsablauf in zwei Versuchsstränge auf (siehe Abbildung 2.1).

- **Versprödung und Versteifung durch Oxidation bei konstanter Temperatur, V1-V3:** Die Temperatur des Mischgutes wird konstant auf 160 ± 3 °C gehalten und in drei verschiedenen Zeitstufen (V1= 60 min, V2= 120 min und V3= 210 min) mit einem gleichmäßigen Luftvolumenstrahl von 400 l/min durchströmt und oxidiert.
- **Versprödung und Versteifung durch Oxidation bei variierenden Temperaturen, V4-V6:** Die Luftmenge mit 400 l/min ist gleich wie bei V1-V3, jedoch kühlt das Mischgut kontrolliert linear von drei errechneten Ausgangstemperaturen in einem Zeitraum von V4= 60 min, V5= 120 min und V6= 210 min ab (siehe Abschnitt 2.2.1 und 2.2.2).

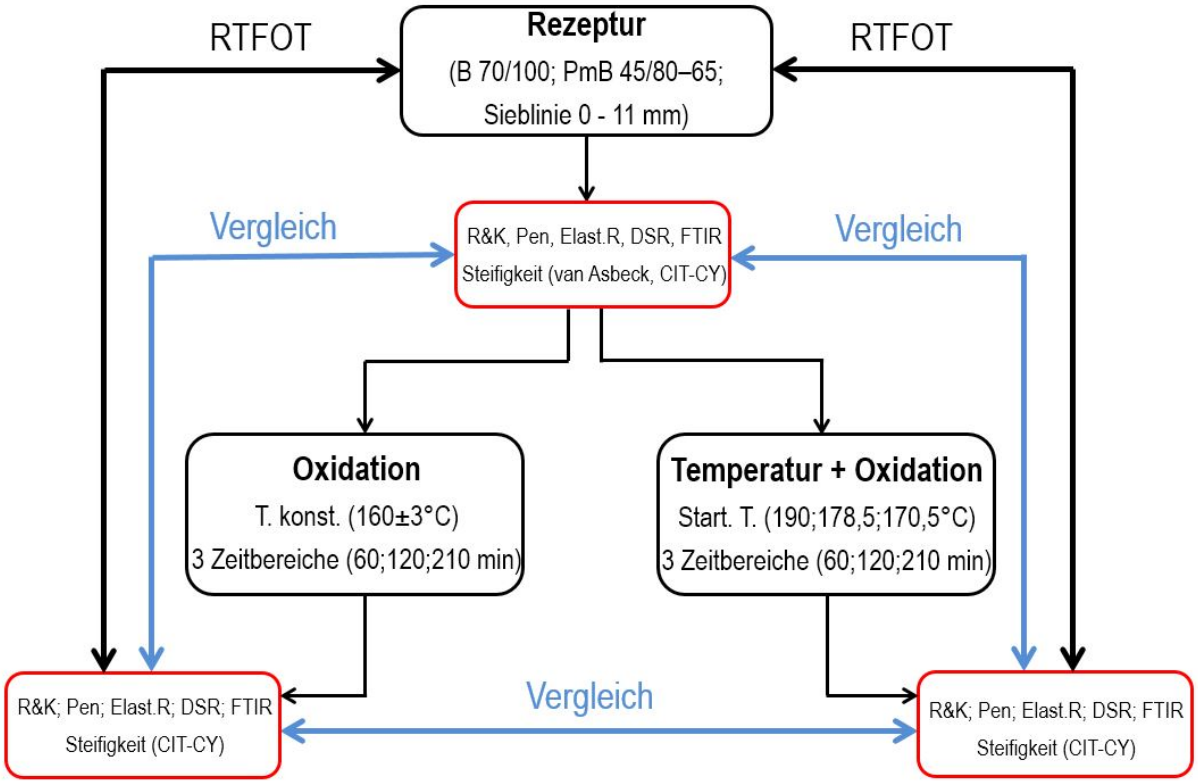


Abbildung 2.1.: Schema Versuchsabläufe

2.2.1. Abkühlkurven Asphaltmischgut Bitumen 70/100

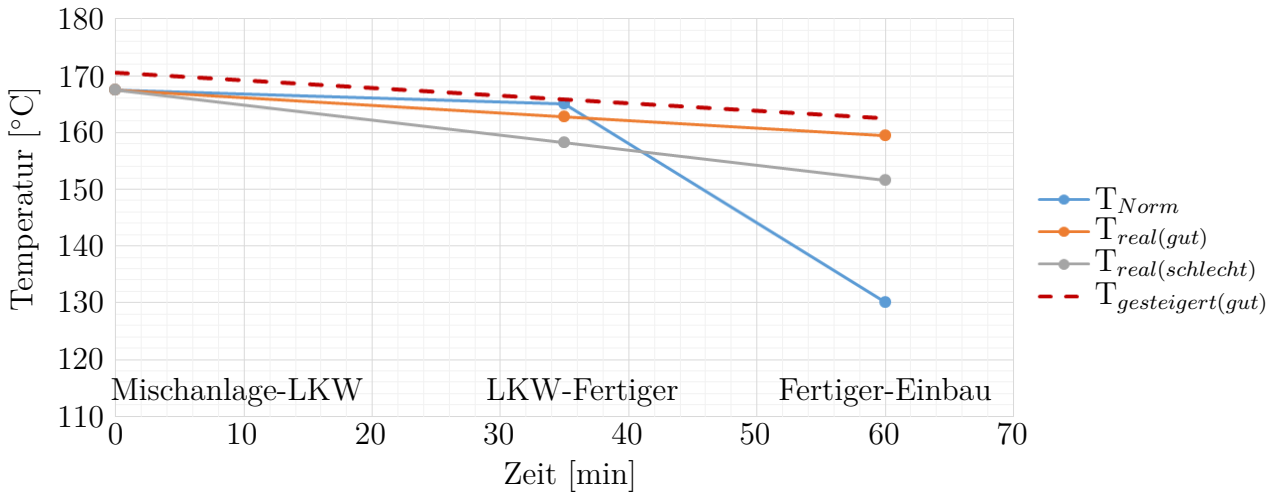


Abbildung 2.2.: Abkühlkurven Bitumen 70/100 Stufe 1 (V4), mit Manipulationspunkten Mischanalge-LKW, LKW-Fertiger und Fertiger-Einbau

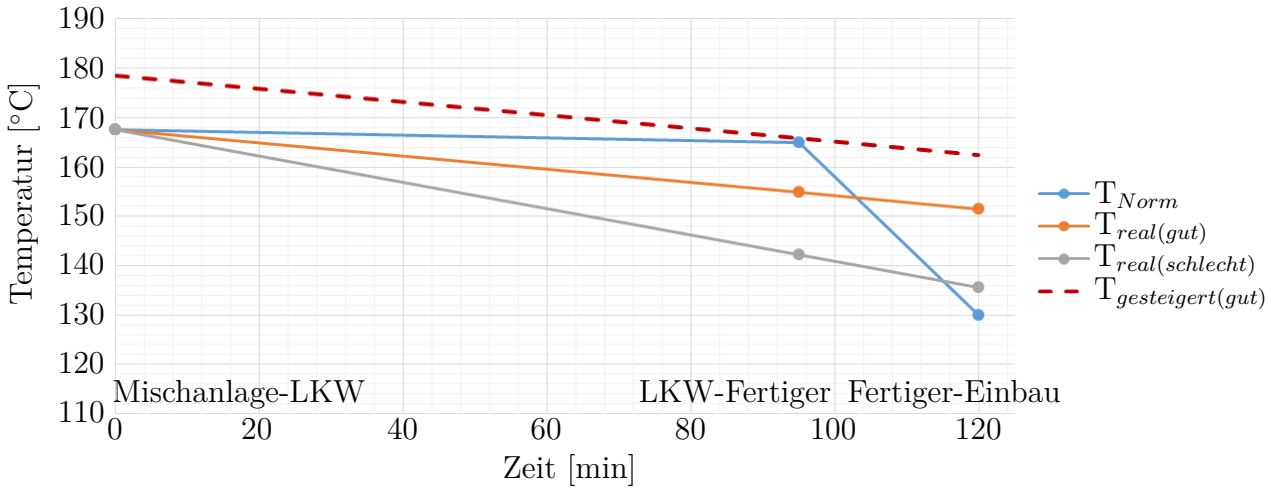


Abbildung 2.3.: Abkühlkurven Bitumen 70/100 Stufe 2 (V5), mit Manipulationspunkten Mischanalge-LKW, LKW-Fertiger und Fertiger-Einbau

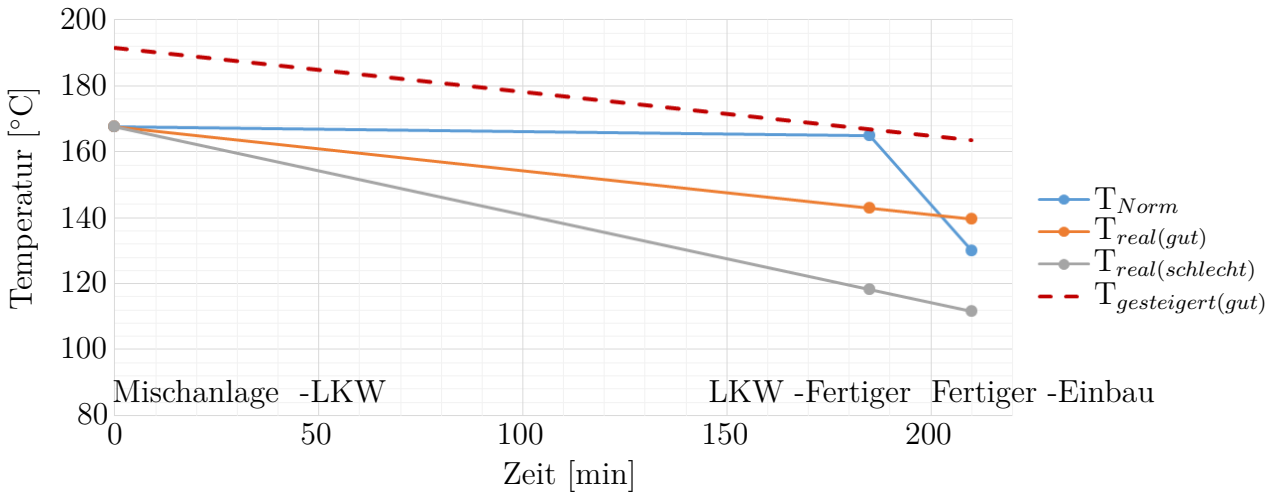


Abbildung 2.4.: Abkühlkurven Bitumen 70/100 Stufe 3 (V6), mit Manipulationspunkten Mischanalge-LKW, LKW-Fertiger und Fertiger-Einbau

2.2.2. Abkühlkurven Asphaltmischgut PmB 45/80-65

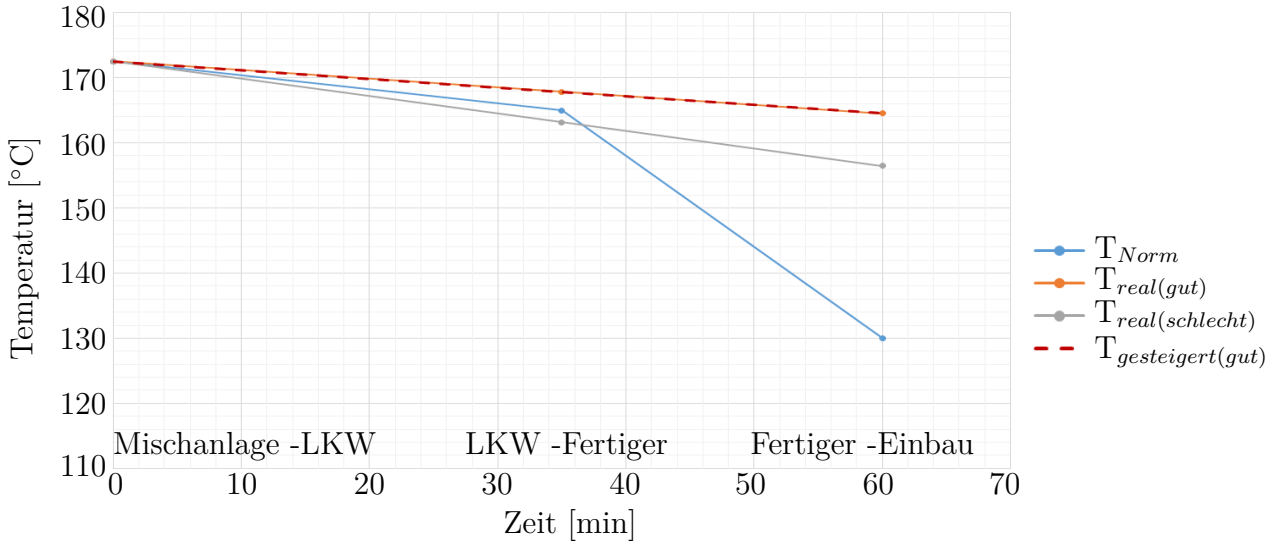


Abbildung 2.5.: Abkühlkurven PmB 45/80-65 Stufe 1 (V4), mit Manipulationspunkten Mischanalge-LKW, LKW-Fertiger und Fertiger-Einbau

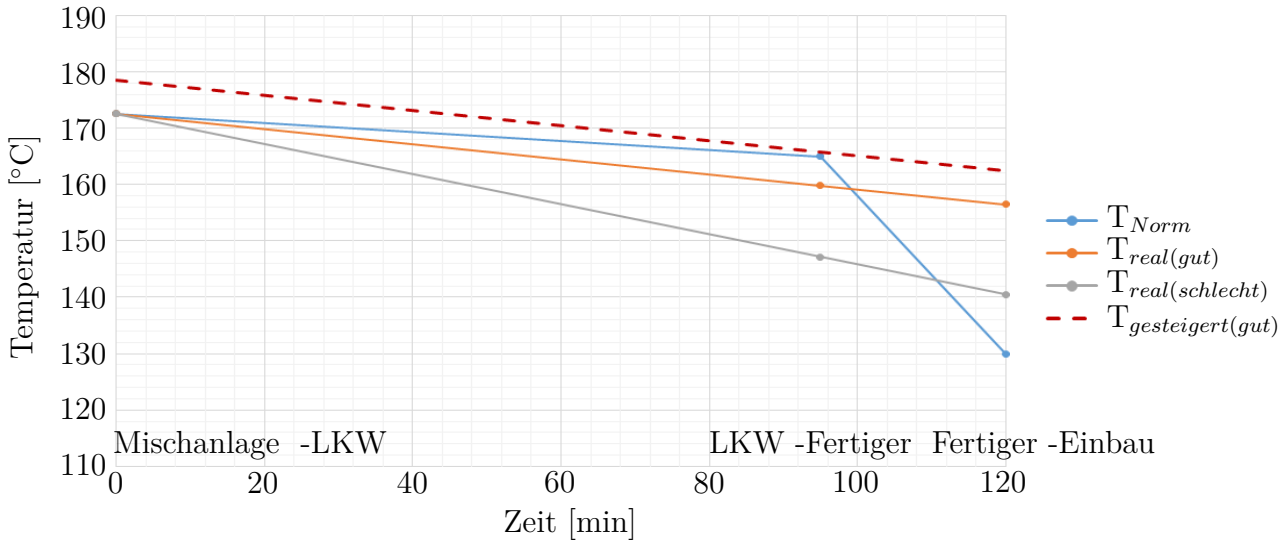


Abbildung 2.6.: Abkühlkurven PmB 45/80-65 Stufe 2 (V5), mit Manipulationspunkten Mischanalge-LKW, LKW-Fertiger und Fertiger-Einbau

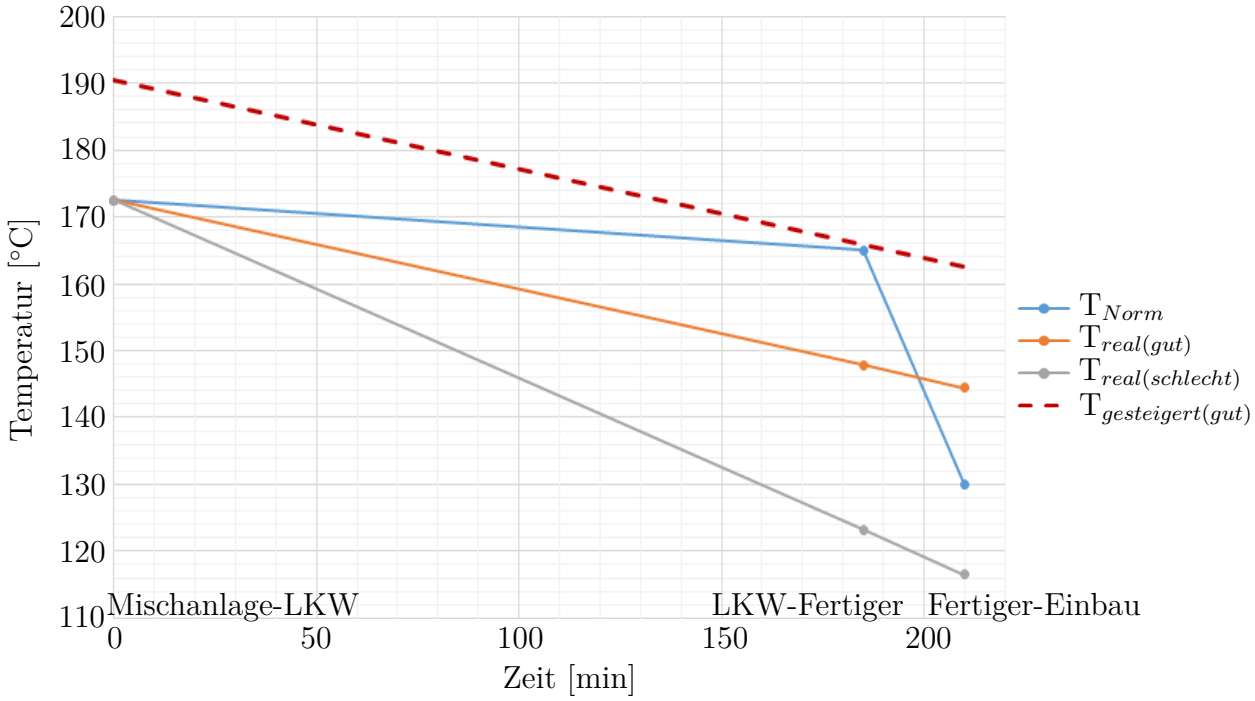
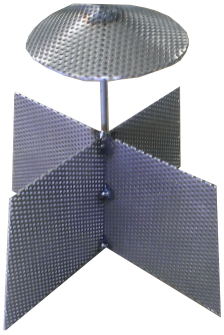


Abbildung 2.7.: Abkühlkurven PmB 45/80-65 Stufe 3 (V6), mit Manipulationspunkten Mischanalge-LKW, LKW-Fertiger und Fertiger-Einbau

2.3. STA Mischgutalterungsversuch - Versuchsstand

Der Versuchsstand wurde auf eine maximale Temperatur von 650 °C (Aufheizvorgang des Versuchsstandes) sowie eine Luftmenge von 400 l/min ausgelegt und gebaut. Zur Bereitstellung der benötigten Temperatur sowie Luftmenge wurde das Heißluftgerät Mistral 6 System von Leister mit einer Leistung von 4500 W verbaut. Gesteuert wird dieses über einen stufenlos regelbaren Sollwertgeber. Die Temperaturmessung im Modelltopf erfolgt mit drei Temperatursonden (Kabelfühler 4x30mm Thermoelement NiCr-Ni Typ K), welche an einem Datenlogger angeschlossen sind. Für die Hauptmessungen werden die Sonde 2 (unter dem Mischgut) und Sonde 3 (im Mischgut) herangezogen. Die Sonde 1 (über dem Mischgut) wird intervallmäßig für Kontrollmessungen eingesetzt. Zur Optimierung des Luftstroms wurde ein Deflektor verbaut, welcher eine gleichmäßige und ganzflächige Durchströmung des Mischgutes sicherstellt.

Edelstahlrohr mit konischer Verjüngung



Deflektor für gleichmäßige Anströmung des Mischgutes

Verschluss mit zwei Thermosonden

Abbildung 2.8.: Versuchsstand und Bauteile (STA Mischgutalterungsversuch)

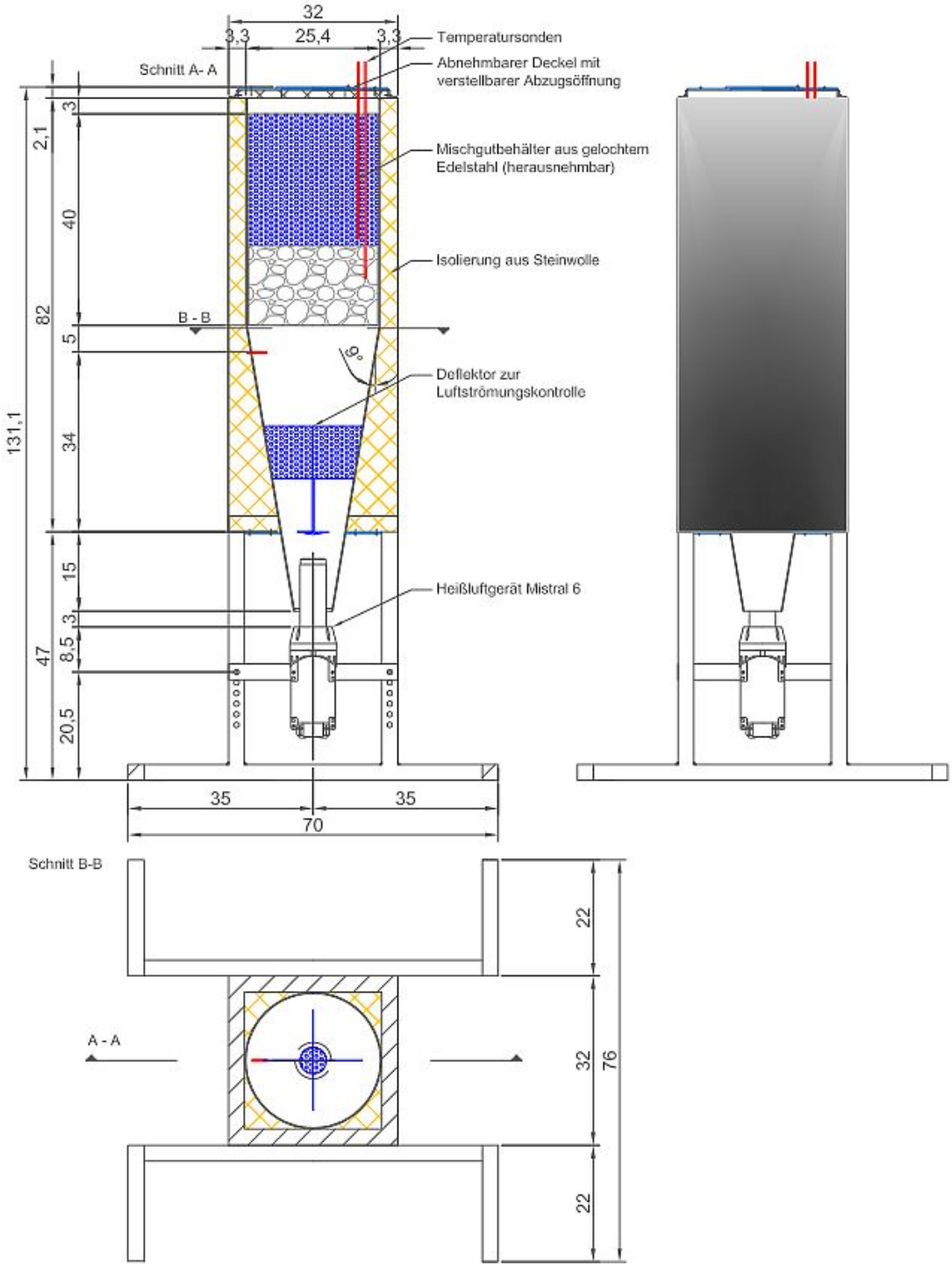


Abbildung 2.9.: Plan Versuchsstand (STA Mischgutalterungsversuch)

2.4. STA Mischgutalterungsversuch - Reproduzierbarkeit

Für eine Abschätzung der Versuchsreproduzierbarkeit wurden je drei Alterungsversuche pro Versuchsstufe mit drei verschiedenen Bindemitteln durchgeführt. Am zurück gewonnenen Bindemittel wurden Penetrations, Ring und Kugel, Elastische Rückstellung (Ela. R.) sowie Messungen mittels dynamischen Scherrheometer (DSR) durchgeführt. Abbildung 2.10 zeigt exemplarisch die Penetrationswerte des Bindemittels B533 bezogen auf das ungealterte Bitumen. Die Fehlerindikatoren bilden die Standardabweichung in den Versuchsergebnissen V1 - V3 ab. Versuchsstufe V1 weist die stärkste Abweichung von 3,2% auf. Dieses Ergebnis zeigt die hohe Reproduzierbarkeit und Eignung des entwickelten Kurzzeitalterungsversuchs für die weiteren Laborprüfungen.

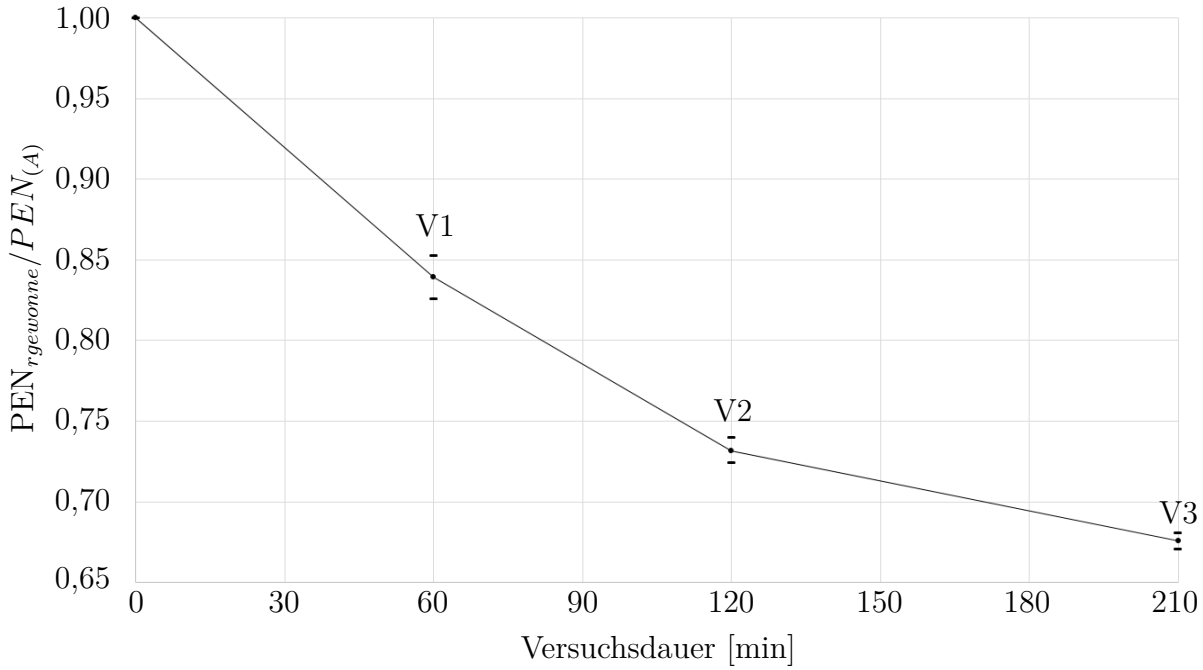


Abbildung 2.10.: Versuchsreproduzierbarkeit, B533, Penetrationsmessungen nach Oxidationsversuchen (V1 - V3)

Teil II.

Laboruntersuchungen

3. Materialeignungsprüfungen für die Laborversuche

Die den Eignungsprüfungen zugrunde gelegten (Mindest-) Anforderungen an das Bindemittel und die Gesteinskörnungen sowie an das daraus hergestellte Asphaltmischgut für die Laboruntersuchungen wurden aus Erfahrungen von durchgeführten Projekten sowie den definierten Anforderungen in den Normen, Richtlinien und Regelwerken festgelegt. Als Regelwerke dienen

- Richtlinien für Arbeiten im Asphaltwasserbau, Österreichs Energie, Ausgabe April 2013
- Empfehlungen für die Ausführungen von Asphaltarbeiten im Wasserbau (EAAW), Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), Ausgabe 5 - 2008

Die Stärke der Dichtschicht für die Laboruntersuchungen wurde aufgrundlage der Literaturstudie in [37] mit 60 mm angenommen. Dies entspricht einer gängigen Dichtungsstärke und kann mit sämtlichen Prüfeinrichtungen im Labor geprüft werden.

3.1. Sieblinie für die Laboruntersuchungen

Bei den Laborversuchen wurde für die Sieblinien Kalkstein mit einem Größtkorn von 11 mm verwendet. Das Gestein entstammt dem deutschen Steinbruch Westenfeld - Sundern im Sauerland (Materialkennwerte siehe A.5). Für die im TPA Labor durchgeführten Laborversuche wurden am 16.04.2015 die Gesteinsfraktionen 0 - 2 mm, 2 - 5 mm, 5 - 8 mm, 8 - 11 mm im Steinbruch abgeholt. Der eingesetzte Füller (<0,063 mm, Wülfrather Kalksteinmehl) ist ein Produkt des Werks Flandersbach der Firma Rheinkalk.

3.1.1. Bestimmung der Korngrößenverteilung in den Fraktionen

Für die Herstellung der gewünschten Sieblinie, wurde der Anteil der einzelnen Körnungen in den Fraktionen prozentual bestimmt. Nach [45] wird hierzu die nötige Probemenge des Gesteins (einzelne Fraktionen) eingewogen und bis auf die Massenkonstanz im Trockenschrank bei 110 °C ± 5 °C getrocknet. Anschließend wird das Trockengewicht bestimmt. Der Füllergehalt wurde mit der Differenzenmethode bestimmt. Der Fülleranteil wurde mit einer Nasssiebung ausgewaschen (Maschenweite-Sieb 0,063 mm), nach abermaligem Trocknen wurde der Fülleranteil über die Differenz der Trockenmassen für die einzelnen Kornfraktionen ermittelt. Anschließend wurde mit Hilfe eines Siebturms der Anteil der

einzelnen Körnungen in den Fraktionen bestimmt. Die Ergebnisse der Siebanalyse sind in Tabelle 3.1 zusammen gestellt.

Tabelle 3.1.: Ergebnis der Nass- und Trockensiebung

Kornfraktionen (Siebrückstände) aus Siebanalyse (Steinbruch Sundern - Westenfeld)												
Siebweite	**<0,063**	[%]	**0 - 2** [g]	[%]	**0-2** [g] **NS**	[%]	**2-5** [g]	[%]	**5-8** [g]	[%]	**8-11** [g]	[%]
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	250,2	14,7
8	0	0	0	0	0	0	0	0	48	4,0	1389,8	81,7
5,6	0	0	0	0	0	0	27,1	4,1	864	72,3	36	2,1
4	0	0	0	0,0	1,1	0,1	235	35,2	242,8	20,3	1	0,1
2	0	0	7,9	2,2	47,9	6,0	339,1	50,8	9,3	0,8	0,6	0,0
1	0	0,0	94	25,9	132,6	16,7	18,3	2,7	0,8	0,1	0,9	0,1
0,5	0	0,0	103,1	28,4	244,4	30,8	3,4	0,5	1,2	0,1	1,2	0,1
0,25	0,17	0,0	50,4	13,9	249,2	31,4	3,6	0,5	1,4	0,1	1,3	0,1
0,125	9,73	2,5	30,4	8,4	106,5	13,4	4,6	0,7	2,2	0,2	2,2	0,1
0,063	51,4	13,2	15,3	4,2	6,3	0,8	4,2	0,6	2,4	0,2	2,2	0,1
<0,063	6,7	1,7	0,5	0,1	0,5	0,1	0,7	0,1	1,0	0,1	0,9	0,1
IST [g]	68,0	17,49	301,6	83,0	788,5	99,3	636	95,32	1173,1	98,19	1686,3	99,08
Soll [g]	0,0		364,0				0,0		667,8		1194,9	
Diff. [g]	-68,0		62,4				-636		-505,3		-491,4	
Gesamtmenge Körnung [g]		**Soll**	2226,7									
Gesamtmenge Körnung [g]		**IST**	3865,0									

3.1.2. Siebliniendesign

Die Fullerkurven stellen für den Sieblinienentwurf die Grundlage dar. Für den Basisentwurf ist eine Annäherung an die Fullerkurve n = 0,45 sinnvoll. Die Designsieblinie aus Brechkorn wurde der Fullerkurve (n=0,45) mit den zur Verfügung stehenden Gesteinsfraktionen aus dem Steinbruch Sundern - Westenfeld angenähert (siehe Abbildung 3.1). Zur Optimierung der Verarbeitbarkeit wurde Natursand (Mischanlage Dam, Rheinufer Köln) ergänzt (siehe Abbildung 3.2). Die erstellte Designsieblinie entspricht der Fullerkurve 0,45 und ist somit als optimal zu beurteilen. Eine Kombination von Brech- und Natursand wird in den Richtlinien ausdrücklich empfohlen.

Anmerkung: *Die Vorgaben der EAAW sind zu allgemein und nicht ausreichend genau. Die RAAW definiert keine Streubreiten sondern bezieht sich auf die Fullerkurve.*

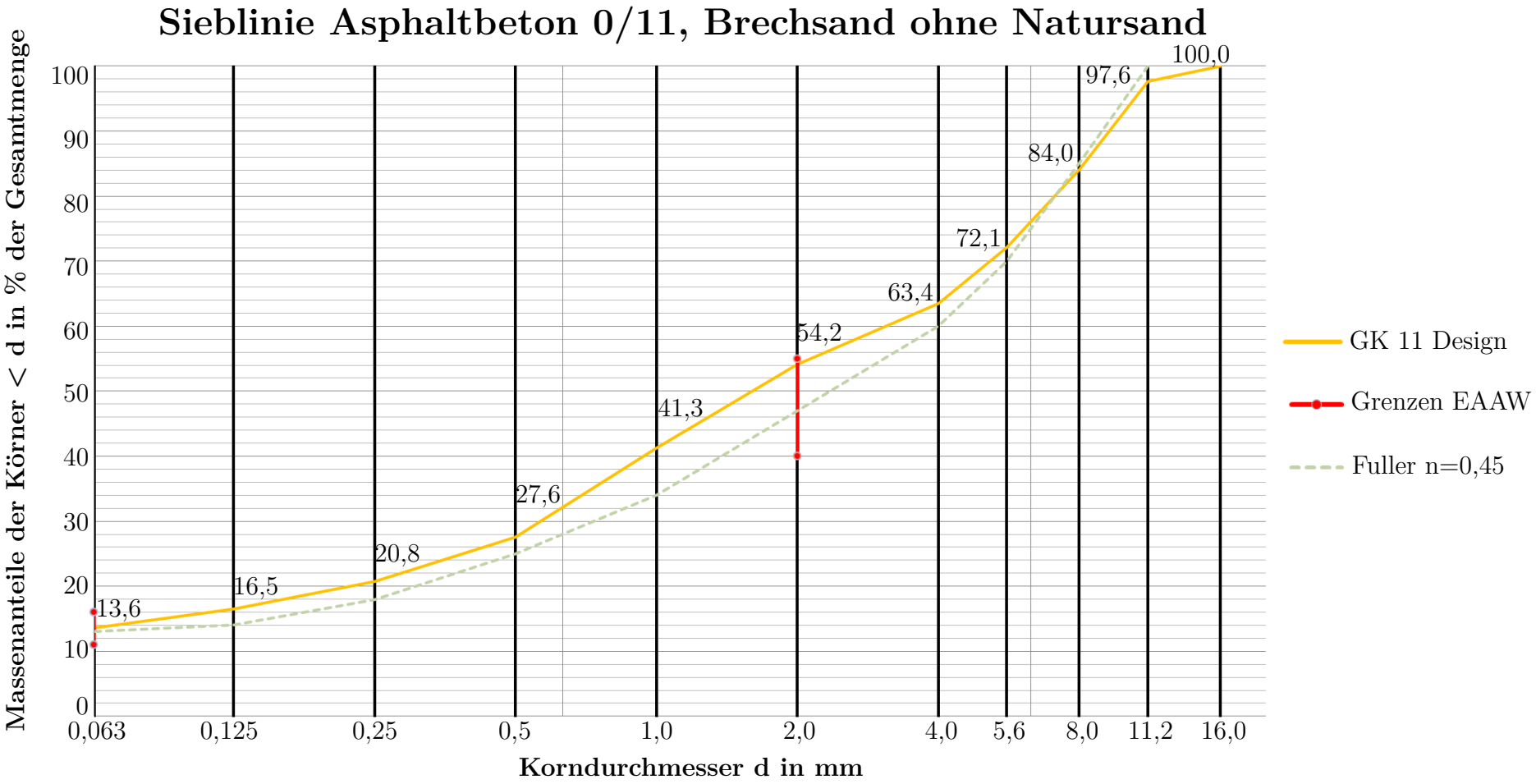


Abbildung 3.1.: Sieblinie Asphaltbeton 0/11 mit Brechsand ohne Natursand

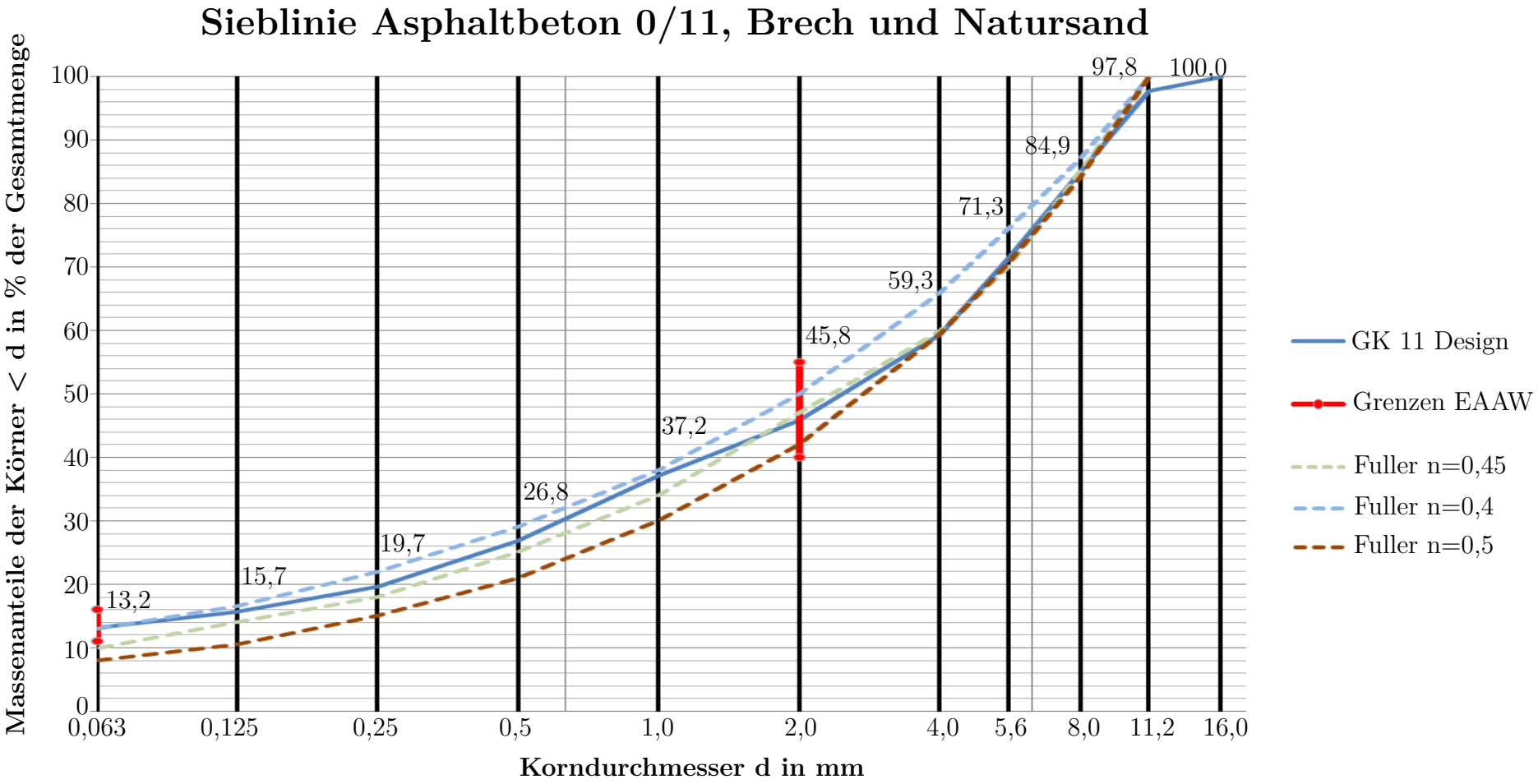


Abbildung 3.2.: Sieblinie Asphaltbeton 0/11 mit Brech- und Natursand

3.2. Bestimmung der Affinität, des Hohlraumgehaltes sowie des optimalen Bindemittelgehalts

In Anlehnung an die zugrunde gelegten Richtlinien (siehe Eignungsprüfung Kapitel 3) ist ein maximaler Hohlraumgehalt von $\leq$ 3,0 vol% bei 20 (25) Verdichtungsschlägen (beidseitig) mit dem Marshallhammer nach [52] zu erreichen. Zur Schaffung einer ausreichenden Verdichtungsfähigkeit des Asphaltmischgutes wurde die Sieblinie und der Bindemittelgehalt optimiert (siehe Abschnitt 3.1.2 und 3.2.2). Im Zuge der Bindemitteloptimierung wurden normkonform Marshallkörper mit drei verschiedenen Bindemittelgehälter (7,2m%; 6,7m% und 6,2 m%) mit Bitumen 70/100 hergestellt und anschließend mit 2 x 20, 2 x 25, 2 x 30 Schlägen beidseitig verdichtet. Die Sieblinie für beide Bindemittelsorten wurde nicht verändert, daher wurde der optimale Bindemittelgehalt des PmBs in Anlehnung an die Ergebnisse des Bitumens 70/100 in einem vereinfachten Verfahren ermittelt (gültig für die Proben B520 und B533).

3.2.1. Untersuchungsparameter und Laborproben für den optimalen Hohlraumgehalt

Die Untersuchungsparameter und Vorschriften für die Laborprüfungen basieren auf folgende Normen und Richtlinien

- Probenvorbereitung, Marshall-Verdichtungsgerät ÖNORM EN 12697 - 30, Ausgabe 12-06-15
- RAAW, Ausgabe April 2013
- EAAW, Ausgabe 2008

Die Marshallprobekörper (Abmessungen: Durchmesser 101,6 $\pm$ 0,1 mm, Höhe 63,5 $\pm$ 2,5 mm) wurden bei einer Temperatur von 135 $\pm$ 5°C mit einer Mischgutmenge (aus Probeverdichtung) von 1250 g hergestellt und jeweils mit 20, 25 und 30 Schlägen beidseitig verdichtet.

3.2.2. Ergebnisse der Laborprüfungen

Aus den Bestimmungen der Rohdichte, Raumdichte und des Hohlraumgehaltes an den Marshallkörpern ergab sich eine optimale Bindemittelmenge an Bitumen 70/100, B520 und B533 von 6,7 m% (siehe Tabelle 3.5 und 3.9).

Tabelle 3.2.: Marshallkörper 7,2 m% Bitumen 70/100

Marshallkörper 7,2 % Bitumen	Prüfdatum (25.04.2015)	
Rohdichte [g/cm³]	ρ_w =	0,997
Pyknometer Nummer	**1**	**4**
Flasche leer [g]	705,6	700,7
Flasche + Mischgut [g]	1296,6	1366,1
Einwaage [g]	591,0	665,4
Flasche Voll (W+MG+F) [g]	2323,6	2347,6
Berechnete Werte		
Lösungsmittelmenge (Wasser) [g]	1027,0	981,5
Volumen Wasser [cm³]	1030,1	984,5
Volumen Flasche [cm³]	1274,2	1258,9
Volumen Mischgut [cm³]	244,1	274,4
Rohdichte [g/cm³]	**2,421**	**2,425**
Mittelwert Rohdichte [g/cm³]	**2,423**	

Tabelle 3.3.: Hohlraumgehalt 7,2 m% Bitumen 70/100

Schlagzahl	**Masse Trocken [g]**	**Masse UW [g]**	**Masse feucht [g]**
20 I	1247,5	727,3	1248,2
20 II	1249,7	729,5	1250,4
25 I	1250,4	730,5	1251
25 II	1245,7	728	1246,3
30 I	1255,4	733,8	1256,1
30 II	1257	735	1257,6

V Körper	**Raumdichte**	**Hohlraumg. [%]**	**Hohlraumg. MW [%]**
520,9	2,391	1,32	**1,2**
520,9	2,395	1,14	
520,5	2,398	1,03	**1,0**
518,3	2,399	0,98	
522,3	2,400	0,96	**0,9**
522,6	2,401	0,91	

Tabelle 3.4.: Marshallkörper 6,7 m% Bitumen 70/100

Marshallkörper 6,7 % Bitumen	Prüfdatum (25.04.2015)	
Rohdichte	ρ_w =	0,997
Pyknometer Nummer	**2**	**4a**
Flasche leer [g]	690,4	655,3
Flasche + Mischgut [g]	1595,3	1578,4
Einwaage [g]	904,9	923,1
Flasche Voll (W+MG+F) [g]	2498,8	2466,8
Berechnete Werte		
Lösungsmittelmenge (Wasser) [g]	903,5	888,4
Volumen Wasser [cm^3]	906,2	891,1
Volumen Flasche [cm^3]	1277,5	1269,8
Volumen Mischgut [cm^3]	371,3	378,7
Rohdichte [g/cm^3]	**2,437**	**2,437**
Mittelwert Rohdichte [g/cm^3]	**2,437**	

Tabelle 3.5.: Hohlraumgehalt 6,7 m% Bitumen 70/100

Schlagzahl	**Masse Trocken [g]**	**Masse UW [g]**	**Masse feucht [g]**
20 I	1233,1	724,5	1234,2
20 II	1254,3	735,6	1255,2
25 I	1252	736,6	1252,8
25 II	1250	735,4	1250,8
30 I	1256,1	738	1257
30 II	1246,9	732,2	1247,6

V Körper	**Raumdichte**	**Hohlraumg. [%]**	**Hohlraumg. MW [%]**
509,7	2,417	0,82	**1,0**
519,6	2,411	1,08	
516,2	2,422	0,63	**0,6**
515,4	2,422	0,64	
519	2,417	0,83	**0,9**
515,4	2,415	0,90	

Tabelle 3.6.: Marshallkörper 6,2 m% Bitumen 70/100

Marshallkörper 6,2 % Bitumen	Prüfdatum (28.04.2015)	
Rohdichte		$\rho_w =$ 0,997
Pyknometer Nummer	**1**	**3**
Flasche leer [g]	705,5	705,5
Flasche + Mischgut [g]	1483,3	1483,0
Einwaage [g]	777,8	777,5
Flasche Voll (W+MG+F) [g]	2438,1	2416,8
Berechnete Werte		
Lösungsmittelmenge (Wasser) [g]	954,8	933,8
Volumen Wasser [cm^3]	957,7	936,6
Volumen Flasche [cm^3]	1274,2	1253,8
Volumen Mischgut [cm^3]	316,5	317,2
Rohdichte [g/cm^3]	**2,457**	**2,451**
Mittelwert Rohdichte [g/cm^3]	**2,454**	

Tabelle 3.7.: Hohlraumgehalt 6,2 m% Bitumen 70/100

Schlagzahl	**Masse Trocken [g]**	**Masse UW [g]**	**Masse feucht [g]**
20 I	1255,5	736,6	1256,8
20 II	1262,9	741,5	1264,3
25 I	1254,3	737,8	1255,8
25 II	1253,5	738	1254,8
30 I	1260,6	741,4	1261,3
30 II	1258,4	742,1	1261,7

V Körper	**Raumdichte**	**Hohlraumg. [%]**	**Hohlraumg. MW [%]**
520,2	2,413	1,66	**1,6**
522,8	2,416	1,57	
518	2,421	1,34	**1,3**
516,8	2,426	1,17	
519,9	2,425	1,20	**1,3**
519,6	2,422	1,32	

Tabelle 3.8.: Marshallkörper 6,7 m% B520

Marshallkörper 6,7 % PmB	Prüfdatum 26.05.2015	
Rohdichte	ρ_w =	0,997
Pyknometer Nummer	**3**	**14**
Flasche leer [g]	705,7	695,2
Flasche + Mischgut [g]	1313,7	1264,4
Einwaage [g]	608,0	569,2
Flasche Voll (W+MG+F) [g]	2313,6	2348,7
Berechnete Werte		
Lösungsmittelmenge (Wasser) [g]	999,9	1084,3
Volumen Wasser [cm^3]	1002,9	1087,6
Volumen Flasche [cm^3]	1253,8	1323,7
Volumen Mischgut [cm^3]	250,9	236,1
Rohdichte [g/cm^3]	**2,423**	**2,410**
Mittelwert Rohdichte [g/cm^3]	**2,417**	

Tabelle 3.9.: Hohlraumgehalt 6,7 m% B520

Schlagzahl	**Masse Trocken [g]**	**Masse UW [g]**	**Masse feucht [g]**
20 I	1191	694,5	1192,5
20 II	1165,6	679,5	1167,4
25 I	1175,6	679,6	1177,6
25 II	1197,1	696,1	1199,2
V Körper	**Raumdichte**	**Hohlraumg. [%]**	**Hohlraumg. MW [%]**
498	2,392	1,05	**1,1**
487,9	2,391	1,09	
498	2,363	2,23	**1,8**
503,1	2,382	1,43	

3.2.3. Bestimmung der Affinität zwischen Bindemittel und Gesteinskörnung

Die Bestimmung der Affinität wurde nach [49] durchgeführt. Im rolling bottle Test wurde der Bitumenumhüllungsgrad von zwei Personen nach 6 Stunden visuell erfasst und nach 24 Stunden mit 70 % für Bitumen 70/100 und 80 % für B520 bewertet.

3.2.4. Bestimmung der Standsicherheit (Standfestigkeit)

Um die Standsicherheit zu prüfen, wurde eine im Walzsegmentverdichter (Verdichtungsarbeit basiert auf Ergebnissen der Eignungsprüfungen in Kapitel 3) hergestellte Asphaltbetonplatte (290x320x60 mm) auf einer schrägen Ebene für 192 Stunden bei 70°C gelagert und nach 24, 48, 72 und 192 Stunden die Verformung gemessen. Dieser Test wurde für beide Bindemittelsorten (Mischgüter) durchgeführt. Die Steigung der Ebene wurde aus der Tabelle 3.10 gemittelt und mit 29 ° gewählt. Nach 48 h nahm die Verformungsgeschwindigkeit der Platte (Bitumen 70/100) deutlich ab. Nach 72 h blieb die Verformung bis zum Versuchsende nach 192 h konstant bei 16 mm. Bei der Platte mit PmB fiel die Verformungsgeschwindigkeit nach 24 h stark ab und kam nach 48 h in der Klimakammer zum Stillstand (siehe Diagramm 3.4). Die maximale Verformung Betrug 23 mm.

Tabelle 3.10.: Bestimmung der Dammneigung für die Prüfung der Standsicherheit

Speicher/Kanal	vertikal	horizontal	Neigung [rad]	Neigung [°]
Goldisthal	1	1,6	0,56	32,01
Avce	1	2,5	0,38	21,80
Goldisthal (Unterbecken)	1	1,6	0,56	32,01
Arcicjiaro	1	1,8	0,51	29,05
Zirmsee	1	1,5	0,59	33,69
Zarnowiec	1	2,3	0,41	23,50
Wag	1	1,75	0,52	29,74
Brandstatt	1	1,7	0,53	30,47
Haselstein	2	3	0,59	33,69
Feldsee	1	1,7	0,53	30,47
Mittelwert	1	1,76	0,52	29,64
gewählte Neigung	**29 Grad**			

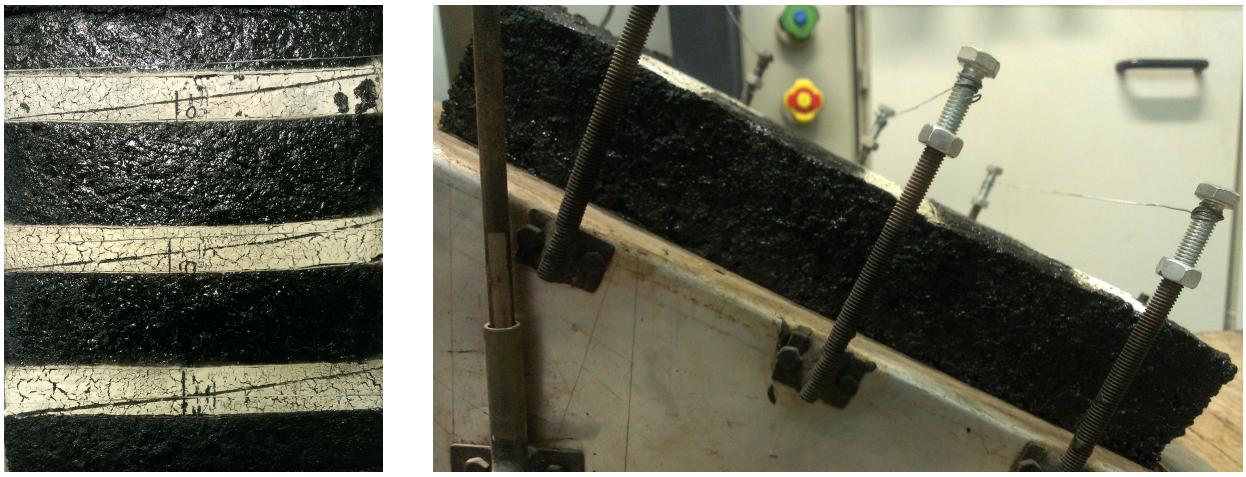


Abbildung 3.3.: Lagerung der Asphaltbetonplatten auf 29° schrägen Ebene, links: Draufsicht mit drei Messhorizonten, rechts: Seitenansicht

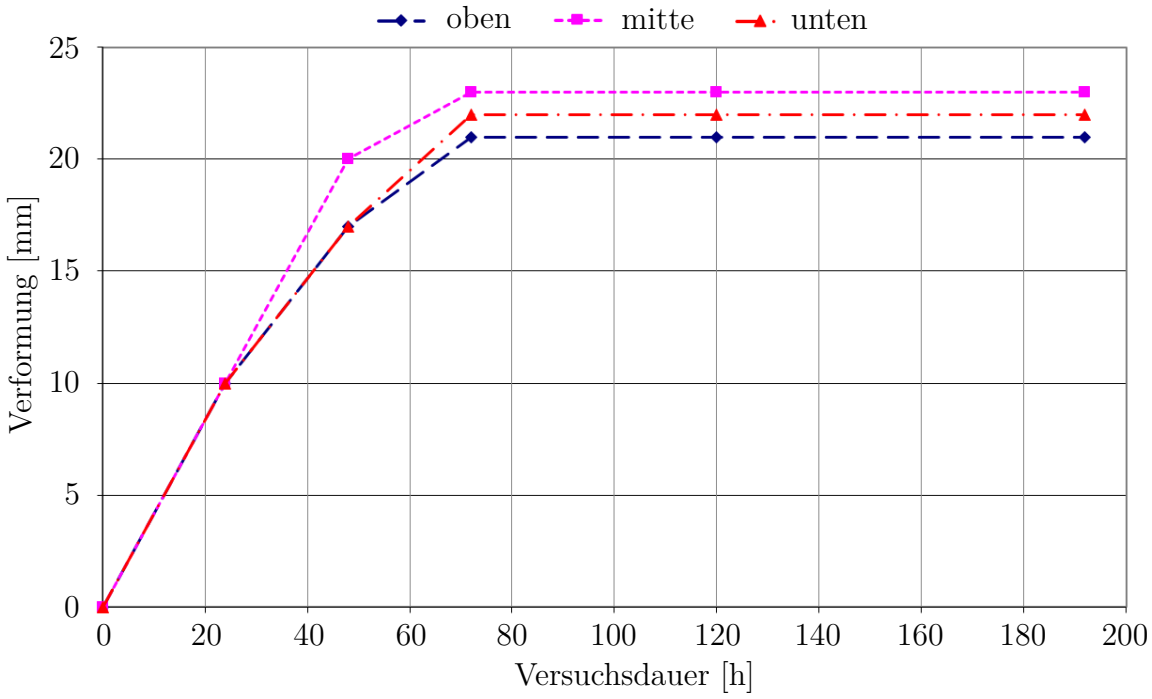


Abbildung 3.4.: Verformungsverlauf Lagerung schiefe Ebene, B520

3.2.5. Bestimmung der Flexibilität (Verformbarkeit) von Asphaltbetonoberflächendichtung

Die Verformbarkeit von Asphaltbetonoberflächendichtung beschreibt die schadlose Deformation der Dichtung aufgrund von Setzungsmulden. Der Nachweis erfolgt mit dem Versuch nach Van Asbeck. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die in Abschnitt 3.2.2 bestimmten Probemischgüter (Bitumensorten 70/100 und B520) im ungealterten Zustand (A) hinsichtlich deren Verformbarkeit untersucht.

3.2.5.1. Versuchsablauf

Bei diesem Versuch wird eine kreisförmige Platte des zu prüfenden Dichtungsbelages mit einem Durchmesser von 50 cm in einem Drucktopf auf eine Glasperlenunterlage gelegt, mittels Wasserdruck zu einer Setzungsmulde verformt und zugleich auf Dichtheit geprüft. Die Tiefe der unter diesen Bedingungen erzielbaren, noch wasserdichten Setzungsmulde h, bezogen auf die Muldenweite s, wird als Maß der Verformbarkeit benutzt und mit einem Grenzwert $h/s = 1/10$ zur Beurteilung ausreichender Verformbarkeit herangezogen.[17]

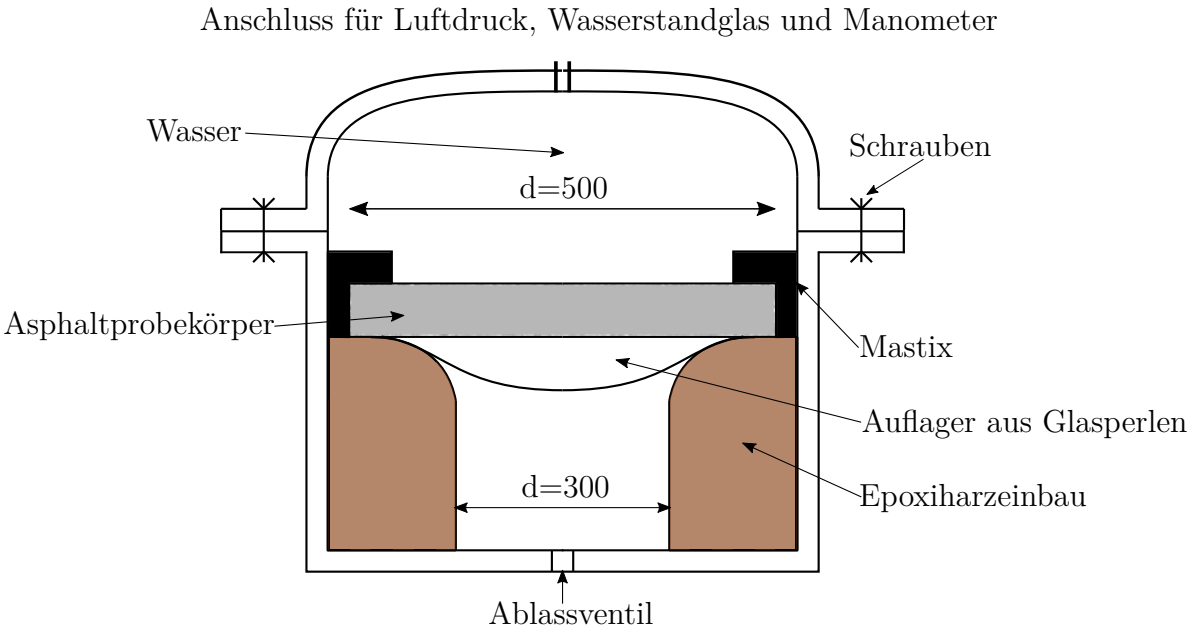


Abbildung 3.5.: Versuchsaufbau Van Asbeck nach Hans Haas, Bitumenheft Nr.4 1992

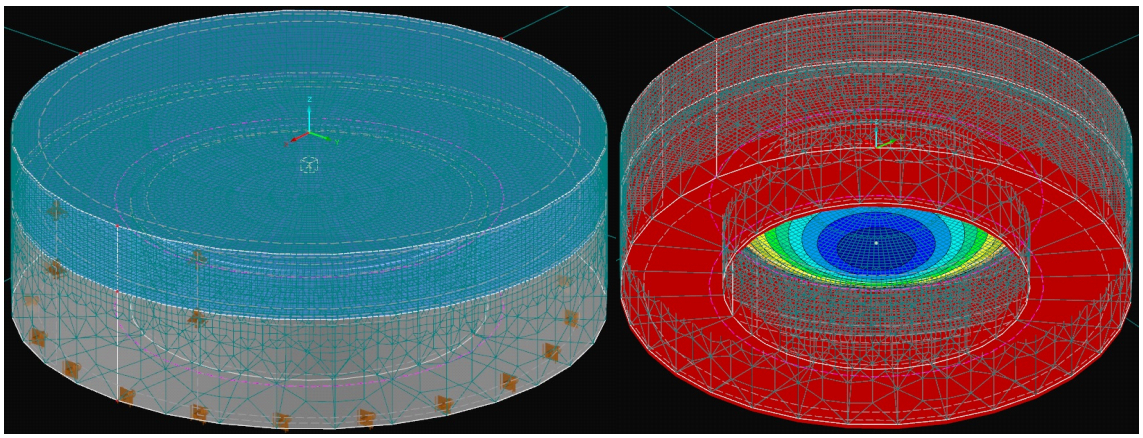


Abbildung 3.6.: Numerische Simulation der Verformung des Probekörpers im Versuchsaufbau nach Abbildung 3.5

3.2.5.2. Versuchsergebnisse Asphaltmischgut mit Bitumen 70/100

Bei einem Durchmesser von 30 cm wurde eine Setzungsmulde mit einer Tiefe h von 3,4 cm erreicht, die somit um 0,4 cm tiefer ist als die Mindestanforderung. Beim Erreichen dieser Tiefe kam es zu keinerlei Rissbildung und keinem Wasserverlust aus dem oberen Volumen. Somit erfüllt dieses Dichtungsdesign alle Anforderungen laut [17]. Nach einer Drucksteigerung auf 3,0 bar innerhalb von 5 Stunden wurde der Probekörper weitere 17 h bei 3,0 bar belastet, auch während dieser Zeit kam es zu keinem Wasserverlust.

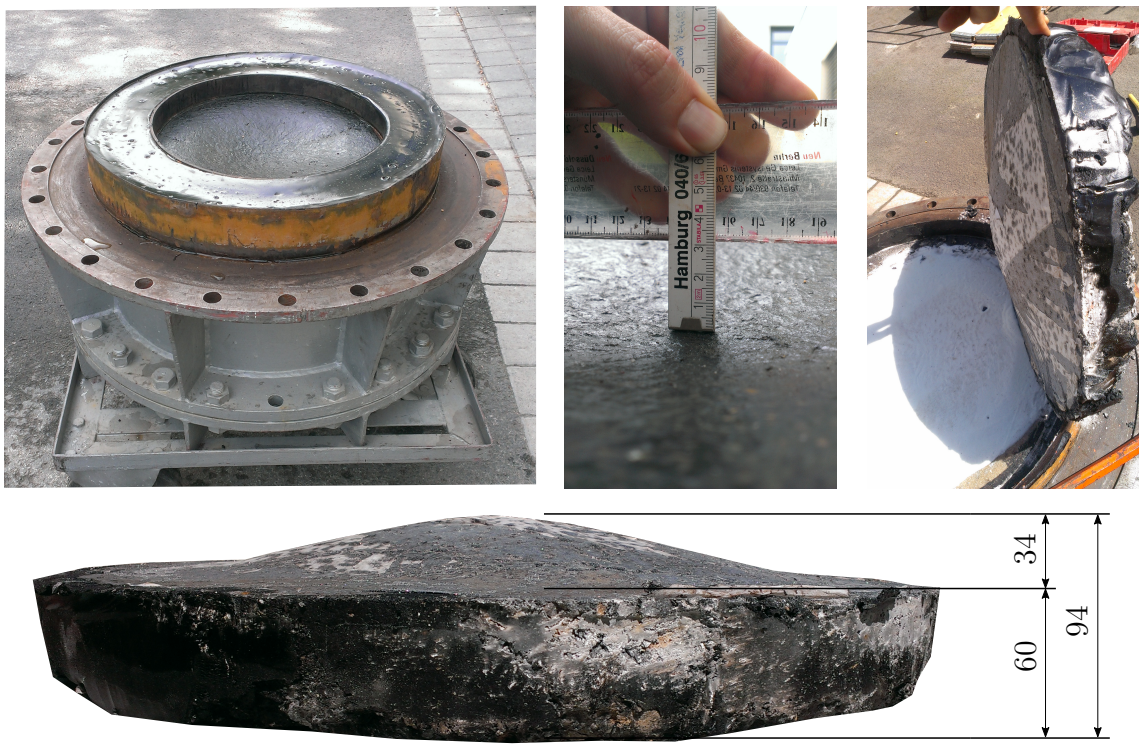


Abbildung 3.7.: Verformter Probekörper Bitumen 70/100 nach Versuch, Maße in [mm]

Tabelle 3.11.: Van Asbeck, Asphaltmischgut mit Bitumen 70/100

Flexibility AC (Asphaltbeton) Van Asbeck time schedule

Date: 23.07.2015 Temperature: 25 °C
Mix: AC 0/11 Bitumen 70/100 Thicknes of facing: 6 cm

Time	elapsed time	water column	glaspearls [g]	water pressure [bar]	depth [cm]
09:45	0	39,7	0		45,0
10:00	15		100		
10:15	30	27,5	200	0,5	
10:30	45	23,2	300		
10:45	60	14,9	400	1,0	
11:00	75	10	500		
11:15	90	25,3	600	1,5	
11:30	105	22	700		
11:45	120	14,2	800	2,0	
12:00	135	20	900		
12:15	150	15	1000	2,5	
12:30	165	9,5	1100		
12:45	180	1,5	1200	3,0	
13:00	195	20	1300	3,0	
13:15	210	14,5	1400	3,0	
13:30	225	8,5	1500	3,0	
13:45	240	27	1600	3,0	
14:00	255	22,9	1700	3,0	
14:15	270	17,5	1800	3,0	
14:30	285	12	1900	3,0	
14:45	300	13	2000	3,0	48,5
08:00		7,5		3,0	48,5
					h = 3,5 cm

3.2.5.3. Versuchsergebnisse Asphaltmischgut mit B520

Im Vergleich mit dem Versuch in Abschnitt 3.2.5.2 (Bitumen 70/100) entstand eine geringere Setzungsmulde mit einer Tiefe h von 3,2 cm. Dieses Ergebnis liegt um 0,2 cm über den Anforderungen. Nach 1350 min ohne Wasserverlust wurde die Setzungsmulde durch ablassen von Glasperlen bis zum Versagen verformt. Nach weiteren 150 min versagte die Dichtung bei einer Muldentiefe h von 6,5 cm. Das resultierende Rissbild ist in Abbildung 3.8 ersichtlich.

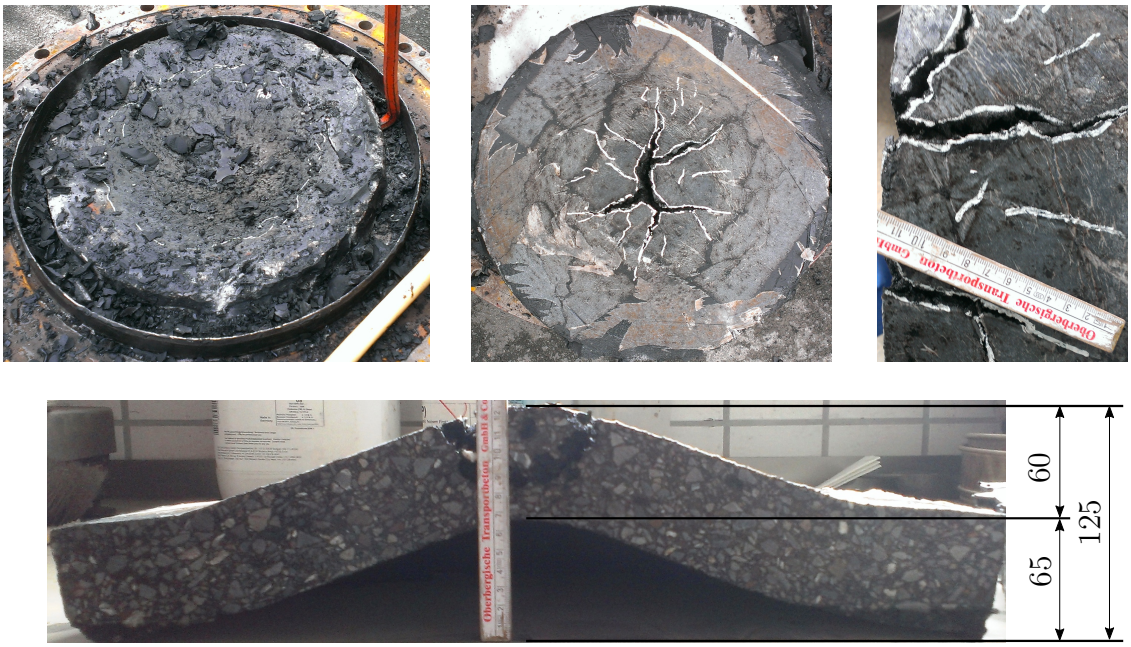


Abbildung 3.8.: Verformter Probekörper (B520) nach Versuch, Maße in [mm]

Tabelle 3.12.: Van Asbeck, Asphaltmischgut mit B520

Flexibility AC Van Asbeck time schedule

Date: 25.07.2015 Temperature: 25 °C
Mix: AC 0/11 B520 Thicknes of facing: 6 cm

Time	elapsed time	water column	glaspearls [g]	water pressure [bar]	depth [cm]
10:00	0	24,3	0		45,2
10:15	15	22,2	100		
10:30	30	11,4	200	0,5	
10:45	45	4,9	300		
11:00	60	14,6	400	1,0	
11:15	75	9,0	500		
11:30	90	1,9	600	1,5	
11:45	105	16,4	700		
12:00	120	9,0	800	2,0	
12:15	135	4,0	900		
12:30	150	15,0	1000	2,5	
12:45	165	10,6	1100		
13:00	180	3,0	1200	3,0	
13:15	195	9,5	1300	3,0	
13:30	210	4,2	1400	3,0	
13:45	225	13,0	1500	3,0	
14:00	240	8,8	1600	3,0	
14:15	255	3,5	1700	3,0	
14:30	270	9,2	1800	3,0	
14:45	285	9,0	1900	3,0	
15:00	300	3,8	2000	3,0	48,4
08:30	1350	3,3		3,0	48,4
					h = 3,2 cm

Tabelle 3.13.: Van Asbeck B520 Belastung bis Dichtungsversagen

Flexibility AC Van Asbeck time schedule (crack failure)

Date: 25.07.2015 Temperature: 25 °C
Mix: AC 0/11 B520 Thicknes of facing: 6 cm

Time	elapsed time	water column	glaspearls [g]	water pressure [bar]	depth [cm]
09:00		8,0	2200	3,0	
09:15	15	15,5	2400	3,0	
09:30	30	7,0	2600	3,0	
09:45	45	24,5	2800	3,0	
10:00	60	15,0	3000	3,0	
10:15	75	6,0	3200	3,0	
10:30	90	13,0	3400	3,0	
11:00	120	21,0	3600	3,0	
11:15	135	0,2	4000	3,0	
11:30	150		4400	3,0	51,7
					h = 6,5 cm

3.3. Bestimmung der Bindemitteleigenschaften Bitumen 70/100

Für die Untersuchungen der Alterungsbeständigkeit (Widerstand gegen Versprödung und Versteifung) wurde im Rahmen dieser Dissertation unter anderem ein Standard Straßenbaubitumen 70/100 (BP Gelsenkirchen, Analysewerte der Raffinerie R&K 46,4 und PEN 83,3) untersucht. Um den Einfluss des Aufwärmens (Erhitzen), welcher im Labor während der Versuche unumgänglich ist, auf die Versprödung und Versteifung zu bestimmen wurde das Bindemittel für verschiedene Temperaturen und Zeiten erhitzt und anschließend die Materialkennwerte R&K sowie PEN bestimmt (Bitumen in geschlossenen 5 l Eimern erwärmt). Aus den folgenden Tabellen (3.14 und 3.15) ist ersichtlich, dass drei Aufheizvorgänge, wobei der Dritte die letztliche Verarbeitung ist, keine signifikante Änderung der Materialeigenschaften aufgrund von Alterungsprozessen bewirkt.

Aufheizvorgänge - Hochtemperaturbereiche

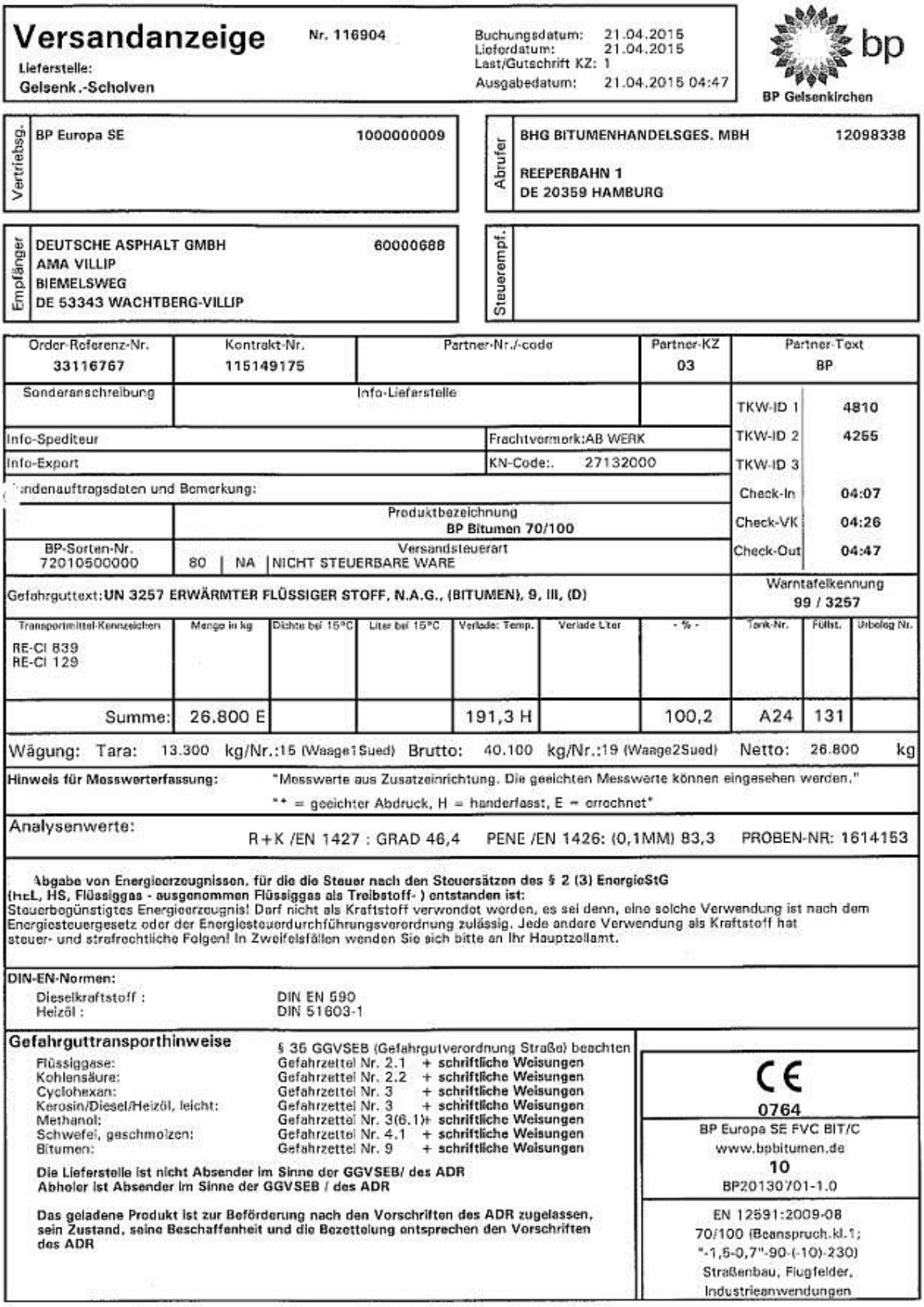
1. Abfüllvorgang Raffinerie (heiß aus Tank)
2. Aufheizen bei Probenportionierung
3. Mischgutherstellung bei gleichzeitiger Versuchsdurchführung

Tabelle 3.14.: Versprödungstendenzen durch erwärmen

Laborprüfungen Bitumens 70/100				
22.04.2015	**Geprüfte Werte (A), Bitumen 3h bei 160 °C erwärmt**			
Versuch	**Links**	**Rechts**	**Mittelwert**	**Rundung**
R&K [°C]	48,2	48,3	48,25	48,2
	Versuch 1	**Versuch 2**	**Versuch 3**	
Penetration [1/10mm]	80	80	81	
23.04.2015	**Geprüfte Werte (A), Bitumen 4h bei 135 °C erwärmt**			
Versuch	**Links**	**Rechts**	**Mittelwert**	**Rundung**
R&K [°C]	47,8	47,3	47,55	47,6
	Versuch 1	**Versuch 2**	**Versuch 3**	
Penetration [1/10mm]	81	81	81	
27.04.2015	**Geprüfte Werte (A), Bitumen 4h bei 165 °C erwärmt**			
Versuch	**Links**	**Rechts**	**Mittelwert**	**Rundung**
R&K [°C]	47,7	47,8	47,75	47,8
	Versuch 1	**Versuch 2**	**Versuch 3**	
Penetration [1/10mm]	81	81	81	
27.04.2015	**Geprüfte Werte (A), Bitumen 4,5h bei 165 °C erwärmt**			
Versuch	**Links**	**Rechts**	**Mittelwert**	**Rundung**
R&K [°C]	47,8	48,1	47,95	48
	Versuch 1	**Versuch 2**	**Versuch 3**	
Penetration [1/10mm]	80	80	80	
27.04.2015	**Geprüfte Werte (A), Bitumen 7,0h bei 140 °C erwärmt**			
Versuch	**Links**	**Rechts**	**Mittelwert**	**Rundung**
R&K [°C]	47,8	47,6	47,7	47,8
	Versuch 1	**Versuch 2**	**Versuch 3**	
Penetration [1/10mm]	81	80	81	
28.04.2015	**Geprüfte Werte (A), Bitumen 5,0h bei 165 °C erwärmt**			
Versuch	**Links**	**Rechts**	**Mittelwert**	**Rundung**
R&K [°C]	48,7	48,9	48,8	48,8
	Versuch 1	**Versuch 2**	**Versuch 3**	
Penetration [1/10mm]	80	80	80	

Tabelle 3.15.: Fortsetzung Tabelle Versprödungstendenzen durch erwärmen

28.04.2015	**Geprüfte Werte (A), Bitumen 4,0h bei 165 °C erwärmt**			
Versuch	**Links**	**Rechts**	**Mittelwert**	**Rundung**
R&K [°C]	48	47,9	47,95	48
	Versuch 1	**Versuch 2**	**Versuch 3**	
Penetration [1/10mm]	80	81	82	
08.05.2015	**Geprüfte Werte (A), Bitumen 12,0h bei 165 °C erwärmt**			
Versuch	**Links**	**Rechts**	**Mittelwert**	**Rundung**
R&K [°C]	48,5	48,5	48,5	48,6
	Versuch 1	**Versuch 2**	**Versuch 3**	
Penetration [1/10mm]	70	68	69	
11.05.2015	**Geprüfte Werte (A), Bitumen 4,0h bei 165 °C erwärmt**			
Versuch	**Links**	**Rechts**	**Mittelwert**	**Rundung**
R&K [°C]	48,2	48,2	48,2	48,2
	Versuch 1	**Versuch 2**	**Versuch 3**	
Penetration [1/10mm]	83	83	82	
12.05.2015	**Geprüfte Werte (A), Bitumen 6,0h bei 165 °C erwärmt**			
Versuch	**Links**	**Rechts**	**Mittelwert**	**Rundung**
R&K [°C]	48,2	48,1	48,15	48,2
	Versuch 1	**Versuch 2**	**Versuch 3**	
Penetration [1/10mm]	81	82	81	
12.05.2015	**Geprüfte Werte (A), Bitumen 8,0h bei 165 °C erwärmt**			
Versuch	**Links**	**Rechts**	**Mittelwert**	**Rundung**
R&K [°C]	47,8	48,2	48	48
	Versuch 1	**Versuch 2**	**Versuch 3**	
Penetration [1/10mm]	83	83	82	
19.05.2015	**Geprüfte Werte (A), Bitumen 5,0h bei 165 °C erwärmt**			
Versuch	**Links**	**Rechts**	**Mittelwert**	**Rundung**
R&K [°C]	49,1	49	49,05	49
	Versuch 1	**Versuch 2**	**Versuch 3**	
Penetration [1/10mm]	81	81	80	



Versandanzeige Nr. 116904

Buchungsdatum: 21.04.2015
Liefordatum: 21.04.2015
Last/Gutschrift KZ: 1
Ausgabedatum: 21.04.2015 04:47

Lieferstelle:
Gelsenk.-Scholven

BP Gelsenkirchen

Vertriebsg. BP Europa SE 1000000009

Abrufer BHG BITUMENHANDELSGES. MBH 12098338
REEPERBAHN 1
DE 20359 HAMBURG

Empfänger DEUTSCHE ASPHALT GMBH 60000688
AMA VILLIP
BIEMELSWEG
DE 53343 WACHTBERG-VILLIP

Steuerempf.

Order-Referenz-Nr.	Kontrakt-Nr.	Partner-Nr./-code	Partner-KZ	Partner-Text
33116767	115149175		03	BP

Sonderanschreibung	Info-Lieferstelle	

TKW-ID 1	4810		
TKW-ID 2	4255		
TKW-ID 3			
Check-In	04:07		
Check-VK	04:26		
Check-Out	04:47		

Info-Spediteur | Frachtvermerk: AB WERK
Info-Export | KN-Code:. 27132000
Kundenauftragsdaten und Bemerkung:

Produktbezeichnung: BP Bitumen 70/100

BP-Sorten-Nr. 72010500000 | Versandsteuerart: 80 | NA | NICHT STEUERBARE WARE

Gefahrguttext: UN 3257 ERWÄRMTER FLÜSSIGER STOFF, N.A.G., (BITUMEN), 9, III, (D)

Warntafelkennung: 99 / 3257

Transportmittel-Kennzeichen	Menge in kg	Dichte bei 15°C	Liter bei 15°C	Verlade-Temp.	Verlade Liter	- % -	Tank-Nr.	Füllst.	Urbeleg Nr.
RE-CI 839 RE-CI 129									
Summe:	26.800 E			191,3 H		100,2	A24	131	

Wägung: Tara: 13.300 kg/Nr.:15 (Waage1Sued) Brutto: 40.100 kg/Nr.:19 (Waage2Sued) Netto: 26.800 kg

Hinweis für Messwerterfassung: "Messwerte aus Zusatzeinrichtung. Die geeichten Messwerte können eingesehen werden."
"* = geeichter Abdruck, H = handerfasst, E = errechnet"

Analysenwerte: R+K /EN 1427 : GRAD 46,4 PENE /EN 1426: (0,1MM) 83,3 PROBEN-NR: 1614153

Abgabe von Energieerzeugnissen, für die die Steuer nach den Steuersätzen des § 2 (3) EnergieStG (hcL, HS, Flüssiggas - ausgenommen Flüssiggas als Treibstoff-) entstanden ist:
Steuerbegünstigtes Energieerzeugnis! Darf nicht als Kraftstoff verwendet werden, es sei denn, eine solche Verwendung ist nach dem Energiesteuergesetz oder der Energiesteuerdurchführungsverordnung zulässig. Jede andere Verwendung als Kraftstoff hat steuer- und strafrechtliche Folgen! In Zweifelsfällen wenden Sie sich bitte an Ihr Hauptzollamt.

DIN-EN-Normen:
Dieselkraftstoff : DIN EN 590
Heizöl : DIN 51603-1

Gefahrguttransporthinweise — § 36 GGVSEB (Gefahrgutverordnung Straße) beachten

Flüssiggase:	Gefahrzettel Nr. 2.1	+ schriftliche Weisungen
Kohlensäure:	Gefahrzettel Nr. 2.2	+ schriftliche Weisungen
Cyclohexan:	Gefahrzettel Nr. 3	+ schriftliche Weisungen
Kerosin/Diesel/Heizöl, leicht:	Gefahrzettel Nr. 3	+ schriftliche Weisungen
Methanol:	Gefahrzettel Nr. 3(6.1)	+ schriftliche Weisungen
Schwefel, geschmolzen:	Gefahrzettel Nr. 4.1	+ schriftliche Weisungen
Bitumen:	Gefahrzettel Nr. 9	+ schriftliche Weisungen

Die Lieferstelle ist nicht Absender im Sinne der GGVSEB/ des ADR
Abholer ist Absender im Sinne der GGVSEB / des ADR

Das geladene Produkt ist zur Beförderung nach den Vorschriften des ADR zugelassen, sein Zustand, seine Beschaffenheit und die Bezettelung entsprechen den Vorschriften des ADR

CE 0764
BP Europa SE FVC BIT/C
www.bpbitumen.de
10
BP20130701-1.0

EN 12591:2009-08
70/100 (Beanspruch.kl.1;
"-1,5-0,7"-90-(-10)-230)
Straßenbau, Flugfelder,
Industrieanwendungen

Abbildung 3.9.: Lieferschein BP Gelsenkierchen 70/100

3.4. Bestimmung der Bindemitteleigenschaften B520

Für die Probenahme wurde das PmB in einem geschlossenen 5 Liter Kübel erwärmt. Nach einem 3 minütigen Homogenisierungsprozess durch umrühren wurde die benötigte Probe bei ca. 160 - 180 °C entnommen. Bei der Heißlagerung (ca. 180 °C) von PmBs kann es zu einer Phasenseperation von polymerreichen und asphaltenreichen Phasen kommen, welche starke Abweichungen hinsichtlich deren rheologischen Eigenschaften aufweisen (siehe [24]). Die bei der Lagerung auftretende Entmischung kann mittels Fluoreszenzmikroskopie sichtbar gemacht werden (siehe Abschnitt 4.2). Die Bestimmung der Bindemitteleigenschaften wurde für B520 und B533 durchgeführt.

Tabelle 3.16.: Versprödungstendenzen durch erwärmen (Vergleichswerte), B520

Laborprüfungen B520				
10.06.2015 B520	**(A), PmB 5,0 h bei 180 °C erwärmt (Charge 06:35)**			
Versuch	**Links**	**Rechts**	**Mittelwert**	**Rundung**
R&K [°C]	71,3	71,4	71,35	71,4
R&K [°C]	70,4	70,7	70,55	70,6
	Versuch 1	**Versuch 2**	**Versuch 3**	
Penetration [1/10mm]	66	65	65	65,33
Elastische Rückstellung	89	87	88	88
Elastische Rückstellung	91	89	90	90
10.06.2015 B520	**(A), PmB 5,0 h bei 180 °C erwärmt (Charge 13:30)**			
Versuch	**Links**	**Rechts**	**Mittelwert**	**Rundung**
R&K [°C]	73,4	73,3	73,35	73,4
R&K [°C]	73	73	73	73
	Versuch 1	**Versuch 2**	**Versuch 3**	
Penetration [1/10mm]	66	65	65	65,33
Elastische Rückstellung	89	90	89,5	90
10.06.2015 B520	**(A), PmB 5,0 h bei 180 °C erwärmt (Charge 17:10)**			
Versuch	**Links**	**Rechts**	**Mittelwert**	**Rundung**
R&K [°C]	67,5	66,7	67,1	67,2
R&K [°C]	63,9	63,9	63,9	64
	Versuch 1	**Versuch 2**	**Versuch 3**	
Penetration [1/10mm]	66	66	66	66,00
Elastische Rückstellung	91	90	90,5	91

Tabelle 3.17.: Fortsetzung Tabelle Versprödungstendenzen durch erwärmen, B520

11.06.2015 B520	**(A), PmB 4,5 h bei 180 °C erwärmt (kK)**			
Versuch	**Links**	**Rechts**	**Mittelwert**	**Rundung**
R&K [°C]	66,2	65,8	66	66
	Versuch 1	**Versuch 2**	**Versuch 3**	
Penetration [1/10mm]	61	61	61	61,00
	Probe 1	**Probe 2**		
Elastische Rückstellung	87	87		
11.06.2015 B520	**(A), PmB 4,5 h bei 180 °C erwärmt (kK), AA**			
Versuch	**Links**	**Rechts**	**Mittelwert**	**Rundung**
R&K [°C]	67,2	66,8	67	67
	Versuch 1	**Versuch 2**	**Versuch 3**	
Penetration [1/10mm]	49	48	48	48,33
11.06.2015 B520	**(A), PmB 5,5 h bei 180 °C erwärmt (kK)**			
Versuch	**Links**	**Rechts**	**Mittelwert**	**Rundung**
R&K [°C]	73,9	73,4	73,65	73,7
	Versuch 1	**Versuch 2**	**Versuch 3**	
Penetration [1/10mm]	61	62	61	61,33
	Probe 1	**Probe 2**		
Elastische Rückstellung	90	91	90,5	
(A), **11.06.2015 B520**	**PmB mischen bei 180 °C, AA (kK)**			
Versuch	**Links**	**Rechts**	**Mittelwert**	**Rundung**
R&K [°C]	67,5	67,3	67,4	67,4
	Versuch 1	**Versuch 2**	**Versuch 3**	
Penetration [1/10mm]	55	56	56	55,67
	Probe 1	**Probe 2**		
Elastische Rückstellung	86	84	85	
15.06.2015 B520	**(A), PmB 4,5 h bei 180 °C erwärmt (Charge: 06:35)**			
Versuch	**Links**	**Rechts**	**Mittelwert**	**Rundung**
R&K [°C]	67,2	66,3	66,75	
	Versuch 1	**Versuch 2**	**Versuch 3**	
Penetration [1/10mm]	65	65	66	65,33
	Probe 1	**Probe 2**		
Elastische Rückstellung	90	90		
Elastische Rückstellung	91	91		

* kK ... kleiner Kübel, ** AA ... Asphaltanalysator

Tabelle 3.18.: Fortsetzung Tabelle Versprödungstendenzen durch erwärmen, B520 und B533

16.06.2015 B520	**(A), PmB 6,0 h bei 180 °C erwärmt, kK (Charge 13:10)**			
Versuch	**Links**	**Rechts**	**Mittelwert**	**Rundung**
R&K [°C]	71,8	72,2	72	72
R&K [°C]	68,2	67,4	67,8	67,8
	Versuch 1	**Versuch 2**	**Versuch 3**	
Penetration [1/10mm]	61	60	61	60,67
	Probe 1	**Probe 2**		
Elastische Rückstellung	86	90	88	
Elastische Rückstellung	91	91	91	
16.06.2015 B520	**(A), PmB 3,5 h bei 180 °C erwärmt, kK (Charge 13:10)**			
Versuch	**Links**	**Rechts**	**Mittelwert**	**Rundung**
R&K [°C]	72,4	73,1	72,75	72,8
	Versuch 1	**Versuch 2**	**Versuch 3**	
Penetration [1/10mm]	60	59	60	59,67
	Probe 1	**Probe 2**		
17.06.2015 B520	**(A), PmB 5,0 h bei 180 °C erwärmt, kK (Charge 13:10)**			
Versuch	**Links**	**Rechts**	**Mittelwert**	**Rundung**
R&K [°C]	64,3	64,2	64,25	64,2
	Versuch 1	**Versuch 2**	**Versuch 3**	
Penetration [1/10mm]	64	63	63	63,33
	Probe 1	**Probe 2**		
Elastische Rückstellung	80	80	80	
17.10.2015 B533	**(A), PmB 6,0 h bei 180 °C erwärmt, gK**			
Versuch	**Links**	**Rechts**	**Mittelwert**	**Rundung**
R&K [°C]	77,3	77,3	77,3	77,4
	Versuch 1	**Versuch 2**	**Versuch 3**	
Penetration [1/10mm]	62	63	63	62,7

* kK ... kleiner Kübel, ** AA ... Asphaltanalysator, ** gK ... großer Kübel (10l)

4. Weiterführende Bindemittelanalysen

Die weiterführenden Laborprüfungen sind nicht Teil des Standardprüfprogramms im Asphaltwasserbau, sollen aber im Rahmen dieses Forschungsvorhabens für eine breitere Interpretationsgrundlage und für ein besseres Verständnis des STA Alterungsprozesses dienen. Die an den Bindemittelproben gemessenen mechanischen (physikalischen) Änderungen der Materialeigenschaften sind auf eine Veränderung der chemischen Zusammensetzung in Abhängigkeit des Alterungszustandes zurückzuführen. Auf dieser Grundlage stellen chemische Analysemethoden eine vielversprechende Ergänzung der Standardprüfverfahren dar.

4.1. Bestimmung der chemischen Bestandteile der Bindemittel (B520 und B533) mittels FTIR-ATR

Im Zuge dieser Arbeit wurde die Fourier-Transformations-Spektroskopie (FTIR-ATR) mit abgeschwächter Totalreflexion auf ihre Tauglichkeit zur Bestimmung der chemischen Veränderungen im Alterungsprozess der Bindemittelproben getestet. Die FTIR-ATR Spektroskopie stellt aufgrund ihrer einfachen Durchführung und des geringen Zeitaufwands für die Messung eine sehr vielversprechende Ergänzung zu den mechanischen Materialprüfungen dar. Die Problematik des Verfahrens ist, dass sich lediglich funktionelle Gruppen der Verbindungen feststellen lassen. Das Bitumen, welches modifiziert oder unmodifiziert im Dichtungsbau eingesetzt wird, ist ein Rückstand der Vakuumdestillation im Raffinerie Prozess von Erdöl und liegt als Stoffgemisch mit einer Fülle von funktionellen Gruppen vor. Aus diesem Grund ist es möglich, dass gewisse alterungsbedingte chemische Veränderungen maskiert werden und daher sehr schwer bzw. gar nicht identifizierbar sind. Das eingesetzte Polymer SBS wurde in beiden Bindemitteln (B520 und B533) mittels Spektroskopie nachgewiesen. In Tabelle 4.6 ist zu erkennen, dass das im TPA Labor in Köln getestete PmB eine starke Streuung der mechanischen Kennwerte im ungealterten Zustand (A) aufweist. Es konnten aufgrund der mechanischen Prüfungen drei Herstellungschargen identifiziert werden. Bei den beiden Chargen mit der stärksten mechanischen Ergebnisstreuung wurden jeweils Spektren aufgenommen um eventuelle Unterschiede sichtbar zu machen.

Analysierte Bitumenproben TPA Labor Köln, B520

- B520 (A) Charge 13:30
- B520 (A) Charge 17:10

4.1.1. Interpretation der Spektren B520 (A) Charge 13:30 und B520 (A) Charge 17:10

Die Peaks (1), (2) und (3) zeigen grundsätzlich C-H Vibrationen, häufig -CXH_2 oder -CH_3 (2800-3000 cm^{-1}) mit verschiedenen Anordnungen. (2) könnte auch schwache aromatische oder ungesättigte CH Signale abbilden (normal 3000 bis 3200cm^{-1}) [15]. Der Doppelpeak bei (4) zeigt ein typisches CO_2 Band, bedingt durch Änderungen im Atmosphärendruck und der CO_2 Konzentration. Der Peak in (5) zeigt eine aromatische C=C Bindung (1450 bis 1600cm^{-1}). (6) markiert eine C-O Verbindung, der fehlende Peak bei 1750 cm^{-1} zeigt das Fehlen von C=O Verbindungen an. (7) und (8) identifizieren das Polymer SBS, welches bei (965,82 und 698,25 cm^{-1}) Peaks hervorruft. Mit Hilfe der FTIR ATR Analyse können funktionelle Gruppen nur qualitativ und nicht quantitativ nachgewiesen werden. Es ist jedoch möglich relative Veränderungen in den Peaks zweier Messungen zu vergleichen. Vergleicht man beide Chargen visuell zeigt sich eine starke Ähnlichkeit. In (1),(2),(5) und (8) zeigen sich jedoch relative Abweichungen, welche mit der Ergebnisstreuung in den mechanischen Prüfungen zusammen hängen könnten. Um eine genauere Analyse bzw. die Leistungsfähigkeit der FTIR-ATR Spektroskopie zu bestimmen wurden weitere umfangreiche Analysen durchgeführt (siehe Abschnitt 4.1.2).

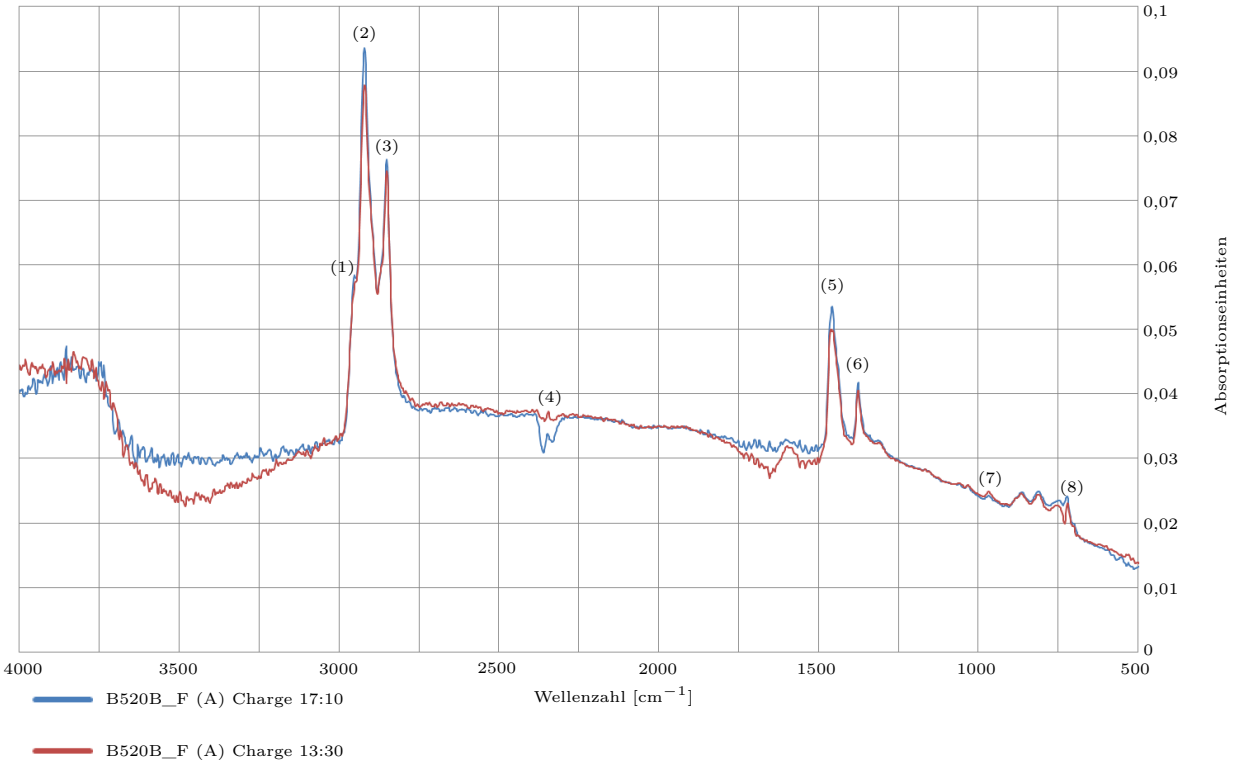


Abbildung 4.1.: FTIR-ATR, B520 (A), Charge 13:30 und 17:10

4.1.2. Untersuchungen zur Eignung der FTIR-ATR Spektroskopie in Bezug auf die Beschreibung des Alterungszustandes von Bitumen[1]

Die Spektren der diversen Alterungsstufen des B533 sind in Abbildung 4.2 grafisch dargestellt. Alle aufgenommenen Spektren weisen eine sehr hohe Ähnlichkeit über den gesamten Messbereich (0 - 4000 cm^{-1}) auf. Für eine Visualisierung und Bestimmung der Abweichungen aufgrund des Alterungszustandes in den gemessenen Spektren wurden diverse Auswertungstools und Verfahren angewandt und durchgeführt (siehe Abschnitt 4.1.2.1, 4.1.2.2, 4.1.2.3 und 4.1.2.4).

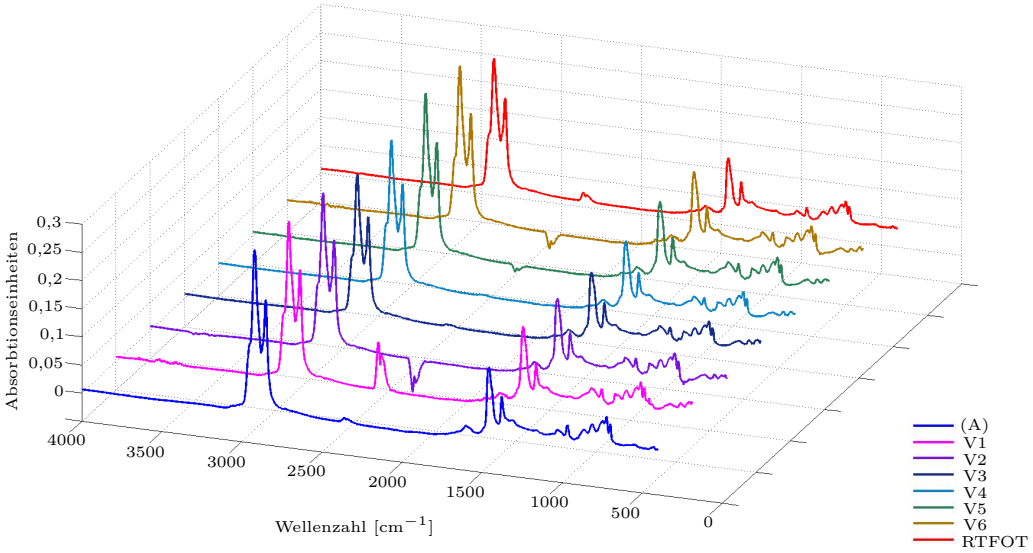


Abbildung 4.2.: FTIR-ATR Spektroskopie B533: (A), V1-V6, RTFOT

Analysierte Bitumenproben TU Wien (B533):

- B533 (A)
- B533 V1
- B533 V2
- B533 V3
- B533 V4
- B533 V5
- B533 V6
- B533 Roling Thin Film Oven Test (LRTF)

[1]Die Untersuchungen, Auswertungen und Interpretationen wurden in Kooperation mit der Universität Wien, Institut für Physikalische Chemie durchgeführt.

4.1.2.1. Cluster-Analyse

Für die Bestimmung der Kurzzeitalterung mittels FTIR-ATR ist eine messbare Abweichung der Spektren in den Alterungszuständen essentiell. Um die Möglichkeit der Auftrennung der Alterungsstufen (A), V3 und V6 zu beweisen wurde eine Cluster-Analyse durchgeführt. Die Versuche V3 und V6 wurden gewählt, da diese aufgrund der Versuchsparameter mit hoher Wahrscheinlichkeit die stärksten Abweichungen im zugehörigen Versuchsablauf zum ungealterten Bindemittel (A) aufweisen. Für eine Überprüfung der gewählten Methode, wurden von jeweils 26 gemessenen Spektren pro Alterungszustand, 3 pro Probe ausgewählt und die automatische Einordnung in die vorhandene Cluster-Struktur über einen Cluster-Test überprüft.

Funktionsweise der Cluster Analyse
Die Cluster-Analyse ermöglicht die Zusammenfassung aller Eigenschaften eines Spektrums in einem Punkt. Dabei wird für jede aufgenommene Wellenlänge im Spektrum eine neue Dimension aufgespannt. Die der Wellenzahl zugehörige Absorbanz entspricht dem Wert der jeweiligen Dimension. Der dadurch erhaltene Punkt im n-dimensionalen Raum enthält somit anteilig alle dem Spektrum zugehörigen Absorbanzen. Die Punkte für jedes einzelne Spektrum können anschließend miteinander über ihre Heterogenität, also den Abstand zwischen den beiden Punkten im aufgespannten Raum verglichen werden. Je geringer die Unterschiede von Spektren sind, desto näher liegen die entsprechenden Punkte im n-dimensionalen Raum zusammen. Benachbarte Punkte im Raum werden mit Hilfe eines Algorithmus zu Clustern zusammengefasst. Aufgenommene Spektren, welche von Proben aus dem gleichen Alterungszustand stammen, müssen somit in den gleichen Cluster eingeordnet werden können. Die Probenvorbereitung (Auftrag Bitumenprobe auf Kristall) kann die gemessene Absorbanz und somit das Ergebnis der Cluster-Analyse verfälschen. Mit Hilfe einer Vektornormalisation wurde der Einfluss des Probenauftrages egalisiert. Das Ergebnis der Analyse wird in einem Dendrogramm, in dem die einzelnen Clusterbildungen durch ihre Heterogenität unterschieden werden können, aufgetragen (siehe Abbildung 4.3).

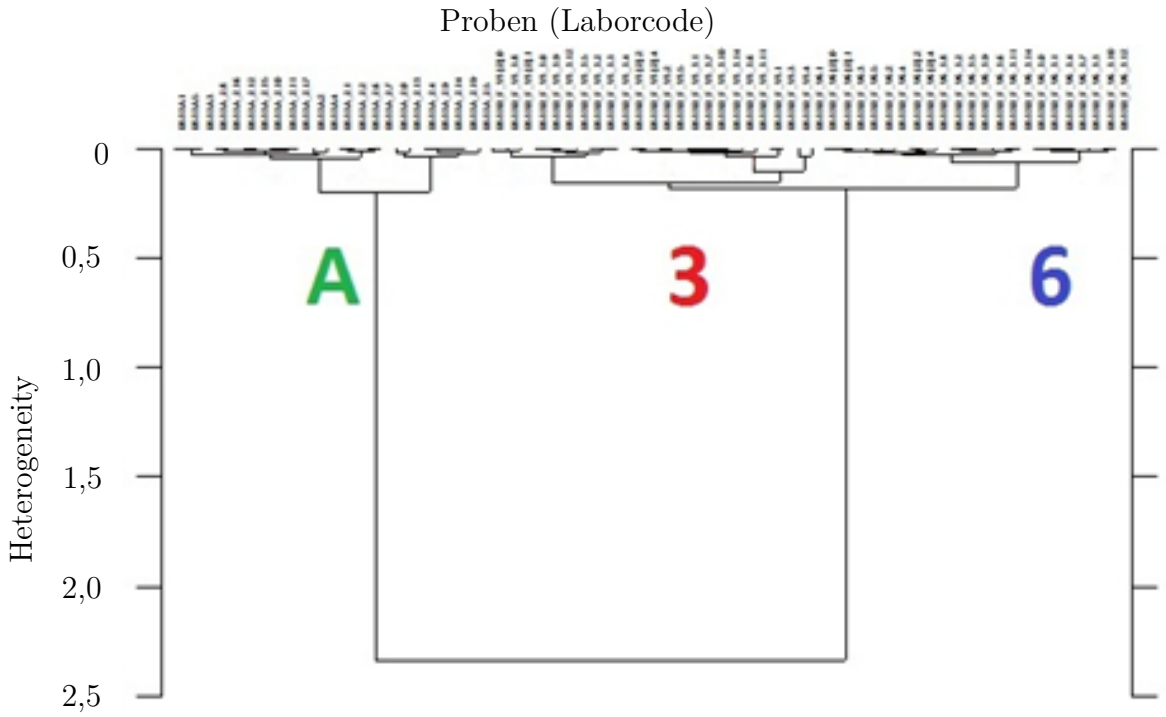


Abbildung 4.3.: Dendrogramm Probe A, V3 und V6

Abbildung 4.3 zeigt die Trennung der Spektren in drei Hauptcluster. Die Aufspaltung zwischen Cluster A, Cluster 3 und 6 erfolgt mit einer höheren Heterogenität, dies weist auf eine stärkere Abweichung in den Spektren hin. Die ausgewerteten Spektren für das ungealterte Bitumen (A) wurden alle in Cluster A eingeordnet (Abbildung 4.4). In Cluster 3 wurden alle Spektren des Versuchs 3 eingeordnet, jedoch wurde zusätzlich ein Spektrum des Versuchs 6 in einem Untercluster eingeordnet, dieses Spektrum ist als Ausreißer zu sehen (Abbildung 4.5). Die verbliebenen Spektren von Versuch 6 wurden alle in Cluster 6 eingeordnet (Abbildung 4.6).

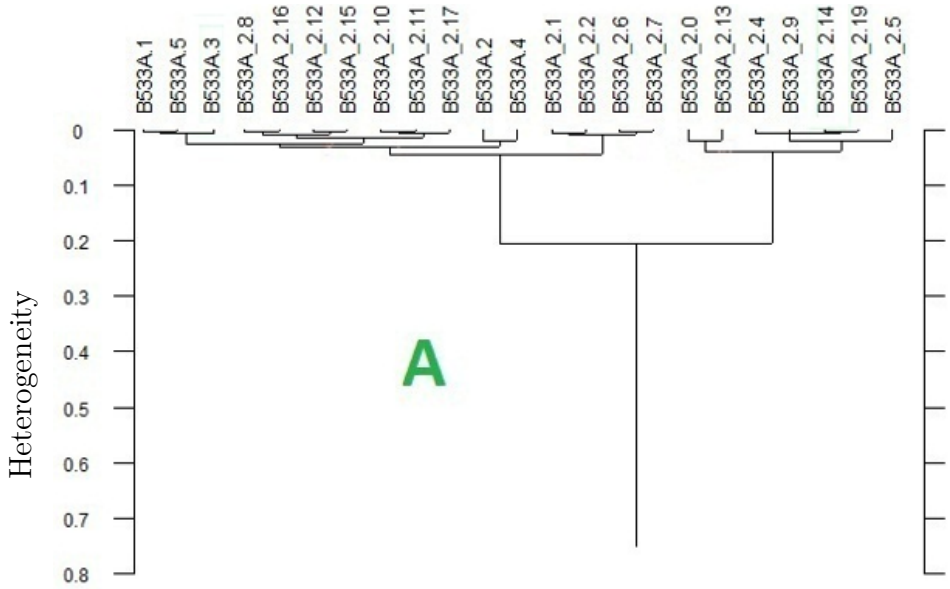


Abbildung 4.4.: Vergrößerung Cluster A

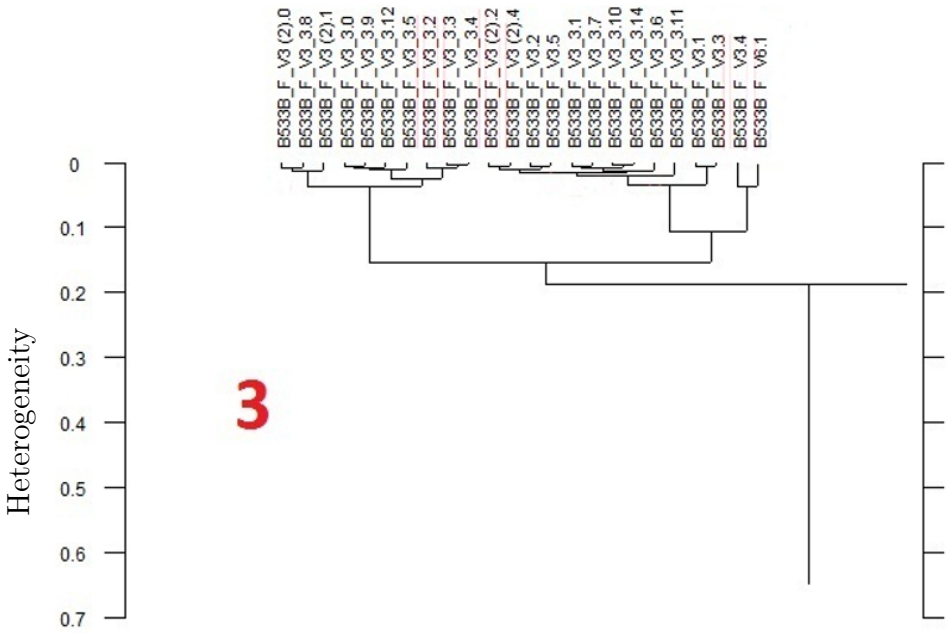


Abbildung 4.5.: Vergrößerung Cluster 3

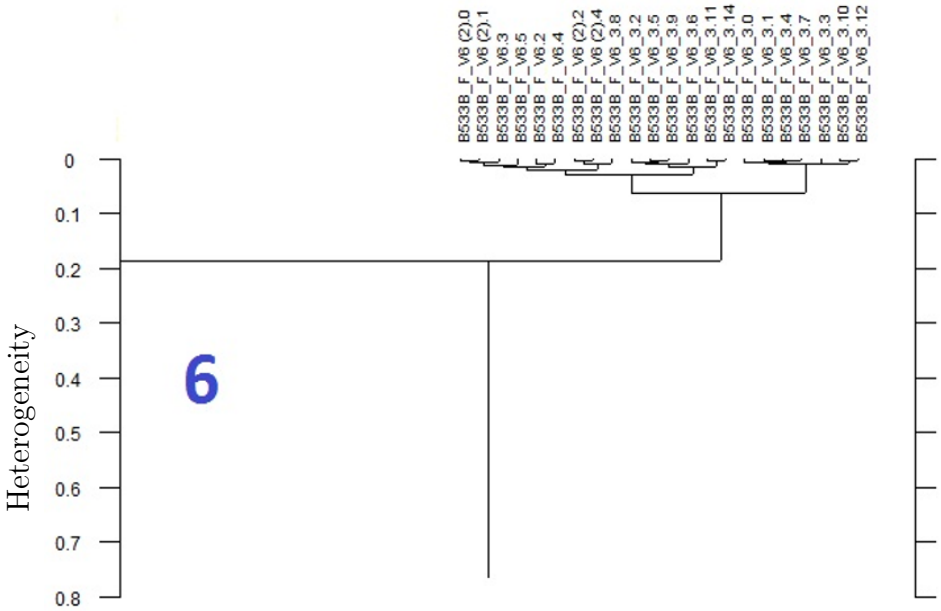


Abbildung 4.6.: Vergrößerung Cluster 6

Die Cluster-Analyse wurde mit Hilfe von weiteren gemessenen Spektren einem Cluster-Test unterzogen. Die rückgetesteten Proben wurden alle zu Spektren der gleichen Probe zugeordnet, somit konnte die Funktionalität der Analyse bestätigt werden (Tabelle 4.1).

Tabelle 4.1.: Cluster-Test eigene Messung

Probe	nächstes Referenzspektrum	Probe	nächstes Referenzspektrum	Probe	nächstes Referenzspektrum
A.0	A.3	V3.0	V3.4	V6.0	V6.4
A_2.3	A_2.14	V3_2.3	V3_3.2	V6_2.3	V6.4
A_2.18	A_2.11	V3_3.13	V3_2.2	V6_3.13	V6_3.7

Die Voraussetzung für die Peak-Analyse wurde durch die erfolgreiche Zuordnung der Probenspektren in die zugehörigen Cluster erfüllt.

4.1.2.2. Peak-Analyse

Die aufgenommenen Spektren der Bitumenproben weisen geringe Unterschiede über den Messbereich auf, wobei die markantesten Abweichungen der Absorbanzen im Bereich von 800 bis 1200 cm^{-1} zwischen den Proben (A) und V3/V6 auftreten (siehe Abbildung 4.8). Für die Peak-Analyse wurden vielversprechende Banden ausgewählt und ausgewertet (siehe Abbildung 4.7).

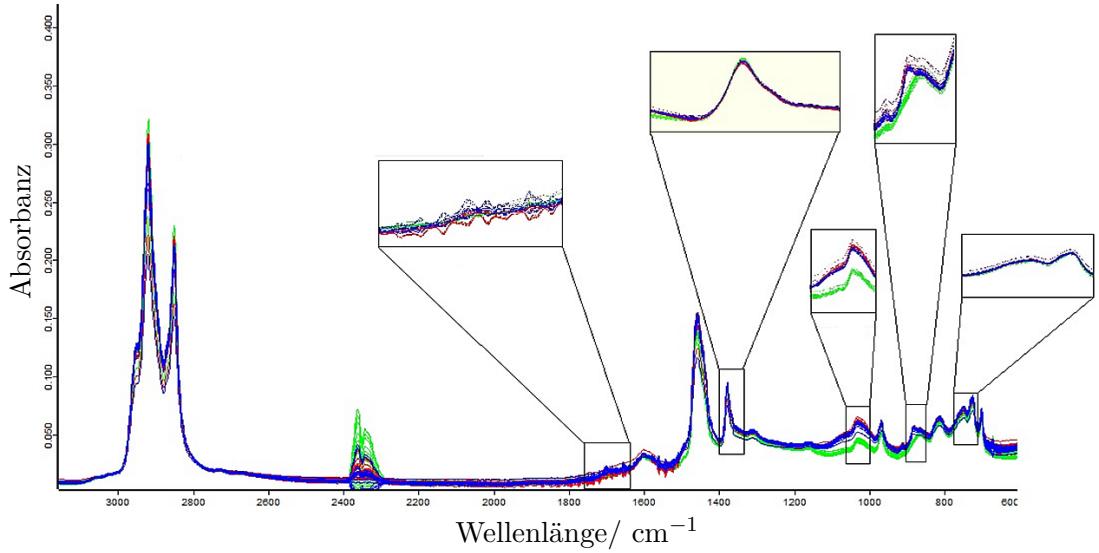


Abbildung 4.7.: IR-Spektrum Analysebereiche

Die unmittelbar vor 2400 cm^{-1} auftretenden Peaks in Abbildung 4.7 bilden Messfehler aufgrund von CO_2 in der Prüfkammer ab und werden daher vernachlässigt.

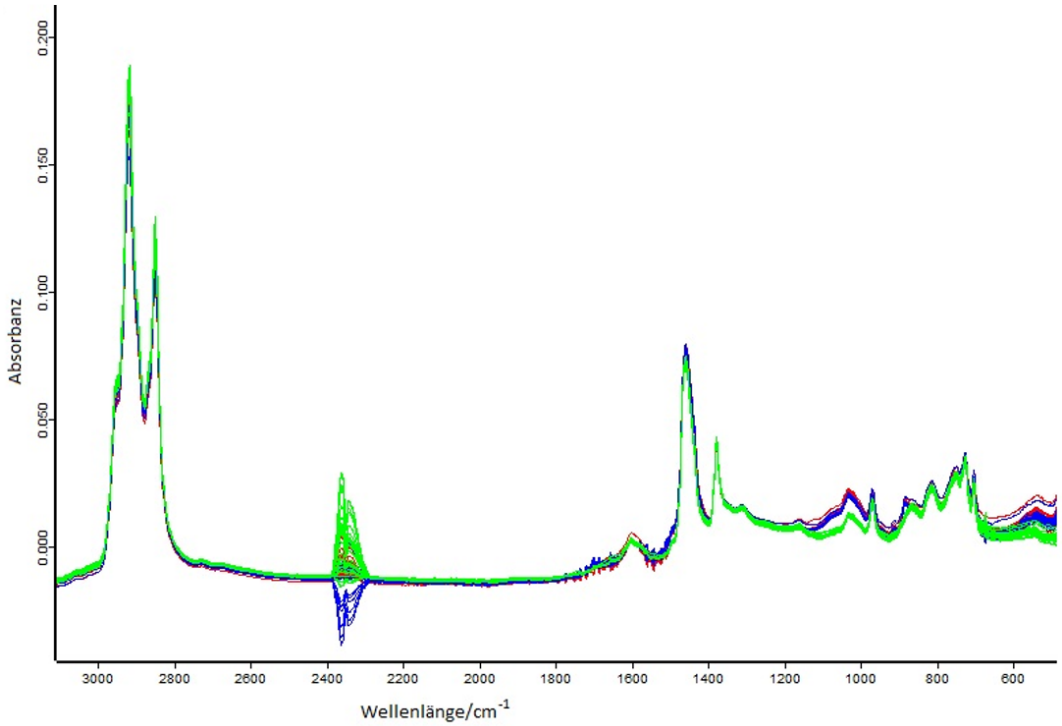


Abbildung 4.8.: IR-Spektrum Probe A (grün) Probe V3 (rot) Probe V6 (blau)

Eine Veränderung der Bande zwischen Alterungszustand (A) und V3/V6 wurde visuell bei 880 cm^{-1} identifiziert. Dies lässt auf eine lokale Abänderung des Spektrums durch Alterungsvorgänge in diesem Bereich schließen. Für eine mögliche Quantifizierung der Alterungszustände über den Peak bei 880 cm^{-1} wurde eine Integration über die Funktion durchgeführt.

Tabelle 4.2.: Integralflächen der Bande bei 880 cm^{-1}

Probe	A	σ
A	0,0028	0,0007
V3	0,026	0,002
V6	0,024	0,001

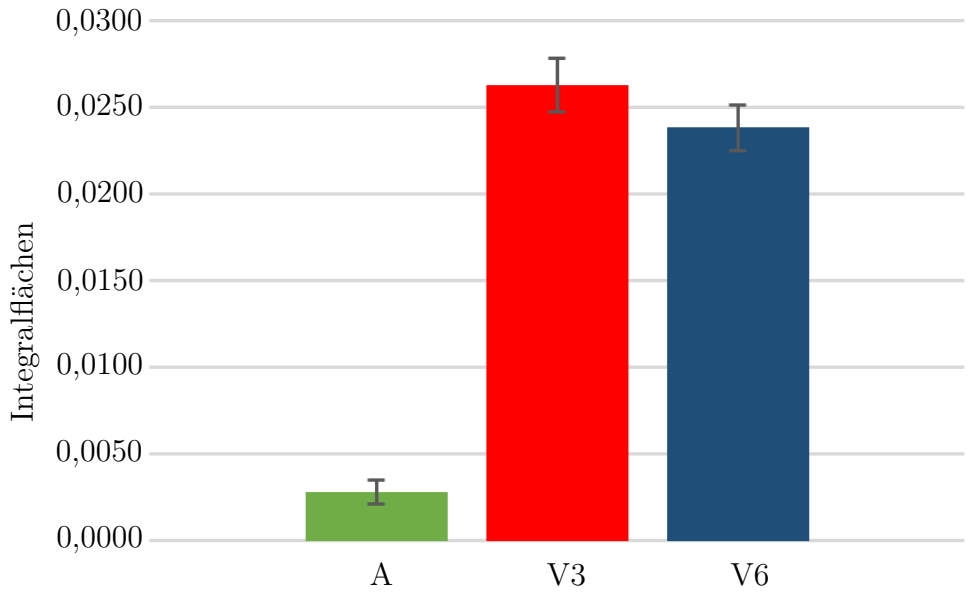


Abbildung 4.9.: Vergleich der Integralflächen der Bande (Peak) bei 880 cm^{-1}

Die Änderung der Integralflächen unter der Peakfunktion bei 880 cm^{-1} ist von (A) zu V3 höher als zu V6. Dies entspricht nicht der Erwartungshaltung, da aufgrund der höheren Starttemperatur V6 stärker als V3 gealtert sein müsste (vergleiche mechanische Kennwerte, PEN und DSR). Somit ist eine Quantifizierung über diese Bande ungeeignet.

4.1.2.3. CH_2/CH_3 Verhältnis

Bei der Alterung von Bitumen treten neben der allgemeinen Oxidation Vernetzungsreaktionen auf, welche den Anteil der Aromaten verringern und den der Harze und Asphaltene erhöhen. Die Veränderung in der Zusammensetzung wird über das CH_2/CH_3 Verhältnis beschrieben, daher wurde eine Auswertung zu diesem Verhältnis durchgeführt. Grundlage für die Auswertung ist, dass sich bei einer Verlängerung von Kohlenstoffketten das Verhältnis von CH_2 Gruppen innerhalb der Moleküle zu dem endständiger CH_3 Gruppen vergrößert. Zur Auswertung des Verhältnisses eignen sich mehrere Banden

- Bereich zwischen 2800 bis 3000 cm^{-1}
- Bereich um 1375 cm^{-1}
- Bereich um 720 cm^{-1}.

Für die Auswertung der δCH_3-Schwingung (symmetrischen Scherschwingung der CH_3 Gruppe) wurde die Bande bei 1375 cm^{-1} und für die CH_2 (rocking Schwingung) die Bande bei 720 cm^{-1} gewählt. Für eine genaue Auswertung wurde aufgrund der Überlagerung von anderen Banden ein Curve-Fitting durchgeführt (*Curve-Fitting: Berechnung von Banden, deren Summe dem Verlauf des gefitteten Bereiches entspricht*). Aus dem Curve-Fitting über den Bereich 1360 bis 1390 cm^{-1} ergaben sich zwei mögliche Banden für die δsCH_3 Schwingung bei bei 1376 cm^{-1} und 1364 cm^{-1}. Für die ρCH_2 Schwingung bei 720 cm^{-1} wurde ein Fit von 1745 cm^{-1} bis 710 cm^{-1} durchgeführt. Dieser Fit lieferte 5 Banden, wobei eine genau bei 720 cm^{-1} lag. Diese wurde integriert und zur Bildung des Verhältnisses herangezogen.

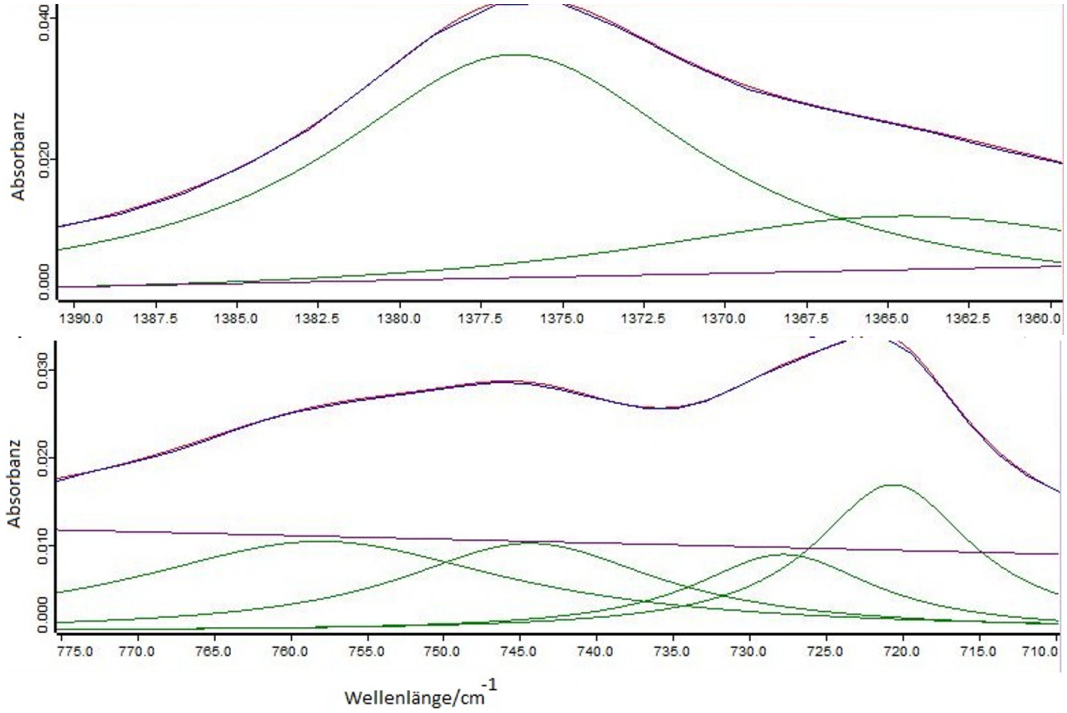


Abbildung 4.10.: Curve Fit Bereich von 775-710 cm^{-1}

Abbildung 4.11 zeigt die Integralflächen der gefitteten Banden für die δCH_3 und ρCH_2 Schwingungen sowie das daraus gebildete CH_2/CH_3 Verhältnis der Proben A, V3 und V6. Die δCH_3 Schwingungen zeigen eine Verringerung der Integralflächen von (A) zu V3 und V6. Die Flächen der ρCH_2 Schwingung verhalten sich gegenläufig und nehmen von (A) über V3 zu V6 zu. Die Verläufe der Integralflächen in Abbildung 4.11 decken sich mit der Annahme, dass V6 im Vergleich zu V3 durch die höhere Starttemperatur im Versuch stärker gealtert ist. Durch die Zunahme des Verhältnisses CH_2/CH_3 von Probe (A) über V3 zu V6 ist eine Quantifizierung der Kurzzeitalterung mit Hilfe des CH_2/CH_3-Verhältnisses möglich.

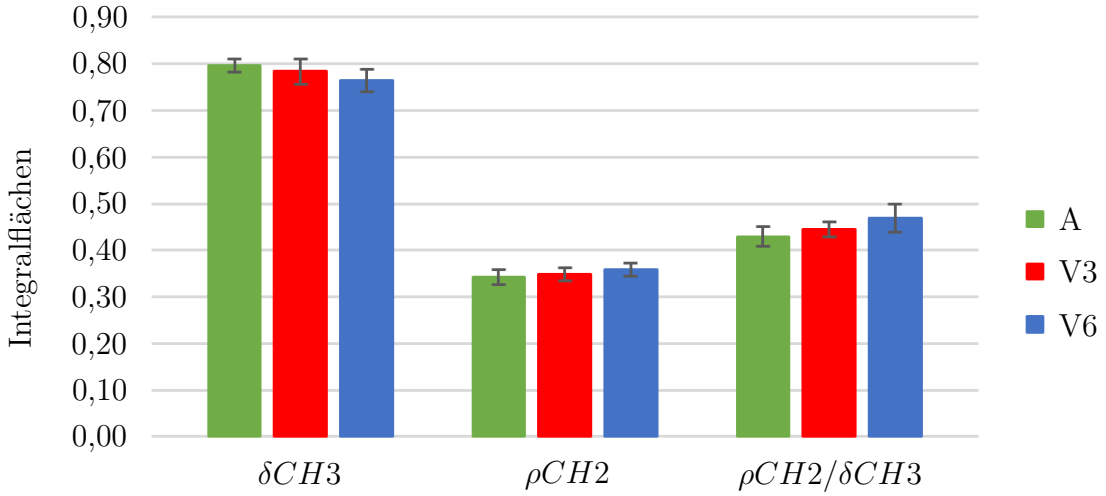


Abbildung 4.11.: Integralflächen δCH_3, CH_2 und $\rho CH_2/\ \delta CH_3$

Tabelle 4.3.: Integralflächen von δCH_3, ρCH_2 und $\rho CH_2/\ \delta CH_3$

Probe	$A_{\delta CH3}$	σ	$A_{\rho CH2}$	σ	$A_{\rho CH2}/A_{\delta CH3}$	σ
A	0,80	0,01	0,34	0,01	0,43	0,02
V3	0,78	0,02	0,35	0,01	0,44	0,01
V6	0,76	0,02	0,36	0,01	0,47	0,03

4.1.2.4. Sulphoxid- und Carbonyl- Banden

Die Alterung von Bitumen basiert hauptsächlich auf Oxidationsvorgängen, wobei die Sulphoxid- und Carbonylbildung in den Vordergrund tritt. Der Vorgang des Alterungsprozesses lässt sich über die Banden bei 1030 cm^{-1} (Sulphoxidbildung) und bei 1700 cm^{-1} (Carbonylbildung) abbilden.

Sulphoxid

Nach einem Curve-Fitting über den Bereich von 985 cm^{-1} bis 1045 cm^{-1} wurden die zwei Sulphoxidbanden bei 1013 cm^{-1} und 1031 cm^{-1} (siehe Abbildung 4.12) ausgewertet. Die Integralflächen stiegen vom (A) zu V3 und zu V6 an.

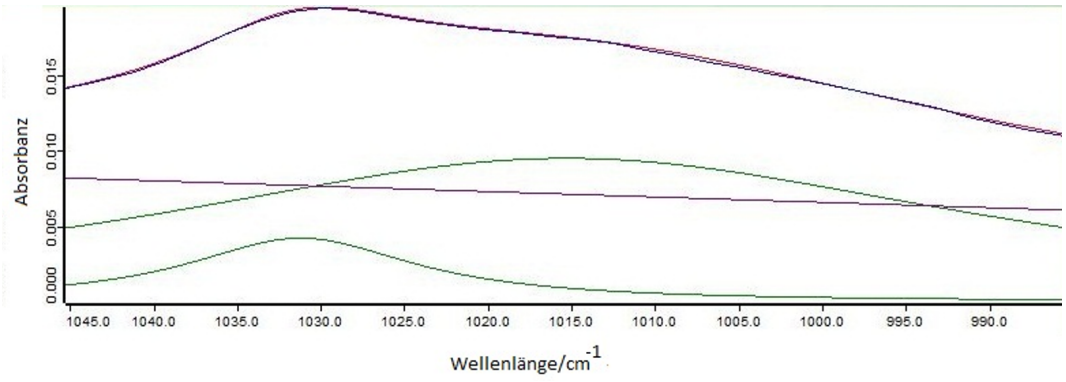


Abbildung 4.12.: Curve Fit Bereich von 1045-985 cm^{-1}

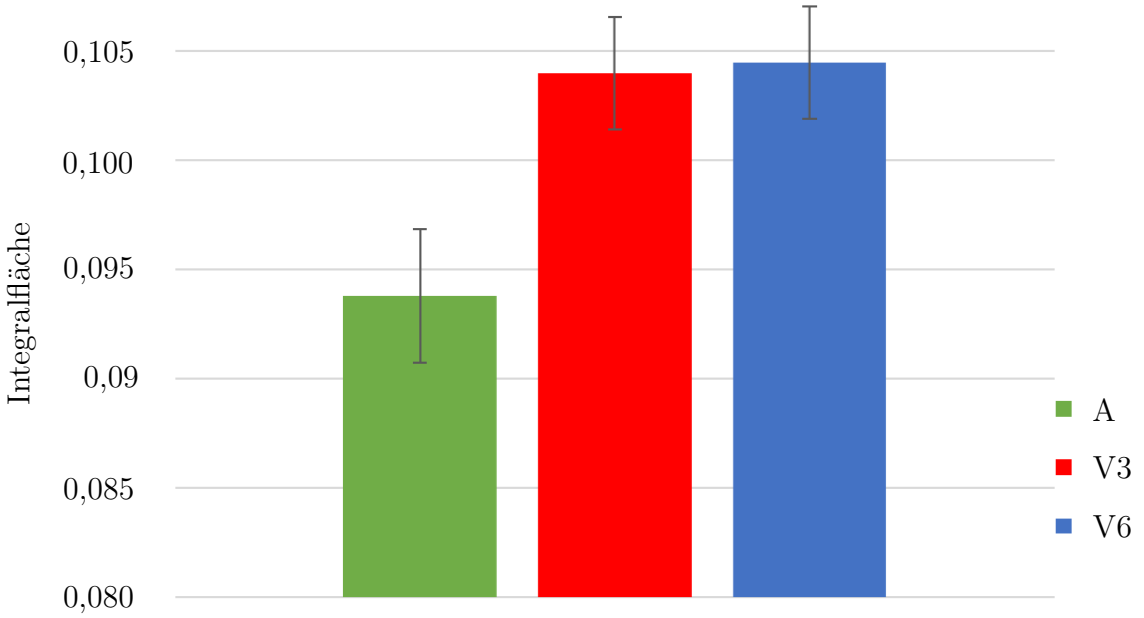


Abbildung 4.13.: Integralflächen der Sulphoxid Bande, Sulphoxid 1031 cm^{-1}

Die Oxidation zu Sulphoxiden ist ein ausschlaggebender Faktor in der Alterung von Bitumen. Aufgrund der vielversprechenden Ergebnisse für V3 und V6 wurde die Auswertung für beide Versuchsreihen (V1-V3 und V4-V6) durchgeführt (Abbildung 4.14).

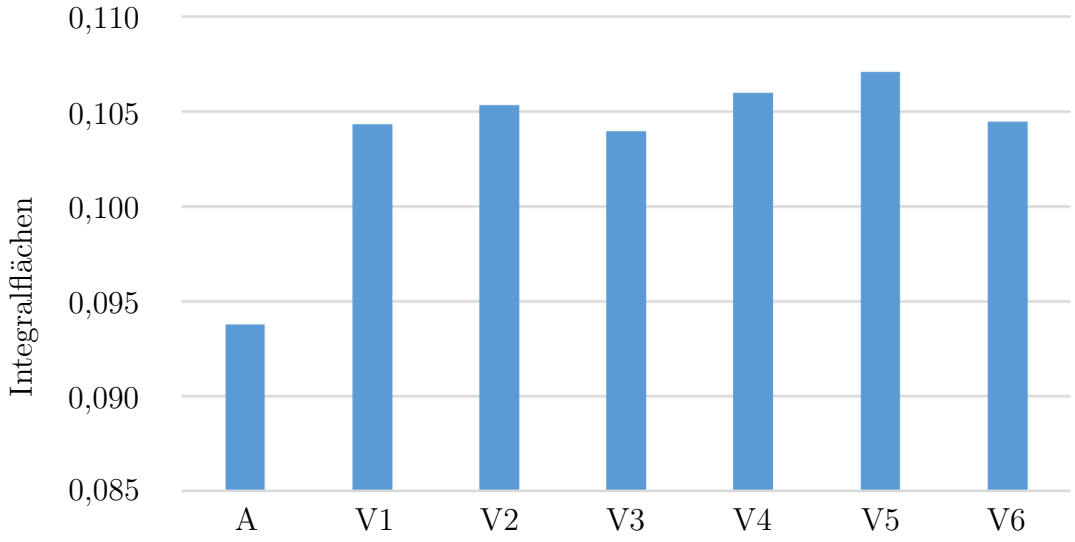


Abbildung 4.14.: Integralflächen von A und V1-V6, Sulphoxid 1031 cm^{-1}

Im Vergleich der Integralflächen, lässt sich kein Trend in deren Zunahme gemäß der Erwartungshaltung feststellen. Deshalb ist die Auswertung der Sulphoxid Banden für die Bestimmung der Kurzzeitalterung von PmB nicht geeignet.

Tabelle 4.4.: Integralflächen Sulphoxid Bande Probe A und V1-V6

Probe	A_{SO}	σ
A	0,094	0,003
V1	0,104	0,002
V2	0,105	0,003
V3	0,104	0,002
V4	0,106	0,001
V5	0,107	0,002
V6	0,104	0,002

Carbonyl-Band

Die Überlagerung der Carbonylbande mit dem Wasserdampfspektrum bei 1700 cm^{-1} erschwerte die Auswertung (Abbildung 4.8). Zur Kompensation der Überlagerung wurde ein aufgenommenes Wasserdampfspektrum von den Spektren der Probe A, V3 und V6 subtrahiert (Abbildung 4.15 und 4.16).

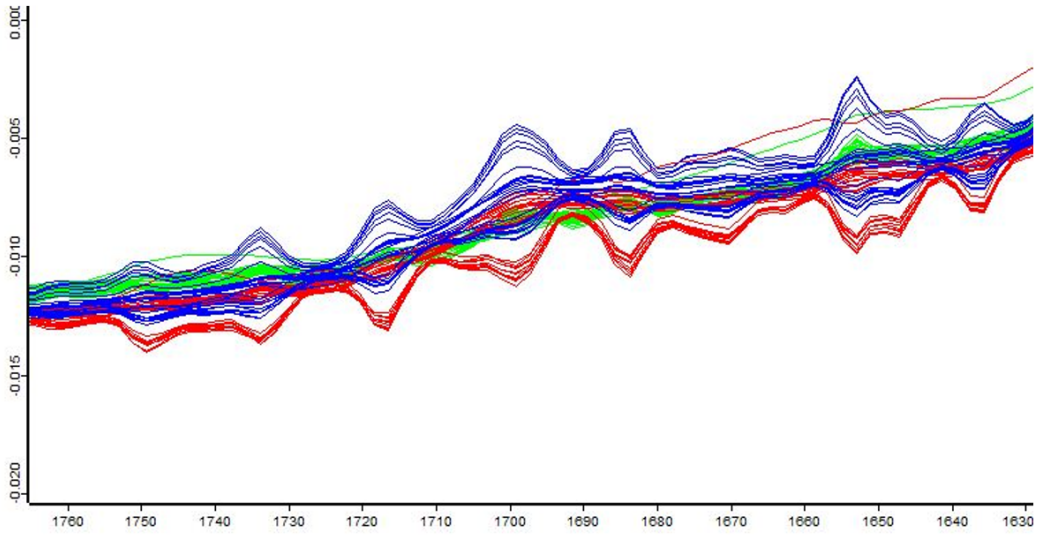


Abbildung 4.15.: Carbonyl - Peak vor H_2O Subtraktion

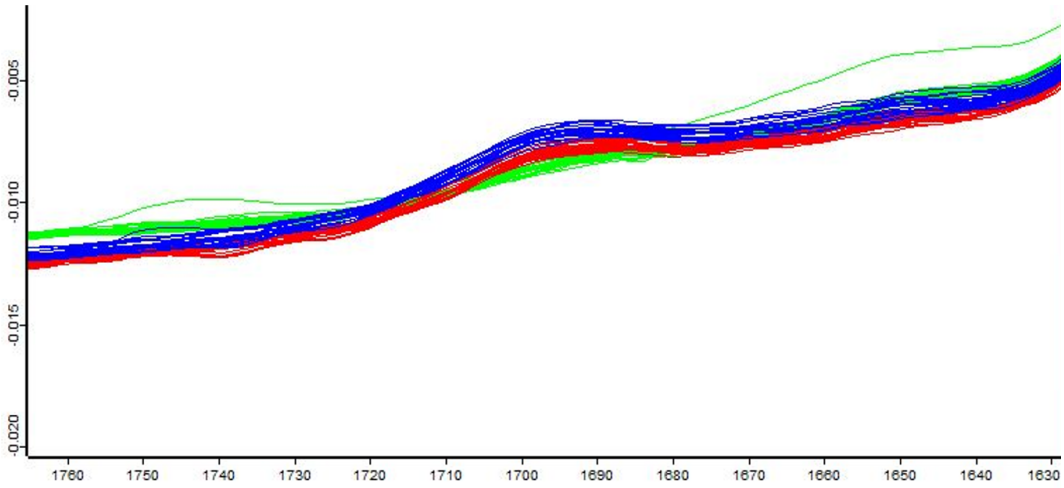


Abbildung 4.16.: Carbonyl - Peak nach H_2O Subtraktion

Die freigelegten Banden im Bereich von 1690 cm^{-1} bis 1710 cm^{-1} wurden nach der Integration für die Proben A, V3 und V6 jeweils gemittelt und abgeglichen. Dabei lies sich konform der Erwartungshaltung ein Anstieg der Integralflächen von Probe A über V3 zu V6 beobachten. Aus diesem Grund wurden die Daten beider Versuchsreihen (V1-V3 und V4-V6) ausgewertet (Abbildung 4.17).

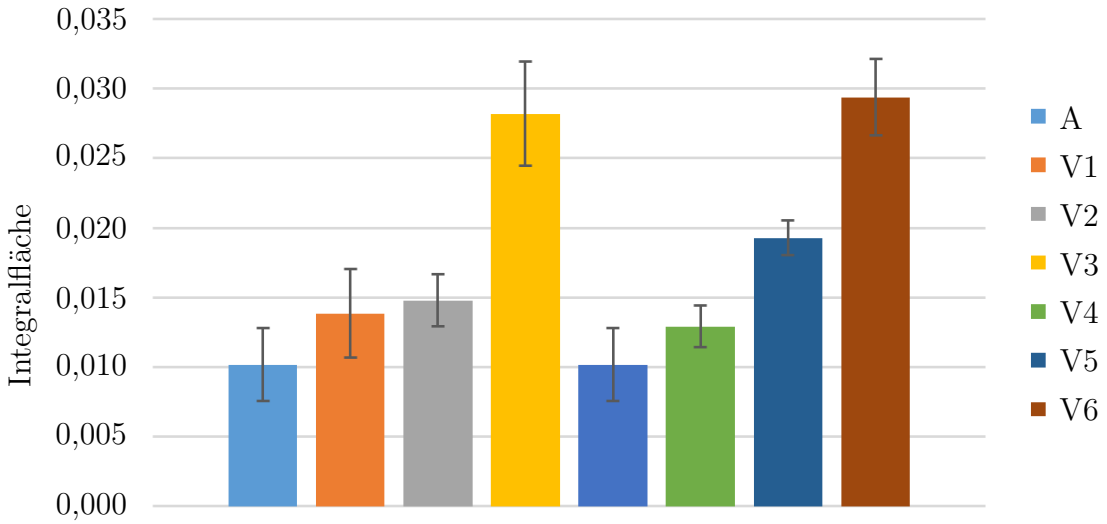


Abbildung 4.17.: Integralfläche C=O, Probe A und V1-V6

Tabelle 4.5.: Integralflächen C=O Bande Probe A und V1-V6

Probe	A_{CO}	σ
A	0,010	0,002
V1	0,014	0,003
V2	0,015	0,001
V3	0,028	0,003
V4	0,013	0,001
V5	0,019	0,001
V6	0,029	0,002

Es lässt sich jeweils ein Trend innerhalb der Versuchsreihen beobachten, bei welchem die Integralflächen, sprich der Carbonylanteil, von V1-V3 und V4-V6 ansteigt. In den weniger lang gealterten Proben (V1/V2 und V4/V5) liegen die Unterschiede der Integralflächen jedoch innerhalb der Standardabweichung des Mittelwerts weshalb für genauere Betrachtungen eine statistische Auswertung nötig ist.

4.1.3. Schlussfolgerungen zur Eignung der FTIR-ATR Spektroskopie

Diese Analyseform stellt eine vielversprechende leistungsfähige Ergänzung zu den vorhandenen Prüfungen dar und ist Gegenstand weiterer Untersuchungen.

- Die Beschaffenheit des Bitumens als Stoffgemisch erschwert die FTIR-ATR Spektroskopie
- Eine Bestimmung des Alterungszustandes über das CH_2/CH_3 Verhältnis ist denkbar
- Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen wurde festgestellt, dass die einzige Möglichkeit für eine aussagekräftige Bestimmung der Alterung die Auswertung der Carbonylbande bei 1700 cm^{-1} darstellt

4.2. Bestimmung der Polymerverteilung und Struktur

Tabelle 3.16 zeigt in Abhängigkeit der Herstellungschargen des Bindemittels B520 (A) unterschiedliche Ausgangswerte bei den mechanischen Kennwerten R&K, PEN und Ela.R. Der Grund für diese Problematik ist die Herstellung des Bindemittels im Labor mittels Labormischer (mengenmäßig begrenzte Kapazität - schlechte Homogenisierung). Die angeforderte Menge an PmB 45/80-65 wurde in drei Chargen produziert

1. B520 (A) Charge 13:30 Uhr
2. B520 (A) Charge 17:10 Uhr
3. B520 (A) Charge 18:35 Uhr.

Die Produktion des PmBs erfolgte offensichtlich nicht mit ausreichender Genauigkeit hinsichtlich Zusammensetzung (Polymer, Vernetzer etc.) und Homogenisierung (Mischzeiten etc.). Durch diesen Umstand lässt sich die Streuung in den gemessenen Ausgangswerten (A) erklären. Da in dieser Arbeit Relativwerte der Veränderungen hinsichtlich der Alterung bestimmt wurden, konnte das Bindemittel trotzdem für die Prüfungen eingesetzt werden. Voraussetzung war eine Zuordnung der Messwerte zu den Herstellungschargen (siehe Tabelle 4.6). Aus diesem Sachverhalt wird die Bedeutung von weiterführenden Untersuchungen für wissenschaftliche Zwecke wie Fluoreszenzmikroskopien und FTIR - ATR Spektroskopien ersichtlich.

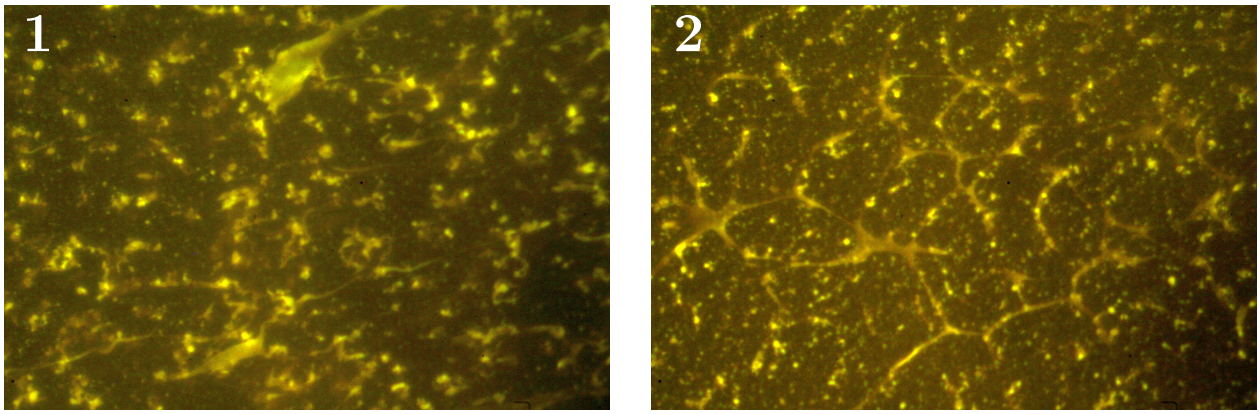
4.2.1. Untersuchung der Polymerverteilung mittels Fluoreszenzmikroskopie

Die Bestimmung der Polymerverteilung wurde nach ÖNORM EN 13632 15-07-2010 durchgeführt. Folgende Bilder wurden mittels eines Auflichtfluoreszenzmikroskops mit 200 facher Vergrößerung aufgenommen. Bei den Aufnahmen erscheint das Ausgangsbindemittel dunkel (braun, schwarz) und das Polymer gelblich. Um den hohen Polymergehalt sowie die Inhomogenitäten der Proben von B520 sichtbar zu machen, ist zum Vergleich in Abbildung 4.21 ein homogenes Shell PmB 25/55-55 mit geringem Polymeranteil (SBS) abgebildet.

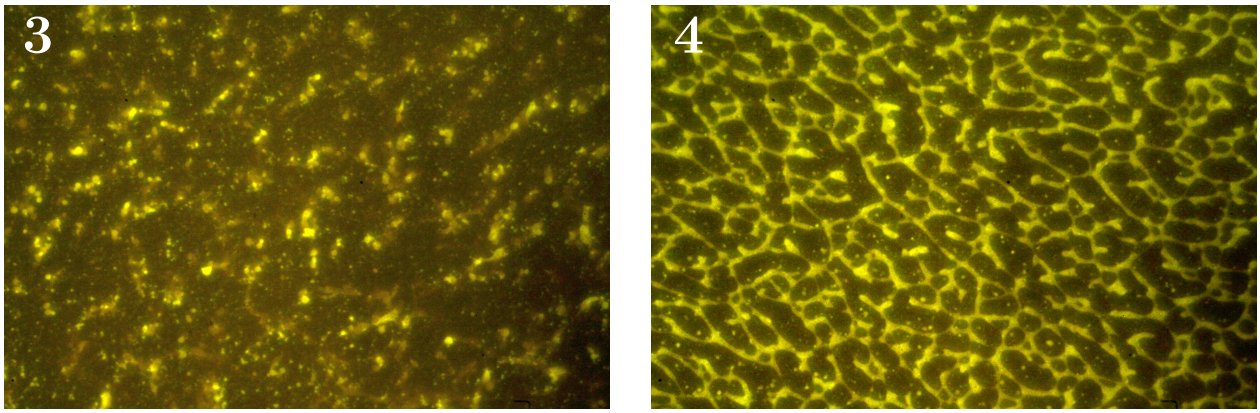
> *Es sollte beachtet werden, dass die Fluoreszenzmikroskopie keine endgültige Qualitätsbewertung gestattet und auch keine Angaben zu den Gebrauchseigenschaften des Bindemittels ermöglicht. Sie liefert jedoch Informationen, die wichtig sind, um das System und die Parameter zu verstehen, die einen Einfluss auf die Endqualität haben können.* [56]

Beschreibung der Mikroskopaufnahmen mittels Kennbuchstaben für den Bezeichnungscode laut ÖNORM EN 13632 15-07-2010.

- Kontinuierliche Phase
  - P: Kontinuierliche Polymerphase
  - B: Kontinuierliche Bitumenphase
  - X: Beide Phasen sind kontinuierlich (verschlungene Phasen)
- Beschreibung der Phase
  - H: Homogen
  - I: Inhomogen
- Beschreibung der Größe
  - S: Klein ($< 10\mu m$)
  - M: Mittel ($\geq 10\mu m \leq 100\mu m$)
  - L: Groß ($> 100\mu m$)
- Beschreibung der Form
  - r: Rundlich
  - s: Streifen
  - o: Sonstiges



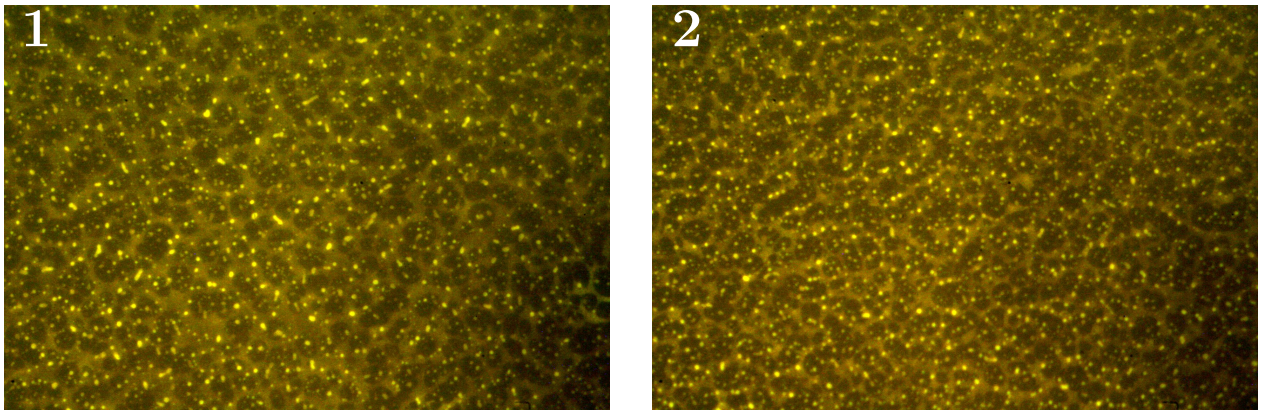
Probe 1 PmB 45/80-65 Produktionszeit 13:30 Uhr



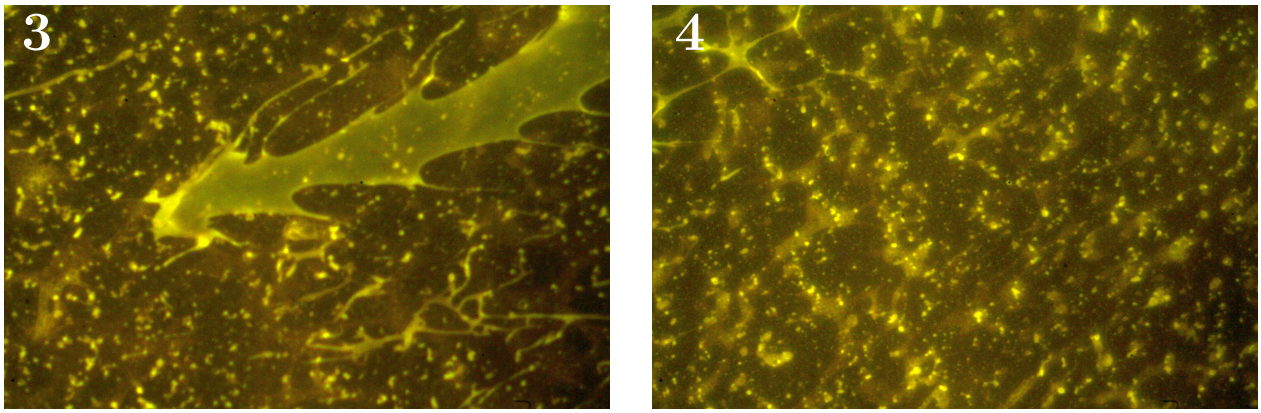
Probe 2 PmB 45/80-65 Produktionszeit 13:30 Uhr

Abbildung 4.18.: Fluoreszenzmikroskopie B520 (A) Charge 13:30 Uhr

- Verteilungscode Bilde 1: B/I/M/o
- Verteilungscode Bilde 2: B/I/S/o
- Verteilungscode Bilde 3: B/I/ML/o
- Verteilungscode Bilde 4: B/H/L/o



Probe 1 PmB 45/80-65 Produktionszeit 17:10 Uhr

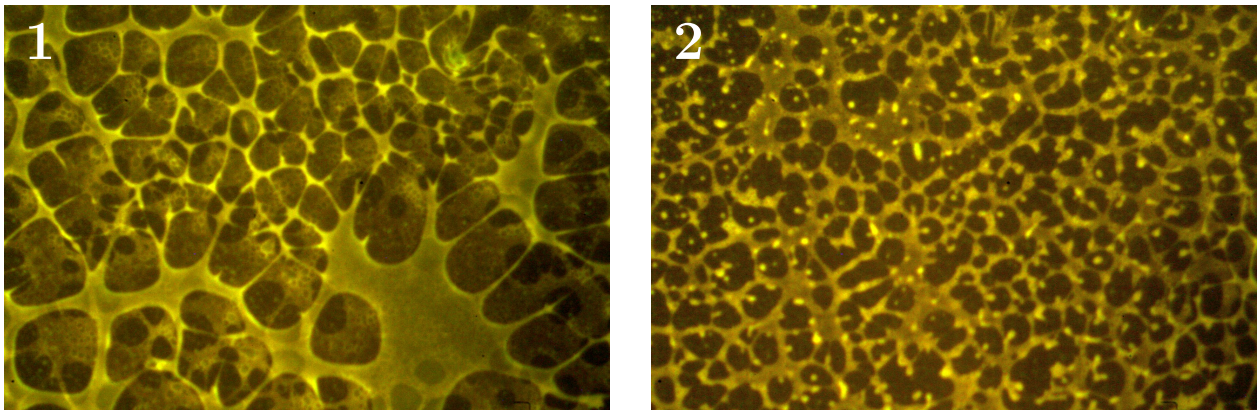


Probe 2 PmB 45/80-65 Produktionszeit 17:10 Uhr

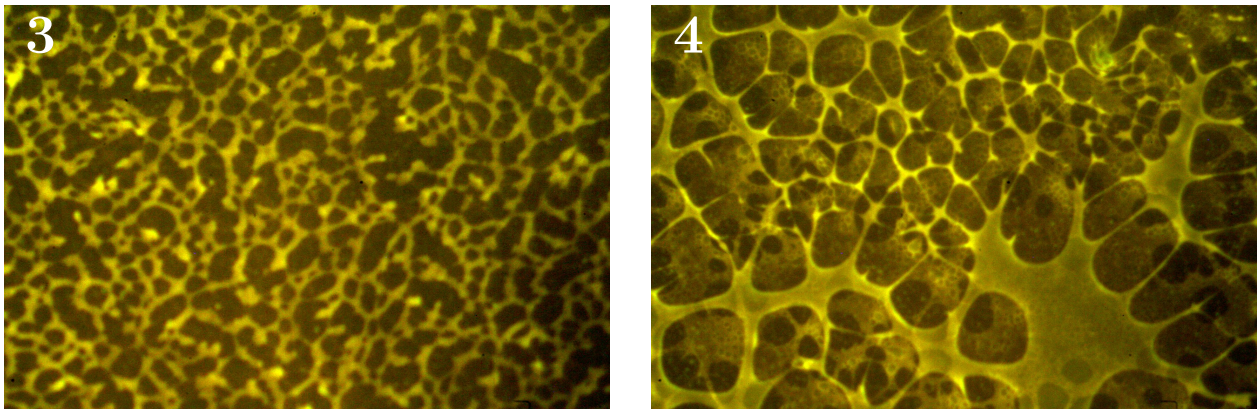
Abbildung 4.19.: Fluoreszenzmikroskopie B520 (A) Charge 17:10 Uhr

- Verteilungscode Bilde 1 und 2: X/H/SL/o
- Verteilungscode Bilde 3 und 4: B/I/L/o

Anmerkung zu Bild 3: Das Polymer, welches den Anschein macht in einem Layer über dem PmB zu sein, ist auf einen Fehler in der Preparation der Probe zurückzuführen.



Probe 1 PmB 45/80-65 Produktionszeit 18:35 Uhr



Probe 2 PmB 45/80-65 Produktionszeit 18:35 Uhr

Abbildung 4.20.: Fluoreszenzmikroskopie B520 (A) Charge 18:35 Uhr

- Verteilungscode Bilde 1: P/I/L/o
- Verteilungscode Bilde 2 und 3: B/I/L/o
- Verteilungscode Bilde 4: P/I/L/o

Für die Betrachtung und Kategorisierung von Bild 1 und 4 der Charge 18:35 wurde der untere Polymerlayer heran gezogen.

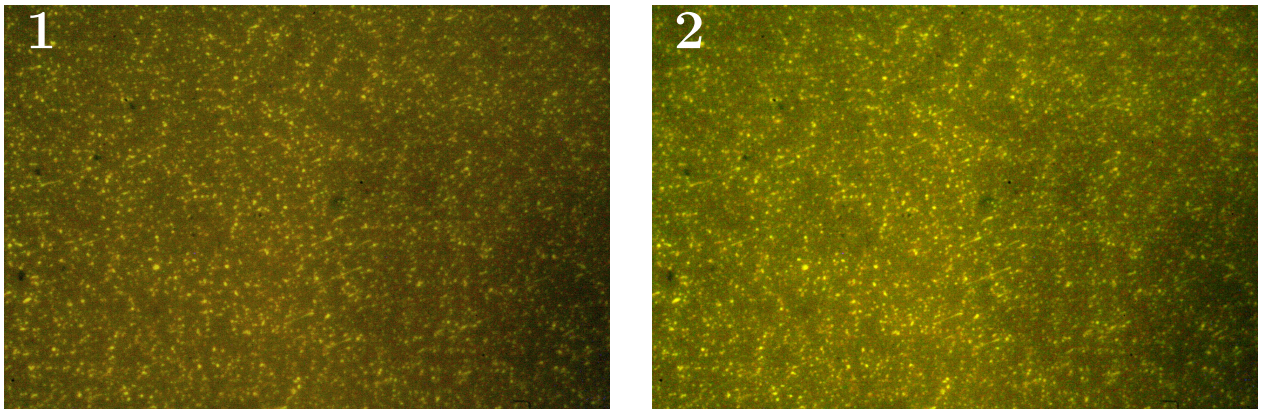


Abbildung 4.21.: Vergleichsprobe Shell PmB 25/55-55 (SBS)

- Verteilungscode Bilde 1 und 2: X/H/S/r

Durch das schwach gelblich leuchtende Licht, welches über die gesamte Probe gleichmäßig verteilt ist, kann das PmB als homogen angesehen werden.

4.2.2. Mögliche Gründe für die Inhomogenitäten des untersuchten PmBs (B520)

Die Modifizierung mittels Polymeren (z.B.: SBS) ist nicht unproblematisch. In der Vergangenheit wurde im Raffineriebetrieb festgestellt, dass es zu einer Agglomeration des Polymers bzw. zu einer Phasentrennung kommt, wenn das Granulat unbehandelt in das Bitumen gerührt wird. Um dies zu vermeiden, muss sehr feines SBS Pulver verwendet werden oder das SBS wird vor der Beimengung in Öl aufgequollen. [43]

4.2.3. Abgleich gemittelte Ergebnisse der physikalischen Untersuchungen des ungealterten PmBs (B520) mit den Mikroskopaufnahmen

Bei einem Vergleich der drei Produktionschargen fällt auf, dass die Homogenität sowie der Gehalt an SBS stark differenziert. Werden die Mikroskopieergebnisse in Relation zu den gemessenen Werten hinsichtlich Ring und Kugel, Penetration und elastischer Rückstellung gesetzt, ergeben sich Parallelitäten. Wie bereits in Abschnitt 4.2.1 beschrieben, können diese Zusammenhänge nicht allein als endgültige Qualitätsbewertung herangezogen werden. Bei den Untersuchungen mittels Nadelpenetration weisen alle drei Chargen beinahe den selben Messwert auf. Die Abweichungen von maximal 1 % sind auf Messungenauigkeiten im Versuchsablauf zurückzuführen. Vergleicht man diese hohe Genauigkeit mit den Messergebnisse bei den R&K Untersuchungen fällt auf, dass hier die Werte um bis zu 8,4 % streuen. Eine mögliche Erklärung ist der Versuch selbst. Die Nadelspitze der Penetrationsnadel (Nadelspitze: 0,14 - 0,16 mm) hat eine sehr kleine Oberfläche, daher wird im Prinzip das Ausgangsbitumen selbst gemessen, nicht das Polymer (Nadelspitze sticht durch Polymernetz). Die Kugel hingegen hat einen Durchmesser von (9,5 mm ±

0,05 mm) und bleibt sozusagen auf dem Polymernetz liegen, daher ist das Messergebnis sehr stark von der Verteilung (Vernetzung) sowie Menge des Polymeres abhängig. Bei den Ergebnissen der elastischen Rückstellung weisen die drei Chargen sehr ähnliche Messwerte auf. Die Abweichungen bei den Ergebnissen ist zum Teil auf die Inhomogenitäten, den Versuch sowie auf die visuelle Messung zurückzuführen.

Geforderte Messgenauigkeit laut Norm:

- Ring und Kugel:
  Wasser-PmB, Wiederholpräzison 1,5 °C, Vergleichpräzision 3,5 °C;
  Wasser-Bitumen, Wiederholpräzison 1,0 °C, Vergleichpräzision 2,0 °C;
- Nadelpenetration:
  Bereich 50 bis 149 [1/10 mm]: Abweichung max. 4 [1/10 mm]

Tabelle 4.6.: Gemittelte Eigenschaften B520 (A) der drei unterschiedlichen Chargen

10.06.2015 B520 (A)	**einmal erhitzt 180 °C 5,0 h Kübel 06:35**			
Versuch	**Links**	**Rechts**	**Mittelwert**	**Rundung**
R&K [°C]	71,3	71,4	71,35	71,4
R&K [°C]	70,4	70,7	70,55	70,6
	Versuch 1	**Versuch 2**	**Versuch 3**	
Penetration [1/10mm]	66	65	65	65,33
Elastische Rückstellung	89	87	88	88
Elastische Rückstellung	91	89	90	90
10.06.2015 B520 (A)	**einmal erhitzt 180 °C 5,0 h Kübel 13:30**			
Versuch	**Links**	**Rechts**	**Mittelwert**	**Rundung**
R&K [°C]	73,4	73,3	73,35	73,4
R&K [°C]	73	73	73	73
	Versuch 1	**Versuch 2**	**Versuch 3**	
Penetration [1/10mm]	66	65	65	65,33
Elastische Rückstellung	89	90	89,5	90
10.06.2015 B520 (A)	**einmal erhitzt 180 °C 5,0 h Kübel 17:10**			
Versuch	**Links**	**Rechts**	**Mittelwert**	**Rundung**
R&K [°C]	67,5	66,7	67,1	67,2
R&K [°C]	63,9	63,9	63,9	64
	Versuch 1	**Versuch 2**	**Versuch 3**	
Penetration [1/10mm]	66	66	66	66,00
Elastische Rückstellung	91	90	90,5	91

5. Ergebnisse Laboruntersuchungen TPA Köln

Für die Untersuchungen im TPA Labor Köln wurde Bitumen 70/100 (Raffinerie BP Gelsenkierchen) und PmB 45/80-65 (B520) über einen deutschen Lieferanten bezogen (PmB Laborherstellung siehe Abschnitt 4.2). Laut den anzuwendenden Normen und Gesetzgebungen besteht keine Auskunftspflicht seitens des Herstellers, über die für die Modifikation eingesetzte Polymerart sowie den mengenmäßigen Anteil. Nicht modifizierte Bitumen und PmBs müssen den definierten Bindemittelspezifikationen in [44], [54] und [57] entsprechen. Durch die FTIR - ATR Spektroskopie wurde die eingesetzte Polymerart (SBS, Wellenlänge 965,82 und 698,25 cm^{-1}) in den Proben B520 bestimmt, eine quantitative Aussage (m%) ist jedoch nicht möglich (siehe Abschnitt 4.1). Aufgrund des vom Polymertyp abhängigen Gebrauchsverhaltens (siehe Abschnitt 1.4), ist das Wissen über die verwendete Polymerart für die folgenden Laboranalysen essenziell. Für eine statistische Absicherung der Messwerte wurden Mehrfachbestimmungen der Materialkennwerte (R&K, PEN, Ela.R., DSR etc.) an rückgewonnenen Bindemitteln aus mindestens fünf getrennt durchgeführten STA-Mischgutalterungsversuchen vorgenommen.

5.1. Einfluss der STA Mischgutalterungsversuche auf den Erweichungspunkt Ring und Kugel, Bitumen 70/100

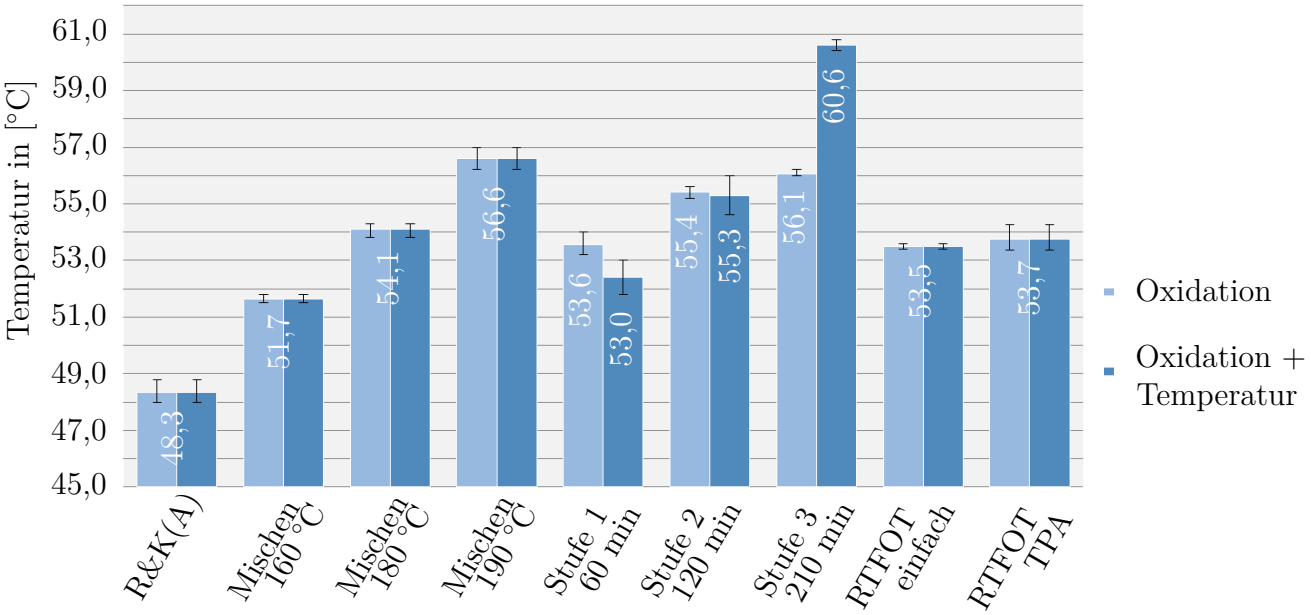


Abbildung 5.1.: Veränderung der Ring- und Kugelwerte Bitumen (70/100), Fehlerindikatoren zeigen maximale/minimale Messwerte [°C]

Abbildung 5.1 und 5.2 zeigen eine Zunahme des Ring- und Kugelwertes bei den Oxidations- sowie Kombinationsversuchen mit ansteigender Versuchsdauer. Die relative Zunahme der Messwerte in den einzelnen Versuchsstufen und Versuchsabläufen muss jedoch getrennt betrachtet werden. Die gemessenen Ring- und Kugelwerte nach dem zugehörigen Mischvorgang (Mischtemperatur 160 °C, 180 °C und 190 °C) in Abbildung 5.1, stellen die Ausgangswerte für die dargestellten absoluten und relativen Veränderungen der Materialkennwerte in Abbildung 5.2 dar.

Abbildung 5.2 zeigt eine Gegenüberstellung der verschiedenen Versuchsabläufe. Die in Prozent angegeben Werte beziehen sich auf den nach dem zugehörigen Mischvorgang ermittelten Erweichungspunkt Ring und Kugel (siehe Abbildung 5.2 und Tabelle 5.1). Im oberen Teil der Abbildung sind die Temperaturen zu Versuchsbeginn und dem Ende angegeben (siehe auch Abschnitt 2.2.1). Die Versuchsdauer der Stufe 3 ist um 30 min länger als Stufe 1 und 2, daher stellt der Wert bei 180 min einen interpolierten Vergleichswert dar.

Oxidationsversuche, V1-V3: Die Versuchsstufen 1 bis 3 zeigen eine absolute sowie relative Steigerung der Messwerte bei gleichzeitiger Abnahme der Versprödungsgeschwindigkeit. Zu Versuchsbeginn steht eine Vielzahl an Reaktionspartnern für die chemischen Reaktionen, welche die Versprödung bewirkt, zur Verfügung. Mit fortlaufender Verknappung dieser, sinkt auch bei gleichbleibender Temperatur (Katalysator) die Reaktionsgeschwindigkeit. Werden die Messwerte ungealtert sowie nach dem Mischen bei 160 °C mit

einbezogen zeigt sich ein klarer Versprödungstrend.

Kombinationsversuche, V4-V6: Die Versuchsstufen 1 bis 3 (V4-V6) zeigen wie bei den Oxidationsversuchen eine absolute wie auch relative Steigerung der Ring- und Kugelwerte mit zunehmender Versuchsdauer. Eine Abnahme der Reaktionsgeschwindigkeit ist nicht zu beobachten. Grund ist die Zunahme der Starttemperatur der Versuche, ausgehend von Versuchsstufe 1 (siehe Abschnitt 2.2.1). Die Temperaturerhöhung wirkt der Abnahme der Reaktionsgeschwindigkeit durch die Verknappung von Reaktionspartnern entgegen. Deutlich sichtbar wird dieser Einfluss in der Versuchsstufe 3 (V6). Die Starttemperatur ist im Vergleich zum Oxidationsversuch mit 191,5 °C (+ 19,7%) und einem Ring- und Kugelwert nach dem Mischvorgang von 56,6 °C (+10,2%) deutlich erhöht. Trotz Verringerung der Oxidationspartner zu Versuchsbeginn steigt durch die Erhöhung der Mischtemperatur der Ring- und Kugelwert um 7,1 % über die Versuchsdauer an. Der Anstieg ist auf die höheren Temperaturen im Vergleich zu V1-V3 während des gesamten Versuchs zurückzuführen. Zwischen den beiden Versuchsabläufen zeigt sich in Stufe 1 (V1/V4) unter Berücksichtigung der Fehlerindikatoren nur ein sehr geringer Unterschied von 1,2 % im Ring- und Kugelwert nach 60 Minuten. Der Temperaturunterschied ist für eine starke Beeinflussung unter Berücksichtigung der Messungenauigkeiten im Ring- und Kugelversuch zu gering. Der Ausgangswert wurde für beide Versuche mit 51,7 °C angenommen. Die Ergebnisse von Versuchsstufe 2 (V2/V5) sind im Mittel ident. Durch die höhere Mischtemperatur von 180 °C ist der Ausgangswert des Kombinationsversuches auf 54,1 °C gesteigert, was einem Plus von 5% entspricht. Im Vergleich zu Versuchsstufe 1 und 2 zeigt 3 einen deutlichen Unterschied der Ring- und Kugelwerte zwischen Oxidations- und Kombinationsversuch (V3/V6), was auf die starke Temperatursteigerung zurückzuführen ist.

Die Messwerte des RTFOT in Bezug auf den Ring- und Kugelwert sind quasi ident mit den Messwerten des Oxidationsversuches Stufe 1 (V1). Der mittlere Ring- und Kugelwert nach 60 min Kombinationsversuch (V4) liegt leicht darunter. Aus den Versuchsergebnissen lässt sich ableiten, dass der RTFOT eine Mischgutmanipulationszeit von 60 min bei entsprechenden klimatischen Bedingungen abbildet. Erklärbar ist dies durch die ähnlichen Belastungen beider Versuchsabläufe. Während bei den Alterungsversuchen Stufe 1, Mischgut im Temperaturbereich von 160 °C - 170,5 °C mit 400 l/min Luft gealtert wird, werden beim RTFOT die Bitumenproben bei 163 ± 3 °C mit 5 l/min Luft für 75 min gealtert.

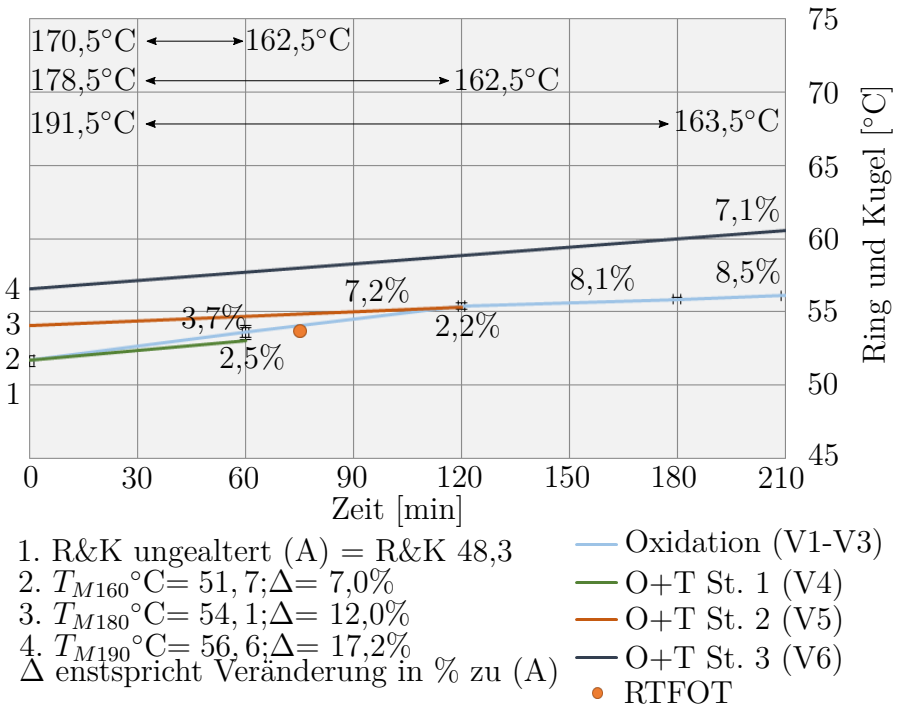


Abbildung 5.2.: Veränderung der Ring- und Kugelwerte durch die STA Mischgutalterungsversuche, Bitumen 70/100

Die Rückgewinnung des Bindemittels mittels Asphaltanalysator (Lösungsmittel = Thrichlorethan) und anschließender Verdampfung des Lösungsmittels im Rotationsverdampfer hat nur einen sehr geringen bis gar keinen Einfluss auf die Alterung. Der geringe Einfluss ist auf eine Verdrängung des Luftsauerstoffes durch das gasförmige Lösungsmittel zurückzuführen. Nach [44] ist eine maximale Erhöhung des Ring- und Kugelwertes bei Bitumen 70/100 durch den Herstellungsprozess von 6 °C im Vergleich zum Frischbitumen zulässig. Falls der Wert darüber hinaus ansteigt entspricht das Bindemittel nicht mehr den Anforderungen. Diese Erhöhung tritt beim entwickelten STA Mischgutalterungsversuch für das getestete Bitumen 70/100 ab Versuchsstufe 2 (V2/V5) ein.

Tabelle 5.1.: Absolute und relative Veränderung der Ring- und Kugelwerte nach den Oxidationsversuchen

Versuchsdauer [min]	Absolute Veränderung [%]	Relative Verändeung [%]
(A) - RTFOT	10,8	-
(A) - 60	3,7	3,7
(A) - 120	7,2	3,5
(A) - 180*	8,1	0,9
(A) - 210	8,5	0,5

*Werte linear interpoliert

5.2. Einfluss der STA Mischgutalterungsversuche auf die Nadelpenetration, Bitumen 70/100

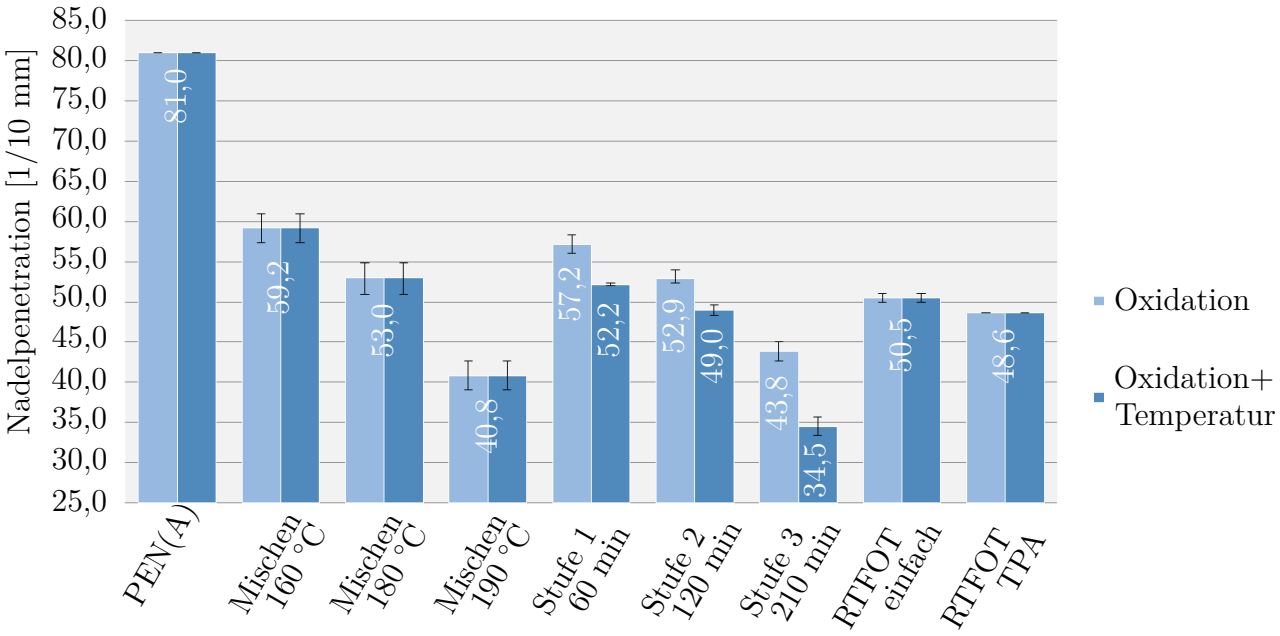


Abbildung 5.3.: Veränderung der Nadelpenetration Bitumen (70/100), Fehlerindikatoren zeigen maximale/minimale Messwerte [1/10 mm]

Die gemessenen Penetrationswerte des ungealterten Bitumen 70/100 (A) entsprechen den Lieferspezifikationen (siehe Tabelle 3.9). Wie in Kapitel 5.1 beschrieben, ist der Abfall der Penetrationswerte (Versprödung und Versteifung) beim Mischen durch eine Vergrößerung der Oxidationsoberfläche und die hohe Temperatur (Katalysator) erklärbar. Im Vergleich der Versuchsstufen 1, 2 und 3 (V1-V6) kann für die reinen Oxidations- (V1-V3) wie auch für die Kombinationsversuche (V4-V6) ein eindeutiger Trend mit fortschreitender Versprödung und Versteifung erkannt werden.

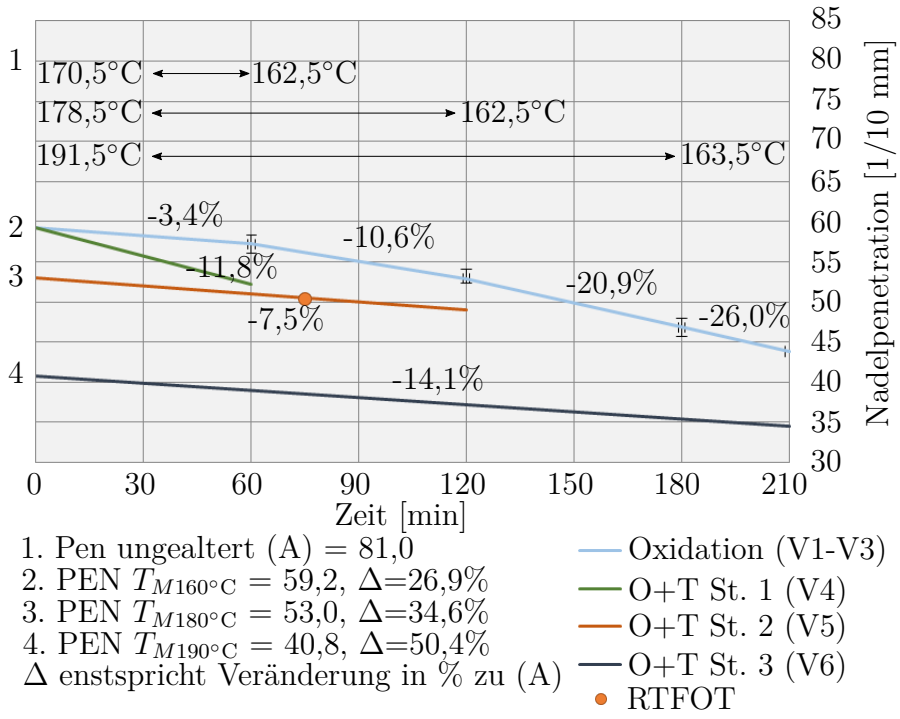


Abbildung 5.4.: Veränderung der Nadelpenetration durch die STA Mischgutalterungsversuche, Bitumen 70/100

Oxidationsversuche, V1-V3: Der Kurvenverlauf in Abbildung 5.4 zeigt eine Abnahme der Nadelpenetration mit fortlaufender Versuchsdauer, bei gleichzeitigem Anstieg der Versprödungsgeschwindigkeit (siehe Tabelle 5.4, Relative Veränderung). Theoretisch folgt eine Abnahme der Versprödungsgeschwindigkeit zufolge der Verringerung der chemischen Reaktionspartner. Dieser Trend ist in Abbildung 5.2 bei den Ring- und Kugelwerten erkennbar. Die Abnahme der Geschwindigkeit des Penetrationsverlustes trat aufgrund einer zu kurzen Versuchsdauer für diesen Effekt nicht ein. Die Versprödung und Versteifung (Abfall des Penetrationswertes) ist nach 210 min so weit fortgeschritten, dass eine längere Versuchsdauer keinen praktischen Informationsgewinn liefern würde, da das Material für den Einbau nicht mehr geeignet ist. Folglich ist die Versuchsdauer für den Gewinn baupraktischer Informationen als ausreichend anzusehen.

Kombinationsversuche, V4-V6: Der Vergleich der drei Kombinationsversuche zeigt die Streuung der relativen Verluste bezogen auf den zugehörigen Mischvorgang auf. Durch die unterschiedlichen thermischen Vorbelastungen beim Mischvorgang, abhängig von der Versuchsdauer, läuft der Oxidationsprozess unterschiedlich schnell ab (siehe Abschnitt 5.1 Zusammenhang Oxidation und Temperatur). Je länger die Versuchsdauer, desto höheren Temperaturbereichen ist das Mischgut während dem Versuch ausgesetzt, gleichzeitig ist das Material zu Versuchsbeginn schon stärker destillativ und oxidativ gealtert. Im Bindemittel stehen zu Beginn weniger chemische Reaktionspartner zur Verfügung. Die steilere Kurve von V4 im Vergleich zu V6, trotz geringerer thermischer Belastung ist durch die höhere Mischtemperatur (stärkere oxidative und destillative Alterung) zu Versuchsbeginn

zu erklären. Für V4 stehen mehr Reaktionspartner im Bitumen zur Verfügung (leichtere und schnellere chemische Reaktion). Der Verlauf der Kurven von V5 und V6 ist annähernd parallel. Die Einflüsse auf die Versprödung während des Mischvorganges und der höheren Temperaturen mit Zunahme der Versuchsdauer sind gegenläufig, daher ist nur eine qualitative Analyse der Kurvenverläufe möglich. Im Vergleich der reinen Oxidationsversuche (V1-V3) mit den Kombinationsversuchen (V4-V6) ist der Einfluss der erhöhten thermischen Belastung, wie auch bei den Ring- und Kugelwerten in 5.1 eindeutig zu erkennen. Besonders markant ist Versuchsstufe 1 (V1/V4) zwischen den beiden Versuchstypen. Der Penetrationswert ist zu Beginn ident, daher ist der Einfluss rein auf die höhere Temperatur zurückzuführen. Die beiden Temperaturverläufe zeigen, dass lediglich in den ersten 45 min eine höhere Temperatur von maximal 7,5 °C vorliegt. Dies verdeutlicht die hohe Sensibilität des Material (Bitumen) auf bereits geringe Temperaturveränderungen (mit zunehmender Temperatur muss das ΔT größer für eine markante Einwirkung werden) im Bereich zwischen 150 - 170 °C. Dieser Einfluss tritt bei den gemessenen Penetrationswerten stärker hervor als bei den Ring- und Kugelmessungen. Nadelpenetrationsmessungen sind für eine begleitende Kontrolle des Einbauprozesses in Bezug auf die Versteifung und Versprödung des Bitumens aufgrund der höheren Sensibilität besser geeignet als Ring- und Kugelmessungen.

Wird als Näherung ein linearer Verlauf der Versprödung bei den Kombinationsversuchen zwischen Versuchsbeginn und Ende angenommen, entspricht der Penetrationswert nach dem RTFOT dem Penetrationswert nach 75 min Versuchsstufe V5. Dieser Messwert liegt deutlich unter den Ergebnissen der Oxidationsversuche nach 75 min.

Tabelle 5.2.: Absolute und relative Veränderung der Penetrationswerte nach den Oxidationsversuchen

Versuchsdauer [min]	Absolute Veränderung [%]	Relative Verändeung [%]
(A) - RTFOT	-37,7	-
(A) - 60	-3,4	-3,4
(A) - 120	-10,6	-7,3
(A) - 180*	-20,9	-10,3
(A) - 210	-26,0	-5,1

*Werte linear interpoliert

5.3. Einfluss der STA Mischgutalterungsversuche auf den Erweichungspunkt Ring und Kugel, B520

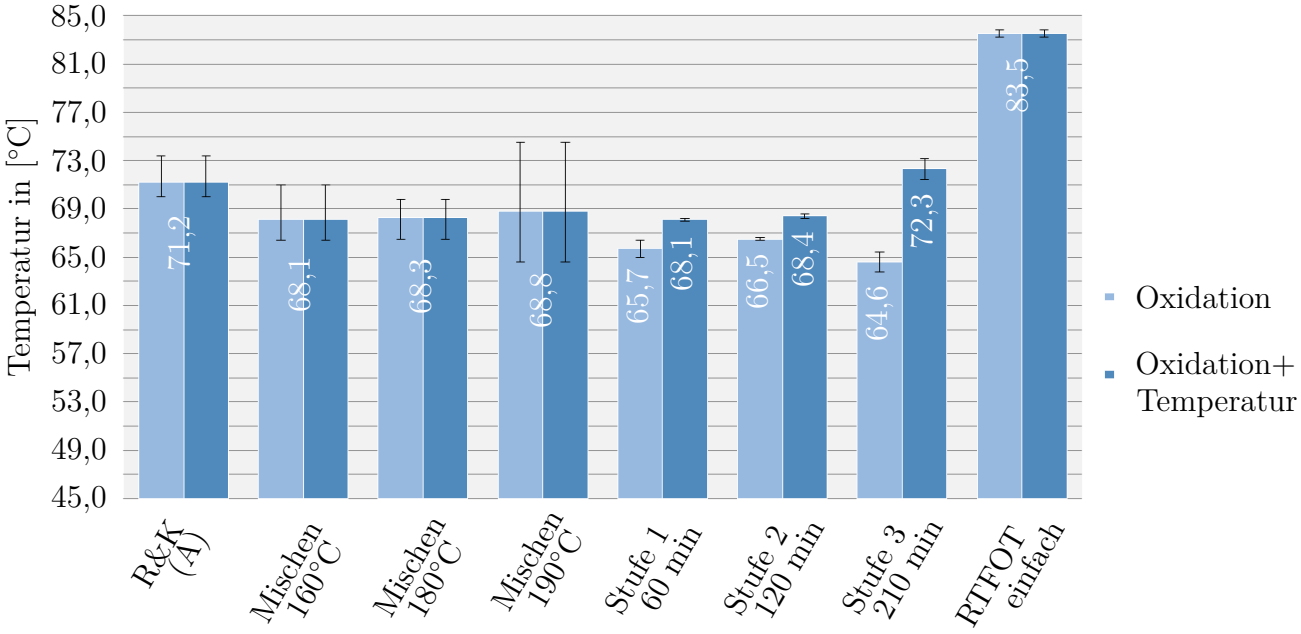


Abbildung 5.5.: Veränderung der Ring- und Kugelwerte B520, Fehlerindikatoren zeigen maximale/minimale Messwerte [°C]

Die gemessenen Ring- und Kugelwerte des ungealterten PmBs (B520) entsprechen in allen Messungen (siehe Fehlerindikatoren) den Mindestanforderungen nach [44] ($R\&K_{min} \geq 65$ °C). Fehlerindikatoren (schwarz) in den Diagrammen beschreiben minimale und maximale Messwerte. Die Messergebnisse des Frischbitumen (A) sowie bei den einzelnen Mischvorgängen liegen nach der in [47] definierten Wiederholpräzision von 1,5 °C außerhalb der Grenzwerte. Anmerkung 2 in [47] weist auf einen dänischen Ringversuch hin, bei dem eine Wiederholpräzision von 2,2 °C und eine Vergleichspräzision von 6,3 °C ermittelt wurde. Dies zeigt, dass die angegebene Präzision von 1,5 °C aufgrund der Beschaffenheit von polymermodifizierten Bitumen sehr schwer einzuhalten ist und wirft die Frage der Eignung des Ring- und Kugelverfahrens für die Beschreibung der Materialeigenschaften im ungealterten sowie gealterten (oxidierten) Zustand auf (Begründung siehe Abschnitt 4.2.3). Aufgrund der Untersuchungsergebnisse sowie aus Literaturdaten wird geschlossen, dass der Ring- und Kugelversuch nicht für die Bestimmung des Alterungszustandes bei PmBs geeignet ist. Der zweite, dritte und vierte Balken in Abbildung 5.5 zeigt im Mittel einen leichten Anstieg des R&K Wertes mit steigender Mischtemperatur. Die Bestimmungen der Messwerte nach dem Mischvorgang bei 190 °C weisen eine erhebliche Streuung auf. Im Vergleich zu Bitumen 70/100 in Abbildung 5.1, welches einen Anstieg der R&K mit fortschreitender Alterung aufweist, ist bei B520 kein eindeutiger Trend zu erkennen. Durch die starke Streuung der Messergebnisse nach dem Mischvorgang bei 190 °C, welcher als Ausgangswert für den Kombinationsversuch Stufe 3 (V6) herangezogen wird, sind

die Ring- und Kugelwerte nach diesem Versuch in Bezug auf die Versprödung nur sehr eingeschränkt interpretierbar. Um dieser Problematik entgegen zu wirken wurden für die Proben B533 zusätzliche DSR Untersuchungen durchgeführt.

Oxidationsversuche, V1-V3: Unter Berücksichtigung der Fehlerindikatoren zeigt sich eine minimale Veränderung der R&K Werte in den Oxidationsstufen. Die Abweichungen liegen innerhalb der Wiederholpräzision und werden daher als konstant angesehen. Die Messungen nach den Mischvorgängen weisen tendenziell leicht höhere Werte auf als in den einzelnen Oxidationsstufen, dies lässt auf ein Abfallen des R&K Wertes bei 160 ± 3 °C mit fortschreitender Versuchsdauer schließen. Wie bereits erwähnt, ist dieses Verhalten gegenläufig zu jenem von Bitumen 70/100 in Abschnitt 5.1, wurde aber bereits bei diversen Laborversuchen bestätigt. Die Begründung des Materialverhaltens liegt im komplexen Zusammenspiel von Polymer (SBS) und Grundbitumen (siehe Abschnitt 1.5).

Kombinationsversuche, V4-V6: Der Temperaturunterschied beim Mischvorgang und der Versuchsstarttemperatur der Kombinationsversuche V4 und V5 liegt bei zirka 10 °C, trotz dieser Differenz weisen die Messwerte nach den Versuchen nur sehr geringe Unterschied (Δ 0,3 °C) auf. Bezieht man die Versuchsstufe 3 mit ein, fällt eine signifikante Steigerung des Ring- und Kugelwertes von V4 und V5 auf V6 bei einer geringen Ergebnisstreuung in den drei Versuchsstufen auf. Für V6 wurde das Mischgut bei 190 °C gemischt. Im Vergleich der Ergebnisse nach dem Mischvorgang mit jenen nach dem Kombinationsversuch zeigt sich kein signifikanter Unterschied, da die Streuung der R&K Werte bei der zugehörigen Mischtemperatur sehr stark ist.

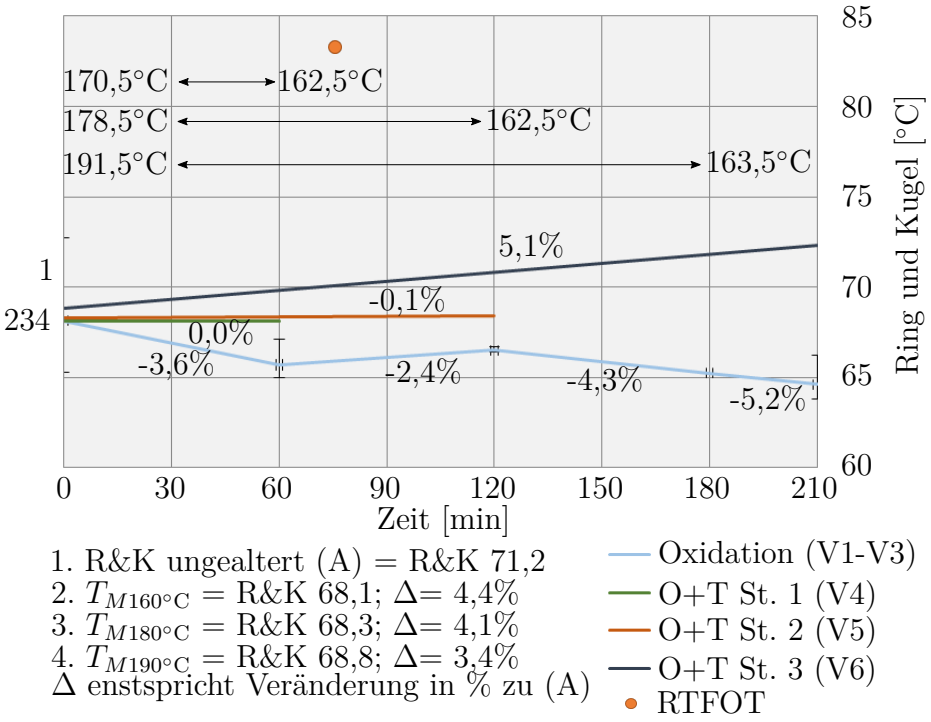


Abbildung 5.6.: Veränderung der Ring- und Kugelwerte durch die STA Mischgutalterungsversuche, B520

Bei einer Gegenüberstellung beider Versuchsabläufe weisen die Oxidationsversuche relativ konstante Werte auf. In den Kombinationsversuchen kann hingegen eine Steigerung der Ring- und Kugelwerte von V4 und V5 auf V6 beobachtet werden, welches wiederum auf die Zunahme der Temperatur zurückzuführen ist. Eine mögliche Erklärung wäre die Zunahme des Einflusses des Grundbitumens auf den Ring- und Kugelwert mit steigender Temperatur, dies könnte bei V6 (+20 °C im Vergleich zu V5) den erhöhten Ring- und Kugelwert erklären (siehe Abschnitt 1.4). Zum Vergleich, in [12] wurde ein PmB mit 4,5 m% SBS auf seine Alterungsverhalten untersucht. Nach dem TFOT stieg der R&K Wert um 3,4 °C von 69,1 auf 72,5 °C an, der Penetrationsindex nahm von 0,2 auf 0,5 zu.

Die Messwerte nach dem RTFOT steigen sehr stark im Vergleich zu den STA Mischgutalterungsversuchen. Diese Abweichung ist womöglich durch das PmB selbst zu erklären. In Kapitel 4.2 wurde gezeigt, dass das PmB Inhomogenitäten aufweist, welche hier zum tragen kommen könnten. Durch die Rotation der RTFOT Proben über 75 min bei 163 °C kann es zu einem ähnlichen Homogenisierungseffekt wie bei gesteigerter Temperatur kommen. Bei der Rotationsbewegung der Proben könnte das Polymer besser verteilt bzw. vernetzt werden, dies könnte zur Erhöhung des R&K Wertes führen (Mischvorgang und Temperatur haben Einfluss auf Vernetzung). Die Fehlerindikatoren in Stufe (A) und bei den Mischvorgängen bei 160 °C, 180 °C und 190 °C weisen auf ein inhomogenes, qualitativ minderwertiges PmB hin. Wie zuvor beschrieben, sind die Ring- und Kugelversuche nicht für die Bestimmung des Alterungszustandes bei polymermodifizierten Bitumen geeignet.

Tabelle 5.3.: Absolute und relative Veränderung der Ring- und Kugelwerte nach den Oxidationsversuchen

Versuchsdauer [min]	Absolute Veränderung [%]	Relative Verändeung [%]
B520 (A) - RTFOT	17,3	-
B520 (A) - 60	-3,6	-3,6
B520 (A) - 120	-2,4	1,2
B520 (A) - 180*	-4,3	-1,9
B520 (A) - 210	-5,2	-0,9

*Werte linear interpoliert

5.4. Einfluss der STA Mischgutalterungsversuche auf die Nadelpenetration, B520

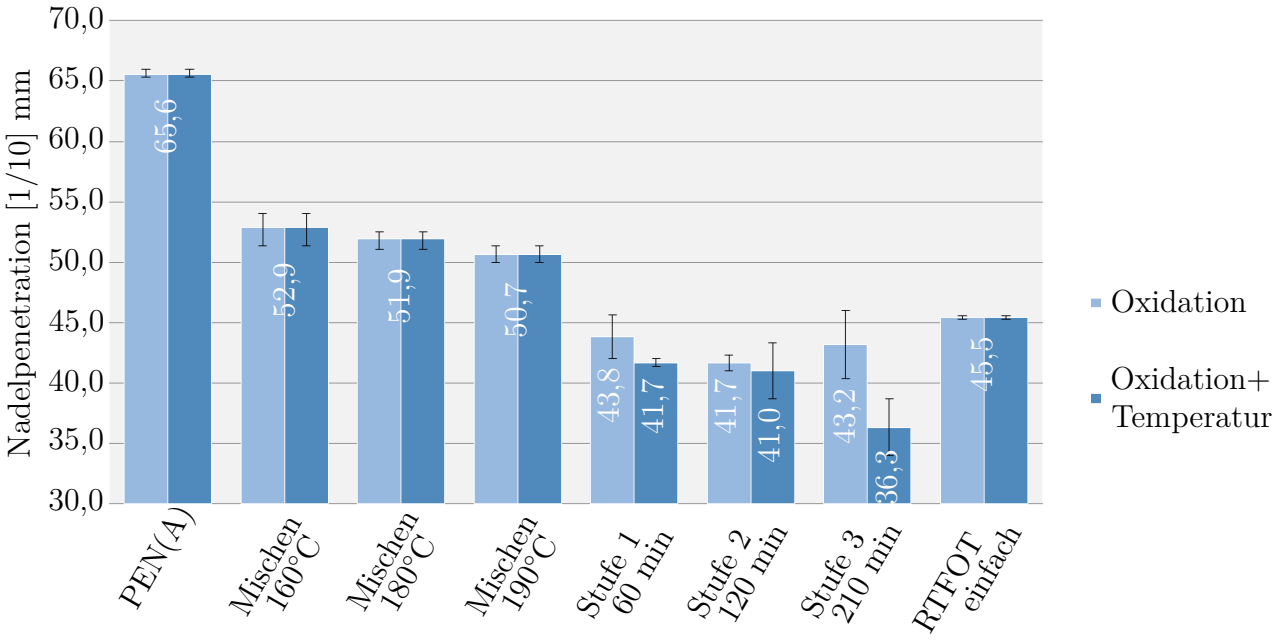


Abbildung 5.7.: Veränderung der Nadelpenetration B520, Fehlerindikatoren zeigen maximale/minimale Messwerte [1/10 mm]

Wie die Ring- und Kugelmesswerte entsprechen auch die PEN Werte des ungealterten B520 den Anforderungen laut RAAW (PEN_{min}=45, PEN_{max}=80). Im Gegensatz zu den R&K Werten in Abbildung 5.5 folgt die gemessene PEN (Abbildung 5.7) einem abfallenden Trend mit Ausnahme der Oxidationsstufe 3. Die Größe der Fehlerindikatoren in den Versuchsstufen ist auf die Inhomogenität des PmBs zurückzuführen (siehe Abschnitt 4.2.1). In [46] werden für PmBs keine Wiederholpräzisionen angegeben, es wird als Näherung (Richtwert) eine Abweichung von 4 % des Mittelwertes empfohlen.

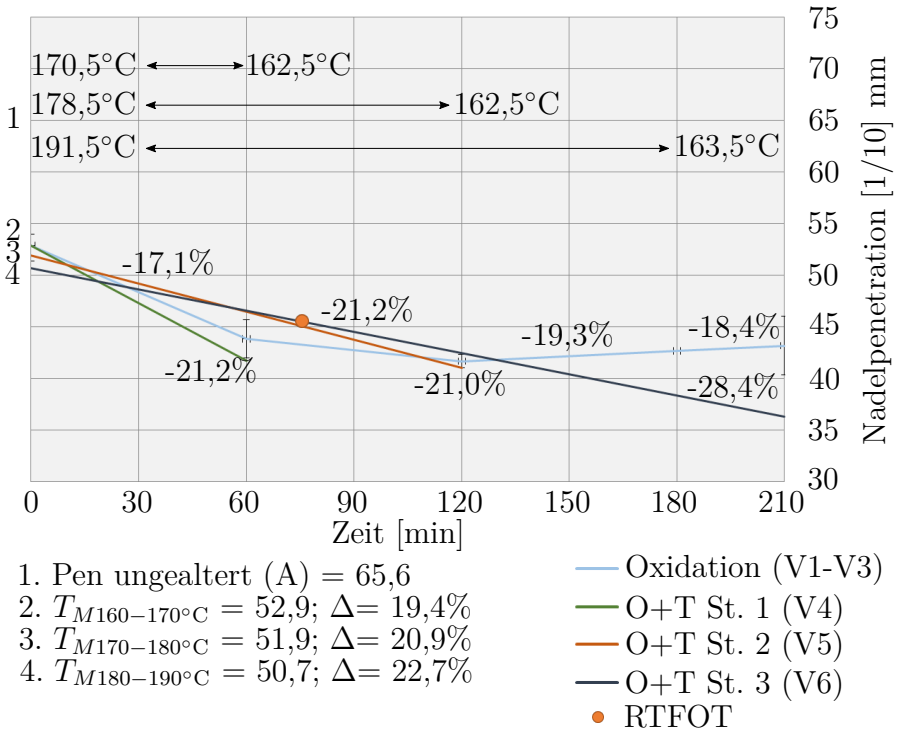


Abbildung 5.8.: Veränderung der Nadelpenetration durch die STA Mischgutalterungsversuche, B520

Oxidationsversuche, V1-V3: Der leichte Anstieg der Nadelpenetration bei den Oxidationsversuchen in Stufe 3 kann aufgrund der Messabweichungen (siehe Fehlerindikator in Abbildung 5.7 und 5.8) erklärt werden.

Kombinationsversuche, V4-V6: Die Kombinationsversuche zeigen mit Zunahme der Mischtemperatur und einhergehenden Abfall des Ausgangspenetrationswertes eine Abnahme der Versprödungsgeschwindigkeit. Dieses Verhalten wird durch die flacheren Kurvenverläufe in Abbildung 5.8 abgebildet. Dies zeigt, dass der Einfluss der Temperatur beim Mischvorgang ausschlaggebend ist, was wiederum in der Realität leicht durch die Transportzeit und der damit verbunden Mischtemperatur gesteuert werden kann. Der relative Abfall des Penetrationswertes in Bezug auf den zugehörigen Ausgangswert der beiden Kombinationsversuchsstufen 1 und 2 ist quasi ident, dies verdeutlicht wiederholt den starken Einfluss der Mischtemperatur. Gleichzeitig ist der geringere Einfluss der Oxidationsdauer erkennbar, dies ist auch auf den niedrigen Temperaturunterschied der Abkühlkurven (V4/V5) zurückzuführen. V6 weist zu Beginn den geringsten Penetrationswert auf, dennoch ist der relative Penetrationsverlust von 28,4 % am höchsten. Bei den Penetrationsversuchen mit Bitumen 70/100 in Abschnitt 5.2 wies der Oxidationsversuch mit -26,0 % die stärkste Versprödung auf.

Das Ergebnis des RTFOT liegt auf der Kombinationsversuchsstufe 2 und 3 (V4/V5), daher lässt sich mithilfe dieses Tests eine Transportzeit bei einer Mischtemperatur von 178,5 °C bzw. 191,5 °C von 75 min simulieren (siehe Abbildung 5.8). Beide Bindemittelsorten

weisen nach den Alterungsversuchen in Bezug auf die PEN Werte vergleichbare Trends auf (vgl. Bitumen 70/100 mit B520). Die Messergebnisse zeigen wiederum eine bessere Eignung des Nadelpenetrationsverfahrens für eine Zustandsbeschreibung von gealterten polymermodifizierten Bindemitteln als das Ring- und Kugelverfahren.

Tabelle 5.4.: Absolute und relative Veränderung der Penetrationswerte nach den Oxidationsversuchen

Versuchsdauer	Absolute Veränderung [%]	Relative Veränderung [%]
B520 (A) - RTFOT	-30,6	-
B520 (A) - 60	-17,1	-17,1
B520 (A) - 120	-21,2	-4,1
B520 (A) - 180*	-19,3	1,9
B520 (A) - 210	-18,4	0,9

*Werte linear interpoliert

5.5. Einfluss der STA Mischgutalterungsversuche auf die elastische Rückstellung, B520

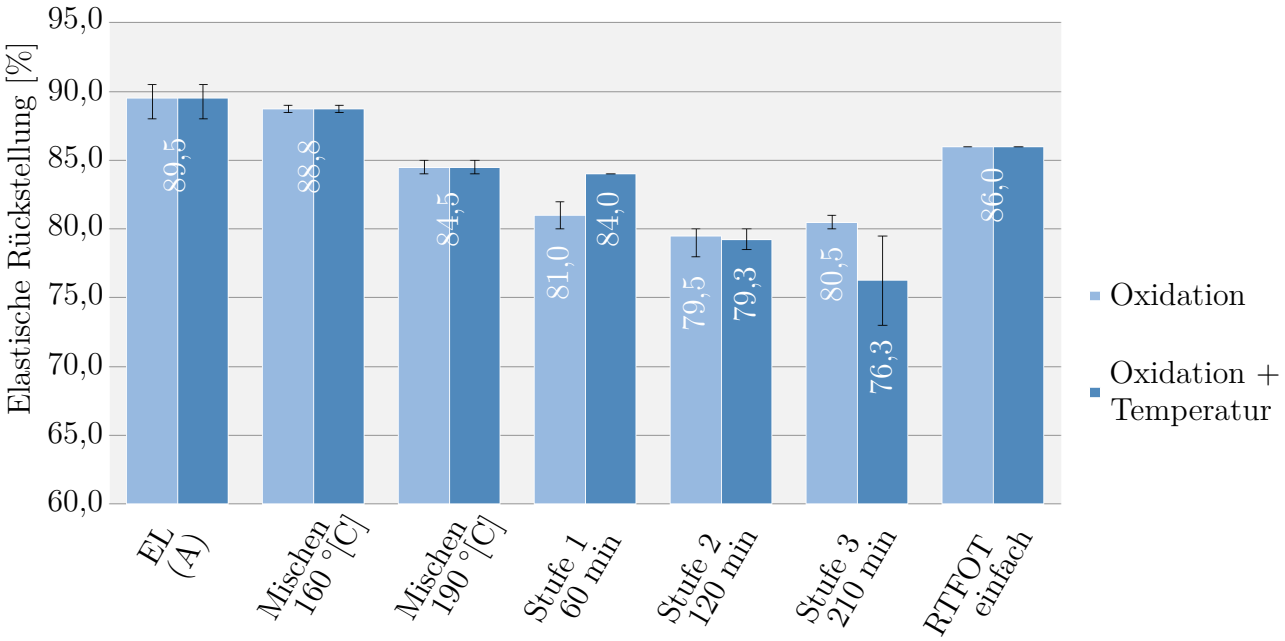


Abbildung 5.9.: Veränderung der elastischen Rückstellung B520, Fehlerindikatoren zeigen maximale/minimale Messwerte [%]

Die RAAW geben die untere Grenze der elastischen Rückstellung nach dem RTFOT mit $\geq$ 70 % des Ausgangswertes an (siehe Tabelle 1.4). Nach dem RTFOT weist das getestete

PmB eine elastische Rückstellung von 86,0 % auf, was 96 % des Ausgangswertes (89,5 %) entspricht. Der Mischvorganges bei 160 °C hat keinen signifikanten Einfluss auf den Ausgangswert. Für die Elastizität im PmB ist maßgeblich das Polymer SBS verantwortlich. Falls dieses nicht zu stark erhitzt wird, stellen sich die elastischen Eigenschaften des SBS nach dem Abkühlvorgang wieder her (siehe Abbildung 1.13). Die Wiederholpräzision von 4 % nach [55] wurde bei allen Versuchen eingehalten.

Oxidationsversuche, V1-V3: Die Oxidationsstufe 1 zeigt einen deutlichen Abfall der elastischen Rückstellung bezogen auf den zugehörigen Mischvorgang (Δ 8,8 %). Von V1 zu V2 verringert sich der relative Abfall (Δ_{12} 1,9 %) bei konstanter Zunahme (+ 60 min) der Versuchsdauer. Unter Einbezug der Fehlerindikatoren werden die Messwerte zwischen V2 und V3 als annähernd äquivalent angesehen. Für ein weiteres voranschreiten der Versprödung müsste die Temperatur erhöht werden (Katalysator) um den chemischen Prozess fort zu setzen.

Kombinationsversuche, V4-V6: Im Vergleich von V4 zu V1 erkennt man ein schwächeres Abfallen des Messwertes trotz höherer Versuchstemperatur (+ 10 °C). Versuchsstufe 2 beider Versuche liefert ähnliche Ergebnisse obwohl der Kombinationsversuch eine um 18,5 °C erhöhte Starttemperatur aufweist. Erst V6 weist im Mittel geringere Messwerte bei einer stark erhöhten Streuung auf.

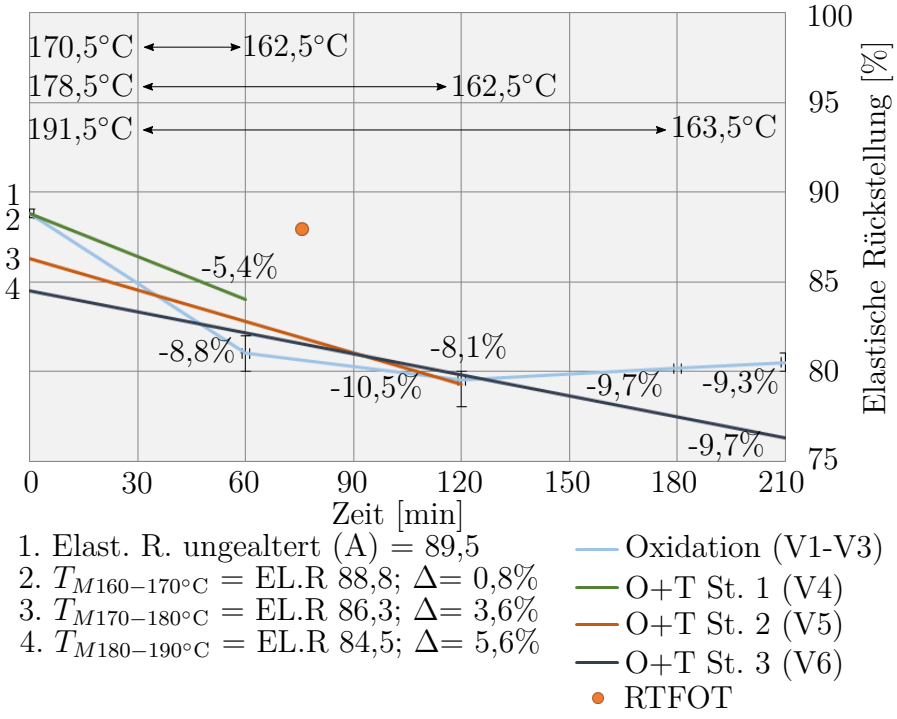


Abbildung 5.10.: Veränderung der elastischen Rückstellung durch die STA Mischgutalterungsversuche, B520

Wie bei den zuvor durchgeführten Versuchen (R&K und PEN) ist ersichtlich, dass der

Einfluss der erhöhten Starttemperatur (ausgehende von 160 °C) bis zu einem Unterschied von +20 °C eher gering ausfällt, darüber hinaus jedoch starken Einfluss auf die Versuchsergebnisse hat. Die Alterung mittels RTFOT ist aufgrund der höheren Messwerte der elastischen Rückstellung im Vergleich zu jenen nach den STA Mischgutalterungsversuchen als schonender anzusehen.

Tabelle 5.5.: Absolute und relative Veränderung der Elastischen Rückstellung nach den Oxidationsversuchen

Versuchsdauer [min]	Absolute Veränderung [%]	Relative Veränderung [%]
B520 (A) - RTFOT	-3,9	-
B520 (A) - 60	-8,8	-8,8
B520 (A) - 120	-10,5	-1,7
B520 (A) - 180*	-9,7	0,8
B520 (A) - 210	-9,3	0,4

*Werte linear interpoliert

5.6. Veränderung der Steifigkeit einer fertigen AF in Abhängigkeit des herstellungsbedingten Versprödungssustandes des Bindemittels

Die Bestimmung der Steifigkeit (E_S) in den unterschiedlichen Versuchsstufen (V1-V6) erfolgte anhand der indirekten Zugprüfung an zylindrischen Probekörpern (CIT-CY) nach [51]. Die Probekörper (Bohrkerne) wurden mittels Kernbohrungen (Durchmesser 100 mm) aus im Walzsegmentverdichter produzierten Platten (320x290x60 mm) hergestellt. Die Höhe der Proben resultiert aus der Festlegung der Dichtschichtstärke mit 60 mm, was einer gängigen Stärke in der Realität entspricht (siehe [37]). Die Angaben zu den Probekörpern in der Norm stellen Mindestdicken dar, somit entsprachen die produzierten Probekörper den Anforderungen für die Prüfungen. Das Schleifen der Proben für die Bestimmung der Steifigkeit war nicht erforderlich, da die Oberfläche des Dichtungsasphaltes nach der Verdichtung im Walzsegmentverdichter eine glatte Oberfläche aufwies.

Probekörper

- Durchmesser 100 mm, Höhe 60 mm aus verdichteten Platten nach [53] ausgebohrt (Asphaltmischgut/Bitumen in die Alterungsstufen V1-V6 mittels STA Mischgutalterungsversuch konditioniert, Sieblinie siehe Abbildung 3.2)

5.6.1. Herstellung der Probekörper für die indirekte Zugprüfung

Die Probekörper werden in den drei Alterungsstufen des Oxidations- und Kombinationsversuchs hergestellt. Um ein ausreichend großes Datenkollektiv für die Bestimmung der

Steifigkeiten zu erstellen, werden je Alterungsstufe 10 zylindrische Probekörper hergestellt. Für einen gleichmäßigen Verdichtungsgrad, wurde für jede Platte die vorgesehene Mischgutmenge separat eingewogen.

- Asphaltmischgut Bitumen 70/100, Rohdichte 2,437 g/cm^3, Menge 13,57 kg
- Asphaltmischgut B520, Rohdichte 2,417 g/cm^3, Menge 13,46 kg

5.6.2. Berechnung des Steifemoduls nach ÖNORM EN 12697 - 26 2012-11-01

Berechnung der **Steifigkeit** für einen linear elastischen Baustoff nach dem Hook'schen Gesetz.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \tag{5.1}$$

Der **komplexe Modul (G*)** beschreibt den Zusammenhang zwischen der Spannung und der Dehnung für einen linear viskoelastischen Baustoff, der zur Zeit t einer Belastung mit sinusförmiger Wellenform unterzogen wird, bei der die Beanspruchung durch eine Spannung

$$\sigma \cdot sin(\omega \cdot t) \tag{5.2}$$

zu einer Dehnung

$$\epsilon \cdot sin(\omega \cdot t - \phi) \tag{5.3}$$

führt, die in Bezug auf die Spannung eine Phasenverschiebung ϕ aufweist. Die Amplitude der Dehnung und der Phasenwinkel sind Funktionen der Frequenz f und der Prüftemperatur Θ. Das Spannungs-Dehnungs-Verhältnis definiert den komplexen Modul E* nach folgender Gleichung

$$E^* = |E^*| \cdot (cos(\phi) + i \cdot sin(\phi)) \tag{5.4}$$

Der komplexe Modul ist durch ein Komponentenpaar gekennzeichnet. Dieses Paar kann wie folgt angegeben werden

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \tag{5.5}$$

$$\phi = arctan\left(\frac{E_2}{E_1}\right) \tag{5.6}$$

Sekantenmodul

Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung bei der Belastungszeit t für einen Baustoff, der einer Belastung mit geregelter Dehnungsgeschwindigkeit ausgesetzt ist

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\epsilon(t)} \tag{5.7}$$

Das Dehnungsgesetz lautet

$$\epsilon(t) = \alpha_i \cdot t^n \tag{5.8}$$

α_i und t^n sind Konstanten. Es können mehrere aufeinander folgende Prüfungen an demselben Probekörper für verschiedene Werte α_i durchgeführt werden. Bei linear viskoelastischen Baustoffen hängt der für unterschiedliche Werte von α_i bei derselben Temperatur erhaltene Sekantenmodul nur von der Belastungszeit t ab.

5.6.2.1. Berechnung (Ableitung) der Hauptkurve [51]

Der Steifigkeitsmodul von Asphalt unterliegt dem Prinzip der Überlagerung von Frequenz und Temperatur. Dies bedeutet, dass eine Hauptkurve des komplexen Moduls für eine Bezugstemperatur aus Versuchsdaten für einen begrenzten Bereich von Frequenzen und Temperaturen erstellt werden kann, vorausgesetzt, dass ein Verschiebungsfaktor angewandt wird um die Bezugsfrequenz zu berechnen. Zweck der Hauptkurve ist die Bestimmung des Steifigkeitsmoduls für jede beliebige Kombination von Lastfrequenz und Prüftemperatur. Hierzu muss die Steifigkeit bei verschiedenen Frequenzen und Temperaturen gemessen werden. Theoretischer Hintergrund siehe DIN EN 12697-26:2012-06 Abschnitt G.2.

5.6.2.2. Allgemeine Problematik des Versuches

Mit dem indirekten Zugversuch kann sowohl die Steifigkeit als auch die Ermüdungsfestigkeit von Asphaltbeton bestimmt werden. Als vergleichbaren Versuch kann der 4PBV angeführt werden. Beide Versuche sollen mit unterschiedlichen Anordnungen Aufschluss über dieselbe Fragestellung geben. Betrachtet man jedoch die Probekörper und Versuchsanordnungen, ist zu erkennen, dass die durch die Belastung hervorgerufenen Spannungszustände keinesfalls identisch sind. Für die in dieser Arbeit bestimmte Veränderung der Steifigkeit durch Alterungsprozesse spielt dies jedoch keine Rolle, da Relativwerte untereinander verglichen und Tendenzen abgeleitet werden. Zur realistischen Abbildung der Spannungen in einer Asphaltbetonoberflächendichtung eignet sich der 4PBV jedoch deutlich besser, da die durch Setzungen verursachten Verformungen aufgrund von Biegezugspannungen deutlich realistischer abgebildet werden. Ein großer Vorteil des indirekten Zugversuches sind die Probekörper welche direkt durch Bohrkerne genommen werden können. Aus diesem Grund wurden die Prüfungen in dieser Arbeit mittels CIT-IY durchgeführt.

5.6.3. Phasenwinkel

Während Scherspannung und Deformation bei ideal elastischem Verhalten in direktem Zusammenhang stehen, gibt es beim ideal viskosen Verhalten eine maximale Zeitverschiebung. Scherspannung und Deformation stehen in indirektem Zusammenhang. Diese Zeitverschiebung wird durch den sogenannten Phasenverschiebungswinkel (auch Phasenwinkel genannt) δ ausgedrückt. Ein Phasenverschiebungswinkel von 0° entspricht dabei ideal elastischem, ein Phasenverschiebungswinkel von 90° ideal viskosem Verhalten. Dazwischen befindet sich der für Bitumen gebrauchsrelevante visko-elastische Bereich wie in Abbildung 5.11 dargestellt. [19]

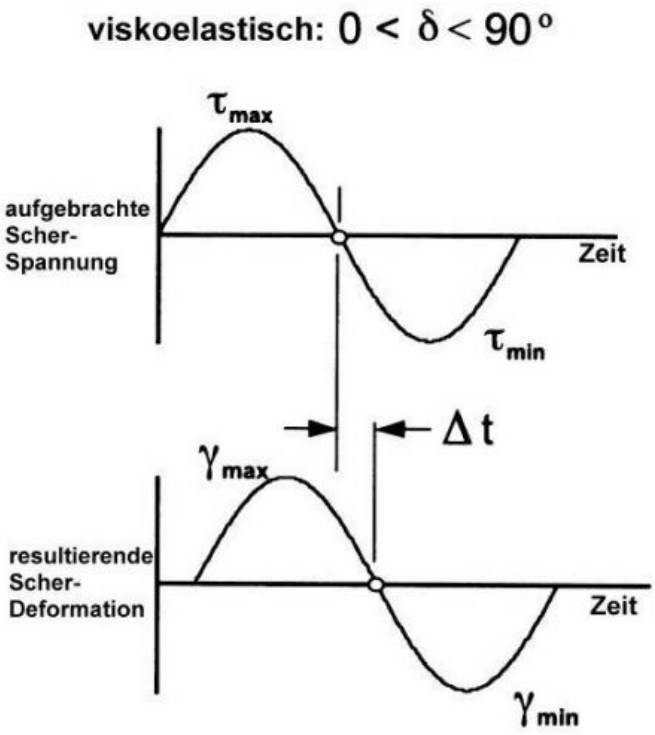


Abbildung 5.11.: Visko-elastisches Verhalten [25]

Die Steifigkeit beschreibt den Widerstand gegen die Verformung des Bitumens, der Phasenwinkel die Größe des elastischen bzw. viskosen Anteils. Je größer der Phasenwinkel desto viskoser reagiert das Material.

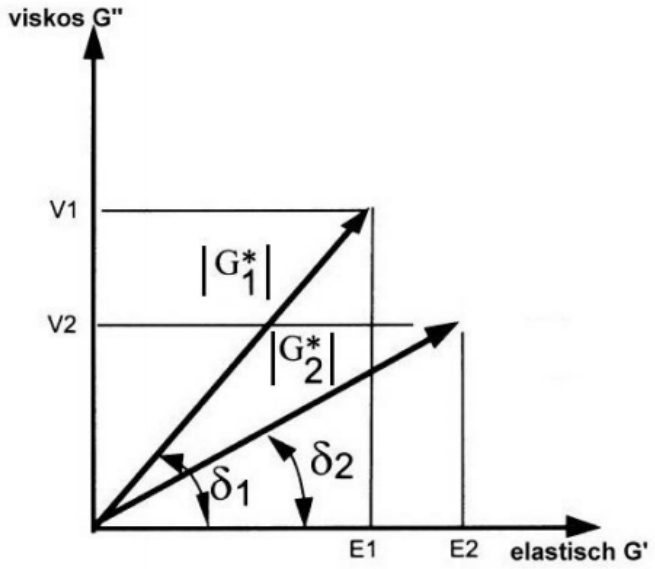


Abbildung 5.12.: Phasenverschiebungswinkel δ (Phasenwinkel) [26]

5.6.4. Laborergebnisse aus der indirekten Zugprüfung

Bei den Temperaturen -10°C, 0°C, +10°C und +20°C wurde die Steifigkeit (Steifemodul E_S) mittels indirekter Zugprüfung ermittelt. Für beide Mischgüter wurde die Designsieblinie verwendet (siehe Abbildung 3.2). Die benötigten Gesteinskörnungen wurden laut Tabelle 5.6 für jeden Alterungsversuch separat eingewogen. Der Einfluss der Sieblinie durch eine Variation in der Zusammensetzung auf die Steifigkeit soll dadurch so gering als möglich gehalten werden. Mit dieser Vorgehensweise wird sichergestellt, dass lediglich der Einfluss der Bitumenalterung auf die Steifigkeit untersucht wird. Im STA Mischgutalterungsversuch wurden für jeden Versuchsdurchgang 15 kg Mischgut in die einzelnen Alterungsstufen konditioniert. Anschließend wurde das gealterte Mischgut auf einem Blech verteilt, gemischt und die nach Abschnitt 5.6.1 benötigte Menge in den Walzsegmentverdichter gefüllt und verdichtet. Dieser Produktionsvorgang stellt eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse sicher.

Tabelle 5.6.: Prozentualer Anteil Kornfraktionen der Designsieblinie

Kornfraktion	m%
Füller <0,063	9
0 - 2	23
0 - 2 NS	12
2 - 5	24
5 - 8	17
8 - 11	15
	100

5.6.4.1. Bitumen 70/100

In den folgenden Diagrammen ist die Veränderung der Steifigkeit und des Phasenwinkels (Genauigkeit ± 1°), welcher im CIT-CY Versuch ermittelt wurde in einem Diagramm dargestellt. Links die Steifigkeit bei 10 Hz in [MPa] und rechts der Phasenwinkel δ in [°]. Die Markierungen zeigen die Messpunkte, dazwischen wurde linear interpoliert.
Oxidationsversuche, V1-V3:

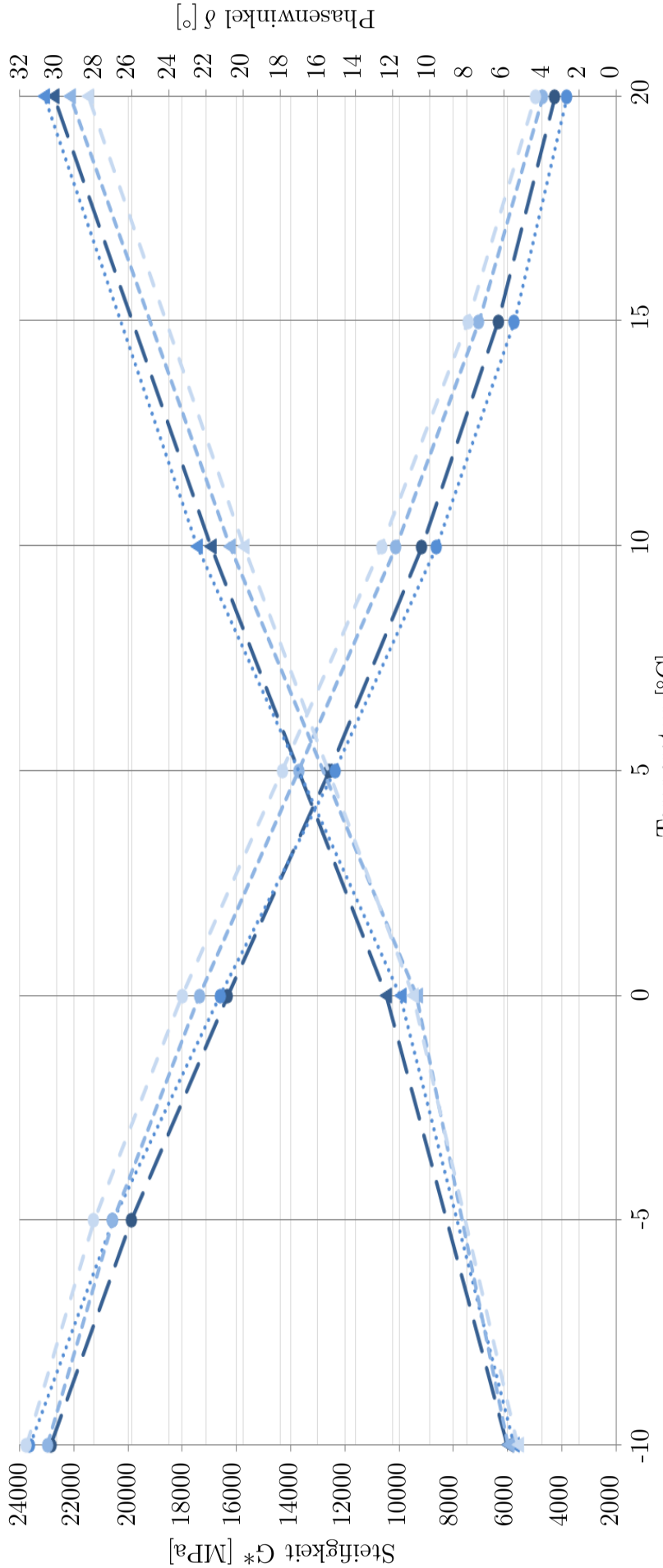


Abbildung 5.13.: Steifigkeiten und zugehörige Phasenwinkel nach Oxidationsversuchen, Bitumen 70/100

Die gemessenen Steifigkeiten und Phasenwinkel in Abbildung 5.13 korrelieren sehr gut mit den ermittelten Penetrationswerten in Abbildung 5.3. Die Messwerte der Nadelpenetration nach dem Mischvorgang bei 160 °C und der Oxidationsstufe 1 (V1) weisen nur sehr geringe Unterschiede auf. Bezieht man die Fehlerindikatoren mit ein, kann es zu einer Gleichheit einzelner Messwerte führen. Dies erklärt den sehr ähnlichen Verlauf der beiden Steifigkeits- und Phasenwinkelverläufe von Stufe (A) und Stufe 1. Berücksichtigt man die Messungenauigkeiten des Phasenwinkels von ± 1 °, kann durch eine 60 minütige Oxidation keine markante Veränderung des Phasenwinkels festgestellt werden. Bei den Stufen 2 (V2) und 3 (V3) ist eine deutliche Erhöhung der Steifigkeit in Kombination mit gleichzeitigem Abfall des Phasenwinkels erkennbar. Am deutlichsten ist dies im Temperaturbereich zwischen 0 °C und 15 °C zu erkennen. Ausgehend von -5 °C erhöht sich der Einfluss des Alterungsprozesses bis 10 °C und fällt anschließend wieder ab. Der Unterschied der Nadelpenetration zwischen V2 und V3 ist relativ gesehen am stärksten, hingegen ist die Veränderung der Steifigkeit zwischen Stufe (A) bzw. 1 und 2 am markantesten. Vergleicht man die Veränderung der Messerwerte mit den R&K Werten in Abbildung 5.1 kann auch hier die starke Veränderung zwischen Stufe (A) bzw. 1 und 2 nachvollzogen werden. Das Abfallen der Versprödungsgeschwindigkeit zwischen Stufe 2 und 3 korreliert mit den R&K Werten. Lediglich die Gleichheit der Steifigkeiten und Phasenwinkel zwischen Oxidationsstufe (A) und 1 korreliert nicht mit den R&K Werten in Abbildung 5.1.

Tabelle 5.7.: Relative und absolute Veränderung der Steifigkeit und des Phasenwinkels durch Oxidationsversuche, Bitumen 70/100

	Steifigkeit			**Phasenwinkel**		
Temperatur	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
-10	+	+/−	+/+	−	−/+	−/−
-5	+	+/+	+/+			
0	+	+/+	+/+	−	−/−	−/+
5	−	+/+	+/+			
10	−	+/+	+/+	+	−/−	−/−
15	−	+/+	+/+			
20	−	+/+	+/+	+	−/−	−/−

absolut/relativ

Kombinationsversuche, V4-V6:

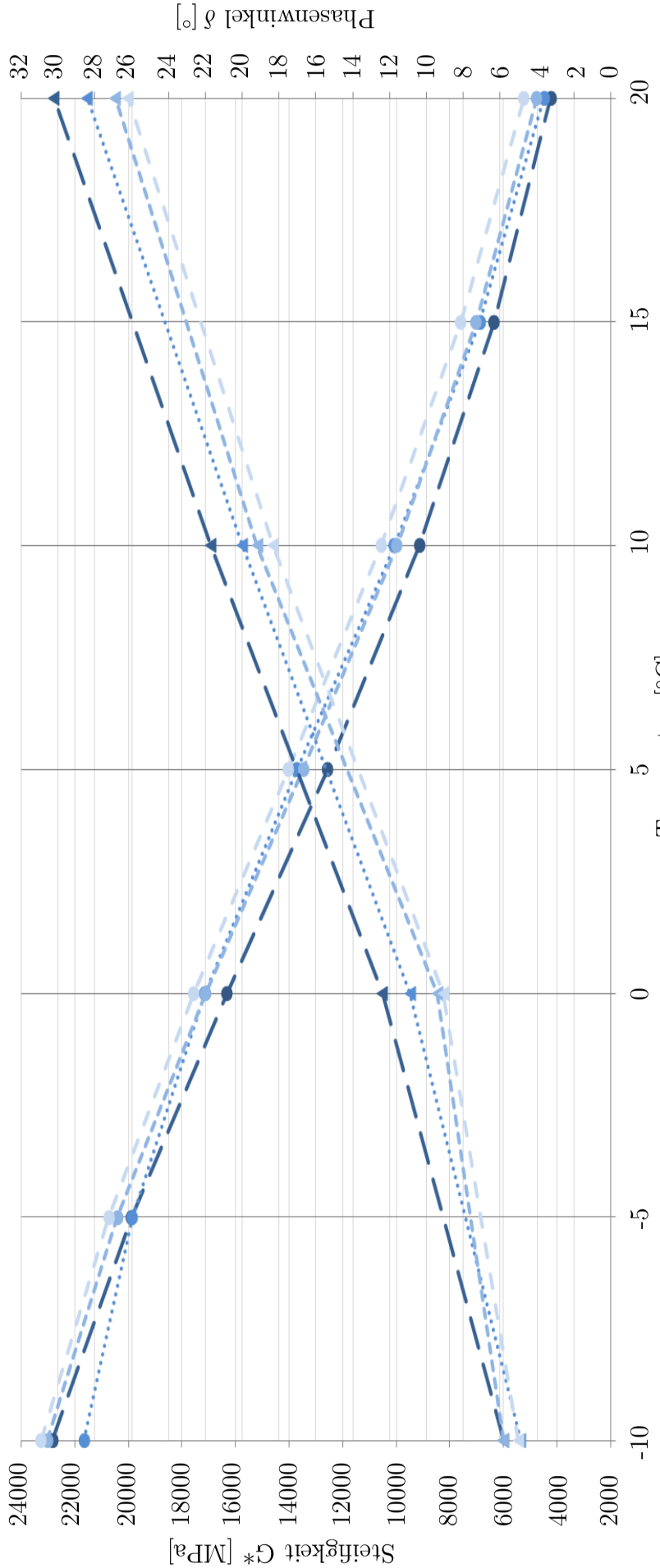


Abbildung 5.14.: Steifigkeiten und zugehörige Phasenwinkel nach Kombinationsversuchen, Bitumen 70/100

Die Kombinationsversuche in Abbildung 5.14 weisen Ähnlichkeiten mit den reinen Oxidationsversuchen auf. Eine Zunahme der Steifigkeit und ein abfallen des Phasenwinkels durch die Alterung ist eindeutig erkennbar, speziell im Bereich zwischen 0 °C und 15 °C. Im Gegensatz zu den Oxidationsversuchen liegen die Steifigkeiten der Stufen 1 (V4) und 2 (V5) nahezu auf einer Kurve. Dies entspricht einer Verschiebung von einer Versuchsstufe. Hingegen nimmt die Geschwindigkeit des Abfalls des Phasenwinkeln ausgehend von Stufe (A) mit fortschreitender Versuchsdauer ab (0 °C bis 20 °C). Wie in Abschnitt 5.6.3 beschrieben, soll hier noch einmal auf die Unabhängigkeit von Steifigkeit und Phasenwinkel hingewiesen werden. Vergleicht man die Kurven aus Abbildung 5.14 mit den Messwerten von R&K in Abbildung 5.1 ist keine Korrelation ersichtlich, da laut den Ring- und Kugelwerten die Kurven der Stufe (A) und 1 (V4) viel geringere Differenzen aufweisen müssten als Stufe 2 (V5) und 3 (V6). Die Betrachtung der Penetrationswerte in den Alterungsstufen in Abbildung 5.3 und Abbildung 5.14 zeigen, dass die geringe Veränderung der Steifigkeit zwischen Stufe 1 (V4) und 2 (V5) mit den geringen Abfall der Penetration korreliert. Der starke Penetrationsabfall von Stufe 2 (V5) auf 3 (V6) spiegelt sich in Abbildung 5.14 nicht wieder. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Kombinationsversuche größere Auswirkungen auf den Phasenwinkel im Temperaturbereich zwischen 0 °C und 20 °C haben wie auf die Steifigkeit. Das Abfallen des Phasenwinkels zeigt eine Verschiebung in den elastischen Bereich. In [19] wurde gezeigt, dass die Testfrequenz einen großen Einfluss auf den gemessenen Phasenwinkel hat (vergleiche Frequenzsweep DSR Abschnitt 6.4).

Tabelle 5.8.: Relative und absolute Veränderung der Steifigkeit und des Phasenwinkels durch die Kombinationsversuche, Bitumen 70/100

	Steifigkeit			**Phasenwinkel**		
Temperatur	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
-10	-	=/+	+/+	-	=/+	-/-
-5	=	+/+	+/+			
0	+	+/=	+/+	-	-/-	-/+
5	+	+/=	+/+			
10	+	+/=	+/+	-	-/-	-/-
15	+	+/=	+/+			
20	+	+/+	+/+	-	-/-	-/-

absolut/relativ

5.6.4.2. PmB 45/80 - 65 (B520)

Oxidationsversuche, V1-V3:

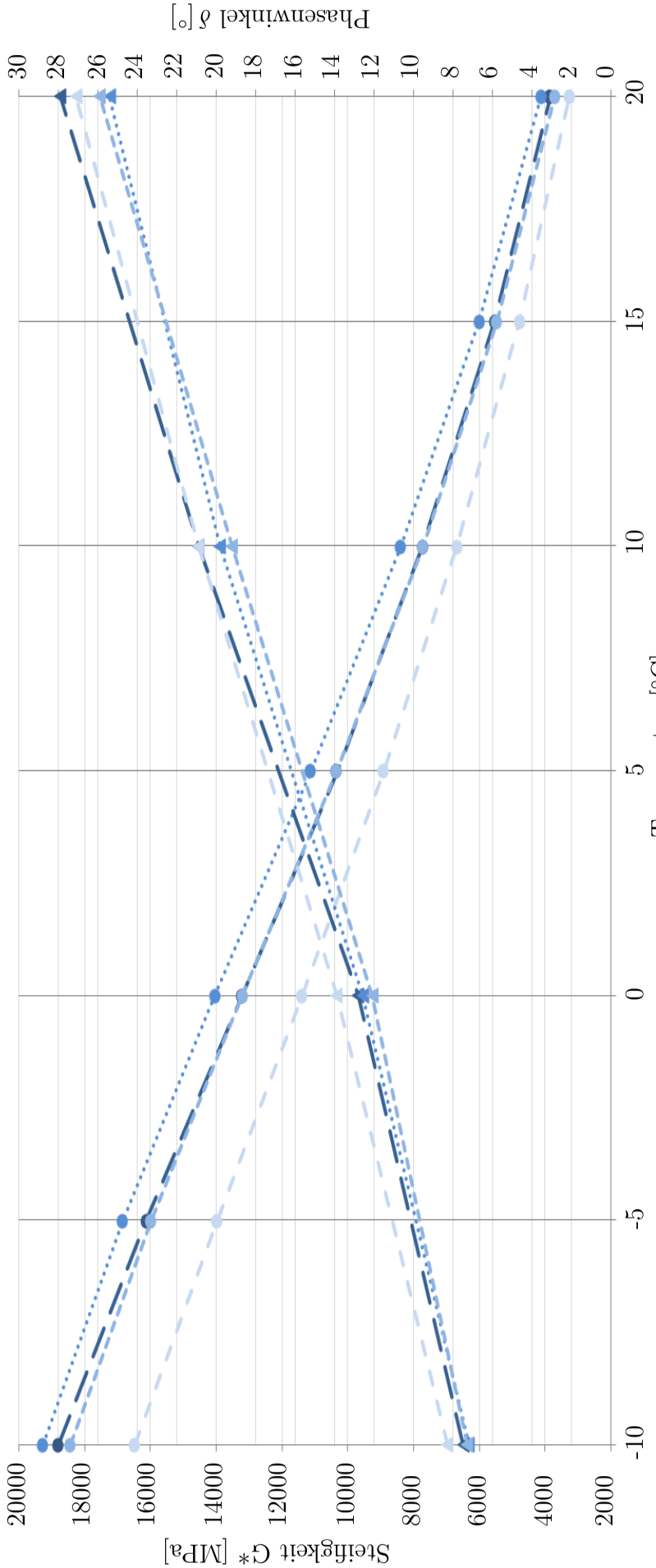


Abbildung 5.15.: Steifigkeiten und zugehörige Phasenwinkel nach Oxidationsversuchen, B520

Abbildung 5.15 zeigt den Verlauf der Steifigkeits- und Phasenwinkelveränderung in Abhängigkeit der Oxidationsdauer. Nach Versuchsstufe 1 ist die Steifigkeit der Probekörper im gesamten Temperaturbereich angestiegen, gleichzeitig erhöht sich der elastische Anteil im Bereich zwischen 0 °C und 20 °C. Mit Zunahme der Temperatur nimmt der Phasenwinkel stärker ab. Mit fortschreitender Oxidationszeit (Stufe 1 auf Stufe 2) fällt die gemessene Steifigkeit auf die Ausgangskurve zurück, jedoch bei wesentlich höherem elastischen Anteil im Temperaturbereich von 0 °C bis 20 °C. Die Messungen nach Oxidationsstufe 3 (V3) zeigen einen relativ starken Steifigkeitsverlust, mit Abnahme der Prüftemperatur nimmt der Verlust zu. Gegenläufig ist die Messung des Phasenwinkels, im Bereich 10 °C bis 20 °C nähert sich dieser der Ausgangskurve an. Mit fallender Temperatur $\leq$ 10 °C nimmt der Phasenwinkel zu und erhöht somit den viskosen Anteil. Je geringer die Messtemperatur, desto stärker ist die Abnahme der Steifigkeit von Stufe 3 (V3). Die Abbildung 5.7 lässt darauf schließen, dass die Oxidationsstufe 1 (V1) ähnliche Belastungen wie die RTFOT Alterung simuliert. Vergleicht man die Abbildungen 5.15 und 6.7, ist in beiden ein Anstieg der Steifigkeit zwischen ungealterten Probekörpern und Oxidationsstufe 1 (V1) im gemessenen Temperaturbereich erkennbar. Der Unterschied zwischen den beiden Abbildungen ist, die Stärke der Zunahme in Abhängigkeit der Prüftemperatur. Bei der Oxidation von Mischgut steigt die relative Zunahme der Steifigkeit mit sinkender Prüftemperatur, gegenläufig ist das Verhalten in Abbildung 5.7. Die Phasenwinkel des ungealterten Probekörpers und der Oxidationsstufe 1 (V1) sind im Temperaturbereich von -10°C und 0 °C quasi ident. Danach nimmt der Phasenwinkel der Oxidationsstufe 1 (V1) mit zunehmender Temperatur immer stärker ab (Vergleiche Abbildung 6.7). Dieses Verhalten wird auf die Degradation des SBS durch die Oxidation oder auf eine mangelnde Homogenisierung im Herstellungsprozess zurück geführt, obwohl der vernetzende Einfluss des PmBs erst ab zirka 30 °C zum Tragen kommen sollte (siehe [19]). Die gemessenen Steifigkeiten der Oxidationsstufe 2 decken sich mit den Ausgangssteifigkeiten, bei abweichenden Phasenwinkeln. Der Trend der Abnahme der Steifigkeit von V1 auf V2 setzt sich von V2 auf V3 in stärkerem Ausmaß fort. Wobei der relative Unterschied der Steifigkeitszunahme mit zunehmender Temperatur sinkt. Der Phasenwinkel der Oxidationsstufe 3 (V3) liegt im Temperaturbereich zwischen -10 °C und 5 °C über den der Stufe (A), was mit geringerer Steifigkeit korreliert. Zwischen 10 °C und 20 °C fällt dieser jedoch wieder unter den der Stufe (A) ab. Abbildung 6.7 zeigt, dass der Abfall des Phasenwinkels (10 Hz) bei ungealterten PmB 45/80-65 (B520) und der RTFOT Alterung am stärksten zwischen 20 °C und 50 °C zum Tragen kommt (Einfluss von SBS siehe Abbildung 6.5).

Mögliche Erklärungen:

- Inhomogenität des PmBs (siehe Abschnitt 4.2)
- Degradation des SBS. Mit zunehmender Alterung (Oxidation) verliert das SBS beziehungsweise der Verbund mit dem Bitumen seine Wirkung (siehe Abschnitt 1.5).
- Gebrauchsspanne in der SBS wirkt
- Einfluss der Gesteinskörnung auf die Steifigkeit und den Phasenwinkel.

Tabelle 5.9.: Relative und absolute Veränderung der Steifigkeit und des Phasenwinkels durch die Oxidationsversuche, B520

	Steifigkeit			**Phasenwinkel**		
Temperatur	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
-10	+	-/-	-/-	-	-/=	+/+
-5	+	-/-	-/-			
0	+	=/-	-/-	-	-/-	+/+
5	+	=/-	-/-			
10	+	=/-	-/-	-	-/-	=/+
15	+	-/-	-/-			
20	+	-/-	-/-	-	-/+	-/+

absolut/relativ

Kombinationsversuche, V4-V6:

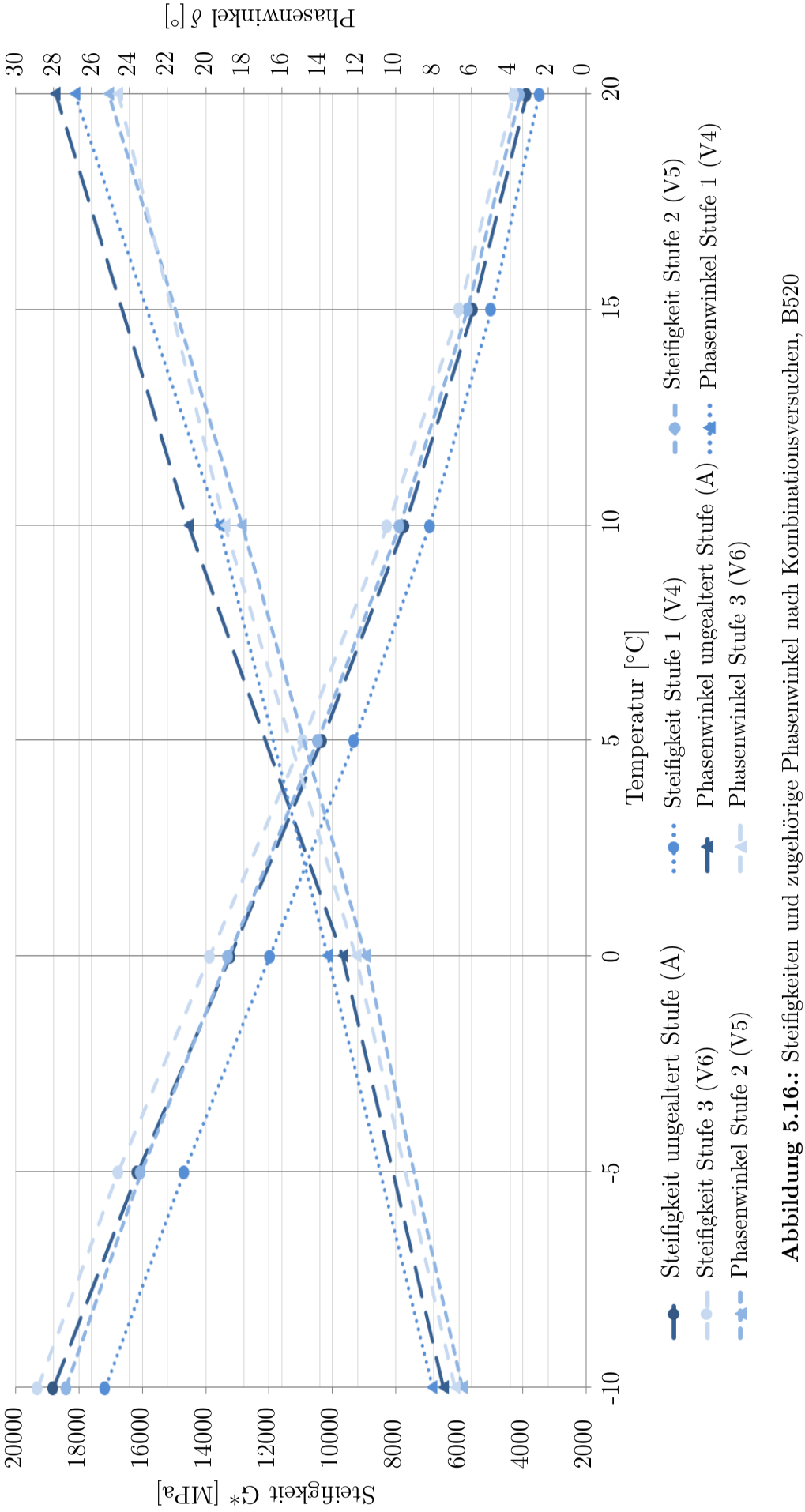


Abbildung 5.16.: Steifigkeiten und zugehörige Phasenwinkel nach Kombinationsversuchen, B520

Die Veränderung der Steifigkeit durch die Kombinationsversuche in Abbildung 5.16 ist gegenläufig zur Steifigkeitsveränderung im Oxidationsversuch. In der Versuchsstufe 1 fällt die Steifigkeit deutlich ab. Die Stärke der Abnahme nimmt mit fallender Temperatur zu. Der Phasenwinkel verhält sich differenzierter, im Temperaturbereich ≥ 5 °C fällt dieser ab, ≤ 5 °C steigt dieser im Vergleich zur Versuchsstufe 1 an. In beiden Versuchen, Oxidations- und Kombinationsversuch ist die Steifigkeit der Versuchsstufe 2 ident mit der Kurve der Ausgangssteifigkeit. Auch der Phasenwinkel ist in beiden Versuchen in der Oxidationsstufe 2 am geringsten und nimmt mit zunehmender Temperatur ab (elastischer Anteil erhöht sich). Gegenläufig verhält sich die Versuchsstufe 3 der beiden Versuchsabläufe. Während im Oxidationsversuch die Steifigkeit unter der Ausgangssteifigkeit bei leichter Erhöhung des Phasenwinkels im Temperaturbereich -10 °C und 10 °C liegt, steigt die Steifigkeit im Kombinationsversuch bei abfallendem Phasenwinkel. Der starke Steifigkeitsabfall von Stufe 1 korreliert mit dem starken Abfall des Penetrationswertes in Abbildung 5.7. Die übrigen Penetrationswerte korrelieren ebenfalls. Die gemessenen Werte der elastischen Rückstellung (siehe Abbildung 5.9) zeigen eine Degradation des SBS bzw. Verbindung zwischen SBS und Bitumen. In [1] wurden die Auswirkung der RTFOT sowie Pressure Aging Vessel (PAV) Alterung auf den komplexen Modul sowie auf den Phasenwinkel von zwei SBS modifizierten Bitumen (7 m% SBS) untersucht. Vergleicht man diese Ergebnisse, unter der Annahme, dass die Kombinationsversuchsstufe 2 und 3 (siehe Tabelle 7.2) sehr gut mit der Versprödung durch den RTFOT korrelieren, kann kein ähnliches Verhalten des Materials in Bezug auf die Steifigkeit abgeleitet werden. Im Temperaturbereich von 20 °C aufwärts, korrelieren die Messergebnisse teilweise in Bezug auf den Phasenwinkel. Die Verringerung der Steifigkeit in Stufe 1 wird mit einer Neuordnung beziehungsweise Degradation des SBS Copolymers in leichtere Molekülfraktionen mit einem einhergehenden erweichen erklärt. Der Anstieg von Stufe 1 zu 2 und 3 kann auf die Interaktion zwischen Grundbitumen und Polymer zurück geführt werden. [1] zeigt ebenfalls, dass im Temperaturbereich von 10 °C bis 35 °C die Eigenschaften des Grundbitumens dominieren.

Tabelle 5.10.: Relative und absolute Veränderung der Steifigkeit und des Phasenwinkels durch die Kombinationsversuche, B520

	Steifigkeit			**Phasenwinkel**		
Temperatur	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
-10	-	-/+	+/+	+	-/-	-/+
-5	-	-/+	+/+			
0	-	=/+	+/+	+	-/-	-/+
5	-	=/+	+/+			
10	-	+/+	+/+	-	-/-	-/+
15	-	+/+	+/+			
20	-	+/+	+/+	-	-/-	-/-

absolut/relativ

5.6.5. Unterschied Oxidations- und Kombinationsversuche

Die Alterung des Bitumens ist ein sehr komplexer Prozess mit vielen Einflussfaktoren. Daher kann mit einer linearen Steigerung der Oxidationszeit und einhergehenden Versprödung kein linearer Anstieg bzw. Abfall der Steifigkeit und des Phasenwinkels erwartet werden. Sehr großen Einfluss hat die Mischtemperatur. Bei höheren Temperaturen kann es zu einer besseren Umschließung der Gesteinskörnung bei gleichzeitiger Erhöhung der Oxidation kommen. Im Speziellen durch die Veränderung der Temperatur ist es schwierig genaue Aussagen bzw. Vergleiche zwischen den einzelnen Versuchen zu treffen. Bei hoch modifizierten Bindemitteln ist mit voranschreitender Alterung eine Verschiebung der Steifigkeitsanteile in den viskosen Bereich zu beobachten. Die auftretende Erweichung wird auf die SBS Degradation zurück geführt [1]. Durch die Messungenauigkeiten des Phasenwinkels von $\pm$ 1 ° können die Veränderungen in den einzelnen Versuchsstufen lediglich als Trend der Versprödung interpretiert werden.

6. Ergebnisse Laboruntersuchungen TU Wien

Für sämtliche, an der TU Wien durchgeführten Untersuchungen kam PmB 45/80-65, welches durch die Modifikation von Bitumen 70/100 mit 4,3 m% SBS hergestellt wurde, zur Anwendung. Im Vergleich zu den im TPA Labor Köln durchgeführten Prüfungen (Bindemittelbezug über deutschen Bitumenhändler), ist der prozentuale Polymeranteil im Bindemittel genau bekannt. Das Bindemittel PmB 45/80-65 (4,3 m% SBS) wird im Weiteren mit dem Laborcode B533 abgekürzt.

6.1. Einfluss der STA Mischgutalterungsversuche auf den Erweichungspunkt Ring und Kugel, B533

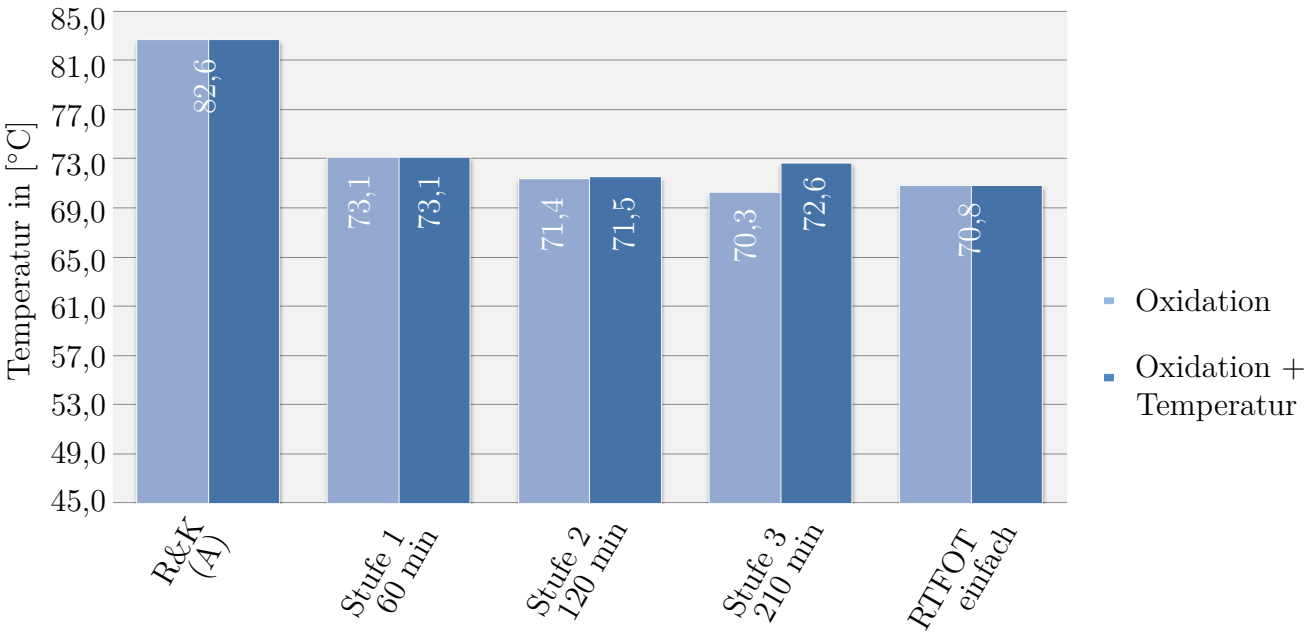


Abbildung 6.1.: Veränderung der Ring- und Kugelwerte B533

Die Messwerte nach den Oxidations- (V1-V3) und Kombinationsversuchen (V4-V6) weisen in den Alterungsstufen eine geringe Ergebnisabweichung zwischen den Versuchsabläufen auf. Bei den Untersuchungen erfolgte keine explizite Bestimmung der durch den Mischvorgang verursachten Versprödung (vergleiche Untersuchungen B520). Aus den Erfahrungen in Abschnitt 5.3 kann geschlossen werden, dass der starke Abfall des R&K Wertes vom

Frischbitumen (A) zu den Alterungsstufen teilweise durch den Mischvorgang und die dabei ablaufenden Alterungsvorgänge erfolgte (vergleiche Abbildung 5.5 mit 6.1). Der Trend des abfallenden R&K Wertes nach dem Mischvorgang ist bei beiden PmBs (B520 und B533) vergleichbar. Die Messwerte nehmen im Mittel bei den Oxidationsversuchen (V1-V3) stetig ab. Bei den Kombinationsversuchen (V4-V6) sinken die R&K Werte von V4 auf V5 und steigen von V5 auf V6 geringfügig an. Unter Berücksichtigung der Genauigkeit des Ring- und Kugelversuches bei PmBs können lediglich Trends bestimmt werden, da die Veränderungen sehr gering sind. Für eine genauere Beschreibung des Materialverhaltens wurden Penetrations- und DSR Versuche durchgeführt und abgeglichen. Markant ist, das differenzierte Verhalten der Messwerte beider polymermodifizierter Bindemittel (vergleiche B520 und B533) nach dem RTFOT. Bei dem Bindemittel (B533), bildet der RTFOT die Kurzzeitalterung gut ab (vergleiche Messergebnisse RTFOT mit Alterungsversuchen Stufe 1 bis 3). Im Gegensatz sind die R&K Messwerte bei dem getesteten Bindemittel in Abschnitt 5.3 stark abweichend (vergleiche RTFOT Abbildung 5.5). Die Entwicklung der R&K Wert nach dem RTFOT bezogen auf die des Frischbitumens zeigen einen gegenläufigen Trend bei den getesteten polymermodifizierten Bindemitteln (vergleiche R&K Werte Abbildung 5.5 und 6.1). Der Vergleich zwischen den beiden PmBs zeigt, ein stark differenziertes Verhalten im Alterungsprozess. Dieses abweichende Verhalten sind mit der PmB Zusammensetzung erklärbar. Rohöl, welches als Ausgangsprodukt für die getesteten Bindemittel dient, ist ein Naturprodukt dessen Eigenschaften stark von der Rohölprovenienz abhängig sind. Durch die Modifikation mittels verschiedener Polymertypen können gewisse Eigenschaften positiv beeinflusst werden, jedoch bleibt das Ausgangsprodukt für das polymermodifizierte Bitumen maßgebend am Gebrauchsverhalten beteiligt. Daher weisen sämtliche PmBs (Variationen von Grundbitumen und Polymer) abweichende Eigenschaften im Alterungsverhalten auf. Beide getestete Bindemittel (B520 und B533) entsprechen den Anforderungen nach Tabelle 1.4. Durch die Modifikation mittels SBS ist zwischen 3 m% und 6 m% ein deutlicher Anstieg des R&K Wertes zu erwarten (siehe Abbildung 1.16). Ausgehend von dem Wissen über den Polymergehalt des B533 (4,3 m%) wird der SBS Gehalt im B520 aufgrund der gemessenen Laborergebnisse in Kombination mit den Fluoreszenzmikroskopieaufnahmen ≤ 4 m% eingeschätzt. Die verschiedenen SBS Gehälter sowie qualitativen Verteilungen (Homogenitäten) bilden die Grundlage für die teilweise abweichenden Materialverhalten während der STA Mischgutalterungsversuche und des RTFOT.

Tabelle 6.1.: Absolute Veränderung der Ring- und Kugelwerte nach den Oxidationsversuchen

Versuchsdauer [min]	Absolute Veränderung [%]
B533 (A) - RTFOT	-14,3
60-120	-2,3
120-210	-1,5

6.2. Einfluss der STA Mischgutalterungsversuche auf die Nadelpenetration, B533

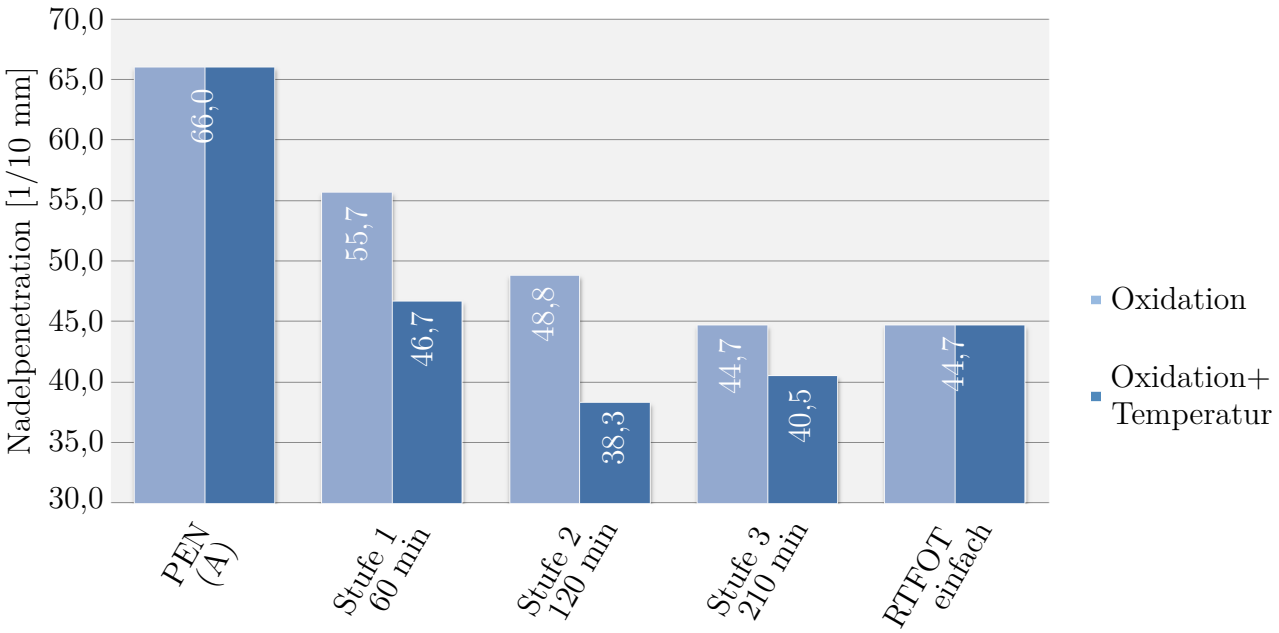


Abbildung 6.2.: Veränderung der Nadelpenetration B533

Die Veränderung der Penetrationswerte, aufgrund der Materialversprödung und Versteifung zeigen eine starke Abhängigkeit der Messwerte von der Versuchsart (reiner Oxidationsversuch bzw. Kombinationsversuch). Die Versuchsstufen 1 und 2 lassen einen abnehmenden Trend bei beiden Versuchsabläufen mit zunehmender Versuchsdauer erkennen. Der Oxidationsversuch V3 setzt den abnehmenden Trend fort. Ein leichter Anstieg (+ 0,22 mm) des Penetrationswertes ist im Kombinationsversuch von V5 auf V6 ersichtlich (Verhalten ist gegenläufig zu B520). Die beiden getesteten polymermodifizierten Bindemittel weisen eine mittlere bis hohe Korrelation im Versprödungsverhalten hinsichtlich Nadelpenetration auf (vergleiche Abbildung 5.7 und 6.2). Beide Bindemittel besitzen im ungealterten Zustand (Frischbitumen) sowie nach dem RTFOT einen fast identen Penetrationswert, bei stark abweichenden Ring- und Kugelwerten. In Abschnitt 1.4 wird eine geringe Abnahme der PEN Werte des Grundbitumens (A) durch die Modifikation mittels SBS beschrieben. Durch eine Vielzahl an Messungen (siehe Abschnitt 3.3) wurde gezeigt, dass das Grundbitumen einen stärkeren Einfluss auf die PEN als auf die R&K Werte hat (siehe Abschnitt **??**). Diese Feststellung stützt die Annahme des geringeren SBS Gehaltes von ≤ 4 m% von B520 als B533. Auf Grundlage der gemessenen Penetrationswerte (A) des B533 sowie des B520 und des Wissens über das verwendete Grundbitumen (70/100) beim B533 wurde auch das Grundbitumen des B520 der Bitumenklasse 70/100 zugeordnet.

Tabelle 6.2.: Absolute Veränderung der Nadelpenetration nach den Oxidationsversuchen

Versuchsdauer [min]	Absolute Veränderung [%]
B533 (A) - RTFOT	-32,3
60-120	-12,4
120-210	-8,4

6.3. Einfluss der STA Mischgutalterungsversuche auf die elastische Rückstellung, B533

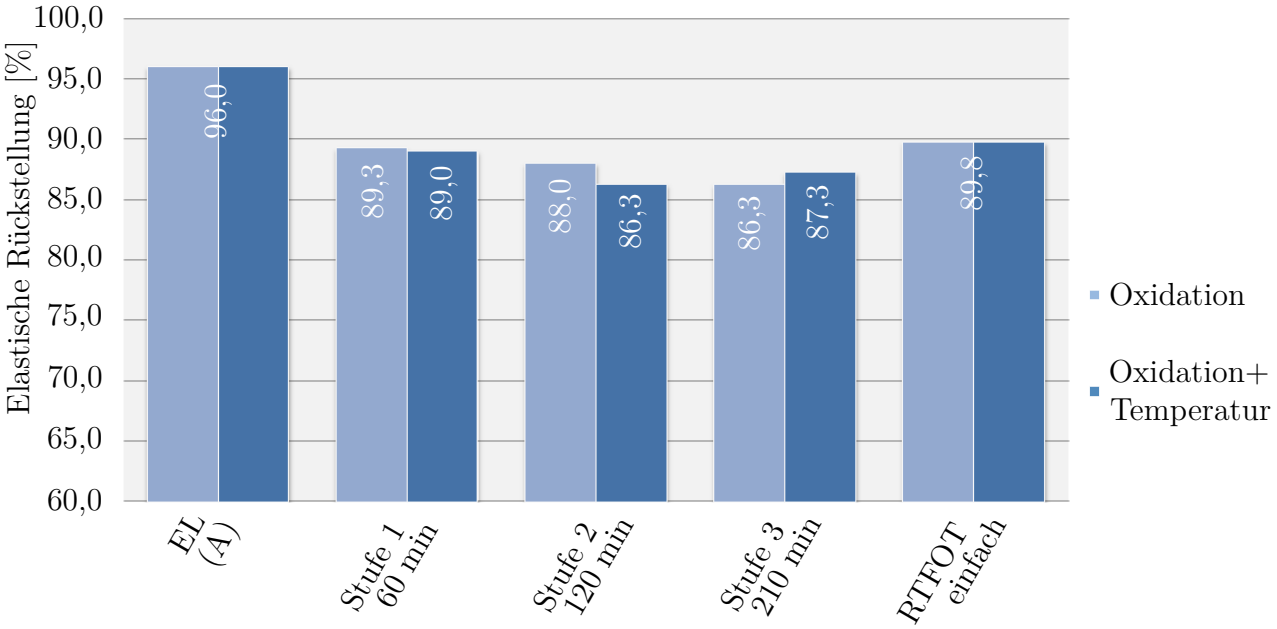


Abbildung 6.3.: Veränderung der elastischen Rückstellung B533

Im Vergleich der beiden PmBs, weist das B533 bessere elastische Eigenschaften in den einzelnen Alterungsstufen auf, was wiederum die Schätzung des SBS Gehaltes sowie die Zuordnung des Grundbitumens stützt (vergleiche Abbildung 5.9 und 6.3). Neben dem höheren Prozentsatz beim Frischbitumen, ist die Ergebnisstreuung geringer. Grund ist die bessere Vernetzung, Homogenität der Verteilung des Polymers (siehe Abschnitt 4.2.1) und der höhere Polymergehalt. Der RTFOT bildet die Kurzzeitalterung für die Alterungsstufe V1 und V4 bei diesem Bindemittel gut ab.

Tabelle 6.3.: Absolute Veränderung der elastischen Rückstellung nach den Oxidationsversuchen

Versuchsdauer [min]	Absolute Veränderung [%]
B533 (A) - RTFOT	-6,5
60-120	-1,5
120-210	-1,9

6.4. DSR Untersuchungen zu den STA Mischgutalterungsversuchen

Für die Bereitstellung einer breiteren Interpretationsgrundlage in Bezug auf die Veränderung der Materialeigenschaften (Versprödung und Versteifung) während der STA Mischgutalterungsversuche (Alterungsprozess) wurden DSR Messungen für das Bindemittel B533 und ein Vergleichsbindemittel B534 (A) durchgeführt.

Das in breiten Temperaturbereichen linear visko-elastische Verhalten des Bitumens bildet die Grundlage für die DSR Untersuchungen. Das DSR Messprinzip wird in [58] wie folgt beschrieben

Eine bekannte oszillierende Spannung wird an die temperaturgeregelte Prüfgeometrie angelegt, in der sich der bitumenhaltige Probekörper befindet. Die Verformung des Bindemittels als Reaktion auf die Spannung wird gemessen. Alternativ dazu kann auf den Probekörper eine bekannte oszillierende Verformung angewendet und die hervorgerufene Scherspannung gemessen werden.

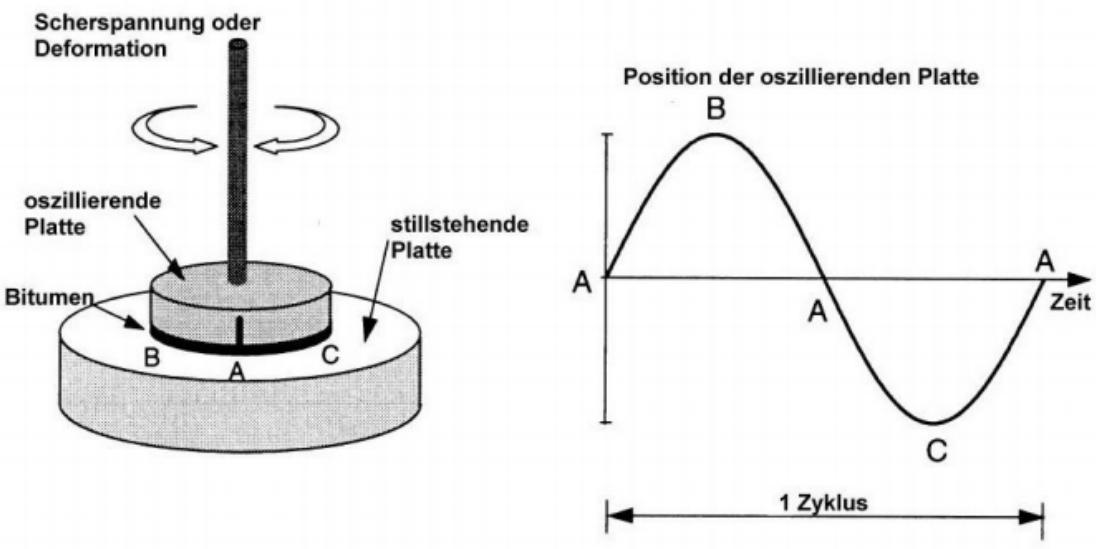


Abbildung 6.4.: DSR Versuchsanordnung und Ablauf nach [26]

Bautechnische relevante Vorteile von DSR-Untersuchungen (Ergänzungen zu konventionellen Bitumenprüfungen)

Durch die Feld- beziehungsweise Laboralterung kommt es zu einer Veränderung der Materialeigenschaften (siehe Abschnitt 1.3). Mit Hilfe von DSR-Untersuchungen wird das Materialverhalten des Bitumens über einen breiten Temperaturbereich in Abhängigkeit von variierenden Testfrequenzen bestimmt. Für einen definierten Messbereich wird für jede Messtemperatur ein spezifischer G* (Komplexer Schubmodul - Steifigkeit) sowie ein zugehöriger Phasenwinkel ermittelt. Mit Hilfe des Phasenwinkels ist es möglich, die viskosen beziehungsweise elastischen Anteile der Steifigkeit zu bestimmen (siehe Abbildung 5.12). Durch die Materialveränderung (Alterung) verschieben sich diese Anteile, welche für den Herstellungsprozess (Mischvorgang, Einbau etc. - Viskosität) sowie für die Dauerhaftigkeit der Dichtung von großer Bedeutung sind. Bitumen mit gleichen Steifigkeiten können unterschiedliche Phasenwinkel und somit Variationen an viskosen und elastischen Anteilen aufweisen. DSR-Untersuchungen bilden das Verhältnis dieser Anteile über den Temperaturmessbereich ab und sind daher für eine genaue Planung der Dichtungseigenschaften nach der Herstellung sowie während der Liegezeit von großer baupraktischer Bedeutung. Ein Vorteil dieser Prüfmethode gegenüber den konventionellen Bitumenprüfungen ist die Anwendbarkeit auf nicht modifizierte als auch auf modifizierte Bitumen. Gleichzeitig ist der Materialaufwand und die benötigte Prüfzeit sehr gering. DSR Prüfungen sollten zukünftig im Wasserbau eine Erweiterung für die Eignungsprüfung in Kombination mit dem entwickelten STA Mischgutalterungsversuch darstellen. Mit der Kombination des Kurzzeitalterungsversuches und Bitumenprüfungen mittels DSR, PEN, R&K und Ela.R. lässt sich die Herstellungsbedingte Versprödung sehr gut prognostizieren. Auf Grundlage dieser Untersuchungen ist es möglich eine dem Bauvorhaben entsprechend angepasste Transport- und Einbauvorschrift zu erstellen. Werden während- und nach der Dichtungsherstellung Bitumenproben genommen, lässt sich eine genaue Bestimmung der Materialversprödung und Versteifung während des STA sowie LTA durchführen. Der Dichtungszustand (Bitumeneigenschaften) kann mittels DSR Untersuchungen zu einem beliebigen Zeitpunkt eindeutig festgestellt werden, was für die Abnahme (Übergabe Auftragnehmer - Auftraggeber) beziehungsweise Kontrolle der Herstellung sowie für etwaige Sanierungsmaßnahmen von großem Vorteil ist.

Diverse Studien wie [10] und [32] beschäftigten sich mich dem Zusammenhang zwischen DSR Messwerten und der Nadelpenetration, dem Erweichungspunkt R&K sowie der elastische Rückstellung. Die folgende Formel nach [13] beschreibt exemplarisch den Zusammenhang zwischen dem komplexen Modul G* und der Nadelpenetration.

$$log(G^*_{T=25řC,f=0,4Hz}) = 2,923 - 1,9log(PEN) \tag{6.1}$$

Diese durch Untersuchungen entstandenen empirischen Formeln dienen lediglich als Hilfsmittel und können keine Laborprüfung ersetzen. Bei DSR Messungen von polymermodifi-

zierten Bitumen (SBS) bilden sich vier deutliche erkennbare Bereiche aus (siehe Abbildung 6.5, rechts). [20]

- Fließender Bereich, die Eigenschaften hängen hauptsächlich von der Viskosität ab
- Plateau, G* ist mehr oder weniger unabhängig von der Frequenz (Temperatur)
- Übergangsbereich
- Glasartiger Bereich, die physikalisch-chemischen Eigenschaften werden vollständig vom Bitumen gesteuert

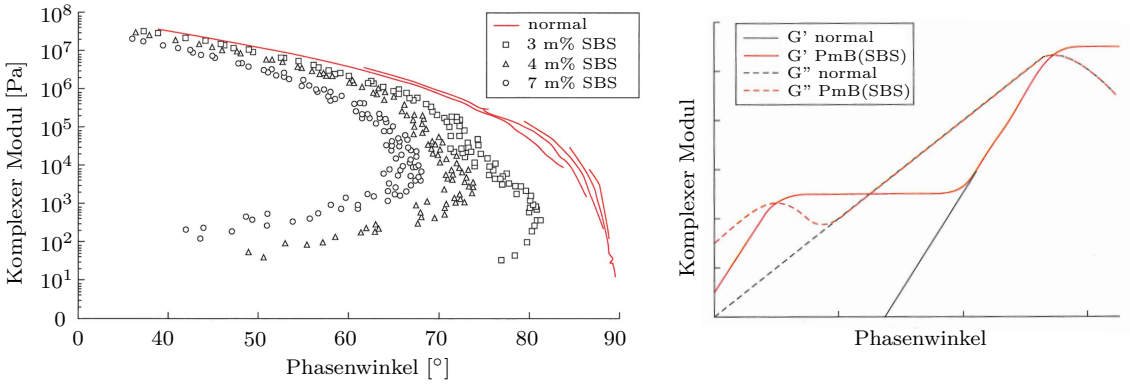


Abbildung 6.5.: links.) Einfluss des steigenden SBS Gehalts auf die rheologischen Eigenschaften des Bitumens, rechts.) viskose und elastische Anteile für modifizierte und unmodifizierte Bitumen [20]

Abbildung 6.6 zeigt die Veränderungen der Steifigkeit und des Phasenwinkels in Abhängigkeit der Temperatur durch die Modifikation eines Bitumen 70/100 mittels SBS.

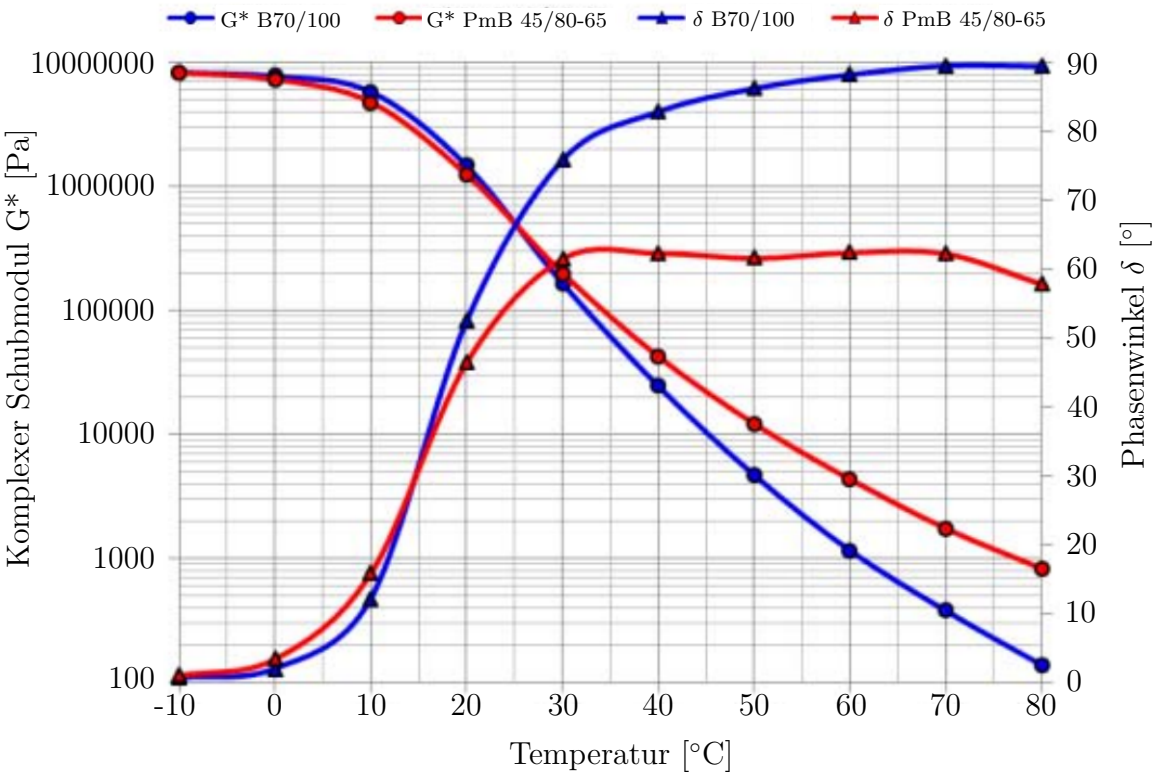


Abbildung 6.6.: DSR -10 bis +80°C - Vergleich 1 Hz - 70/100 versus PmB [19]

In Abbildung 6.7 sind die tendenzielle Veränderung der Steifigkeit und des Phasenwinkels eines PmB 45/80-65 in den Stufen (A), LRTF und eines dreifachen RTFOT (L3RT) dargestellt. Sehr gut ist die Zunahme der Steifigkeit sowie die Abnahme des Phasenwinkels mit fortschreitendem Alterungszustand im Bereich zwischen 10°C und 70°C erkennbar.

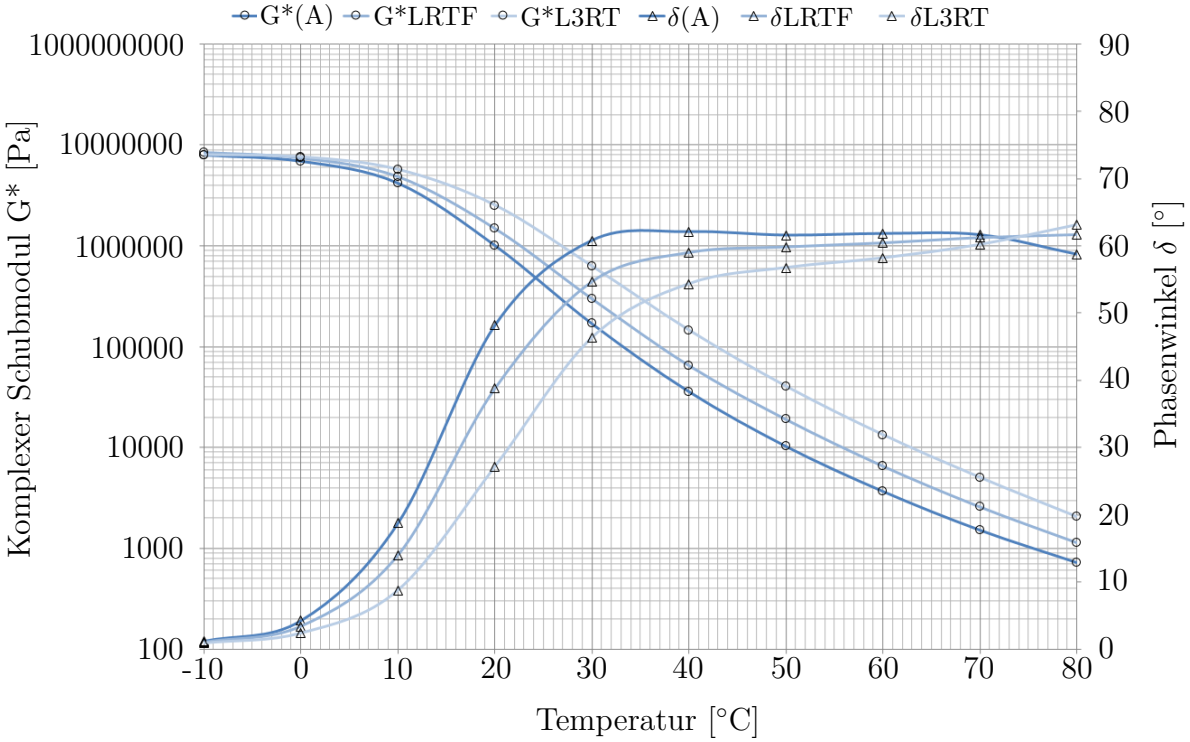


Abbildung 6.7.: DSR -10 bis +80°C bei 1 Hz - Veränderung Steifigkeit und Phasenwinkel nach Laboralterung [19]

6.4.1. DSR Messungen B533

Die Diagramme 6.8, 6.10 und 6.11 zeigen die Verläufe der Steifigkeiten und Phasenwinkel des B533 im Temperaturbereich von -10°C bis 80°C für die Testfrequenzen 1 Hz, 1,59 Hz und 10 Hz. Die von rechts nach links ansteigenden Kurven in den DSR Diagrammen zeigen die Veränderungen der Steifigkeiten, jene Kurven die von links nach rechts ansteigen die Veränderungen des Phasenwinkels (gilt für gesamte Arbeit).

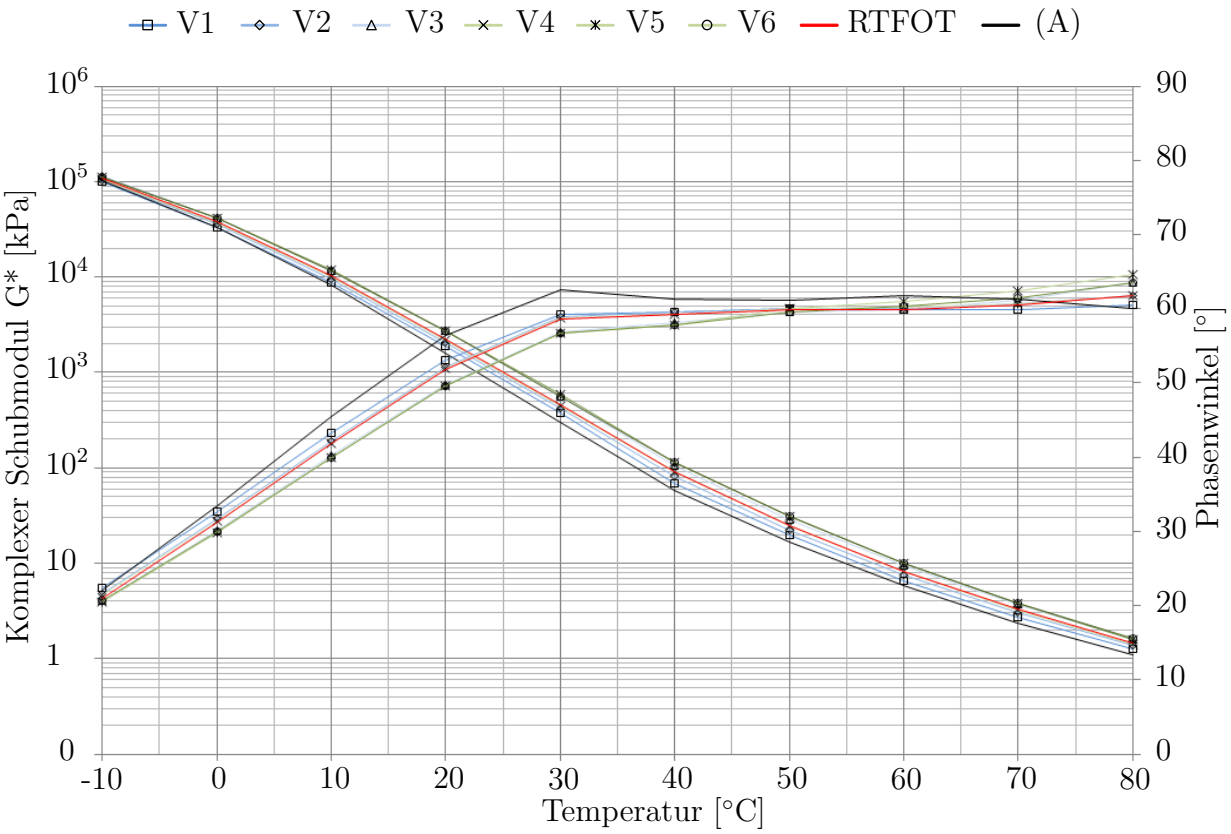


Abbildung 6.8.: DSR 1 Hz in den Laboralterungsstufen V1 - V6, B533;

Durch die getrennten Versuchsabläufe zwischen den Oxidationsversuchen mit konstanter Temperatur (V1 - V3) und den Kombinationsversuchen mit variierenden Starttemperaturen (V4 - V6) ist es möglich, den Einfluss der Temperatur auf die Kurzzeitalterung (Versprödung) separat zu untersuchen. Für die reinen Oxidationsversuche zeigt sich ein Anstieg der Steifigkeit über den gesamten Temperaturmessbereich bei gleichzeitigem Abfall des Phasenwinkels (-10°C - 40°C) mit zunehmender Versuchsdauer ($T_{V1}<T_{V2}<T_{V3}$). Der Unterschied in der Oxidationsdauer beträgt zwischen V1 und V2 60 min, zwischen V2 und V3 90 min, diese Steigerung zeigt sich in einer verstärkten Zunahme der Steifigkeit (10°C - 80°C) sowie bei einem verstärkten Abfall des Phasenwinkels (-10°C - 40°C). Im Temperaturbereich von 40°C - 80°C bildet sich beim Phasenwinkel ein für SBS modifizierte Bitumen typisches Plateau (vgl. Abbildung 6.5 und 6.7). Abbildung 6.12 zeigt eine Gegenüberstellung der Messwerte in Abhängigkeit der Messfrequenzen für den Temperaturbereich von 10°C - 30°C. Deutlich ersichtlich ist, dass die Materialantwort (Steifigkeit und Phasenwinkel) frequenzabhängig ist (siehe auch Abbildung 6.9). Die auf Grund der

Alterung ersichtlichen Trends sind in den drei Frequenzbereichen ident, jedoch bei 1,59 Hz am besten aufgelöst, daher beziehen sich die Interpretationen hauptsächlich auf die Messergebnisse der Frequenz 1,59 Hz.

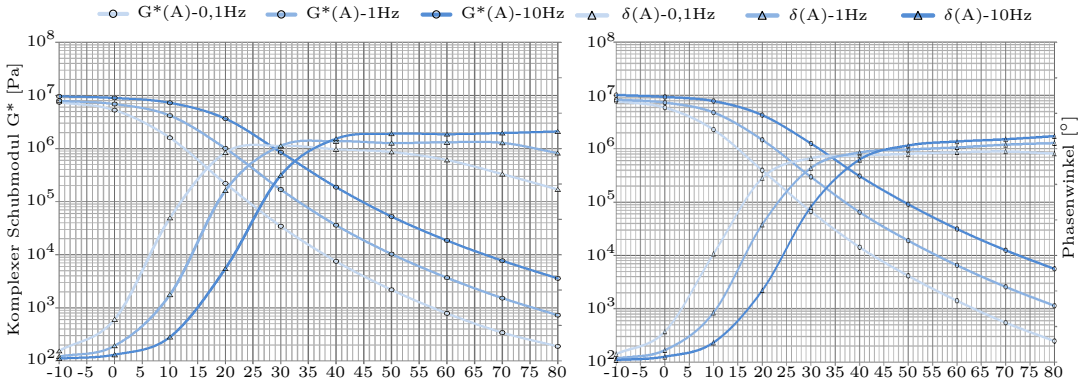


Abbildung 6.9.: DSR -10 bis +80°C - Frequenzsweep 0,1 Hz, 1 Hz, 10 Hz, PmB 45/80-65 mit 4,3 m% SBS, links: Frischbitumen (A), rechts: (B) RTFOT [19]

Die Steifigkeitszunahme der Kombinationsversuche V4 und V5 liegt im Temperaturbereich von 10°C - 30°C deutlich über jenen Versuchen mit vergleichbarer Versuchsdauer (V1 und V2), selbiges Verhalten zeigt sich beim Abfall des Phasenwinkels. V3, V5 und V6 weisen eine ähnliche Veränderung der Steifigkeit wie auch des Phasenwinkels, welche markanter als bei V1, V2 und V4 ist auf (siehe Abbildung 6.12). Dies ist auf die Kombination der Länge der Versuchsdauer und der damit verbundenen Temperatur zurückzuführen (Geschwindigkeit des Alterungsprozesses nimmt über die Zeit ab).

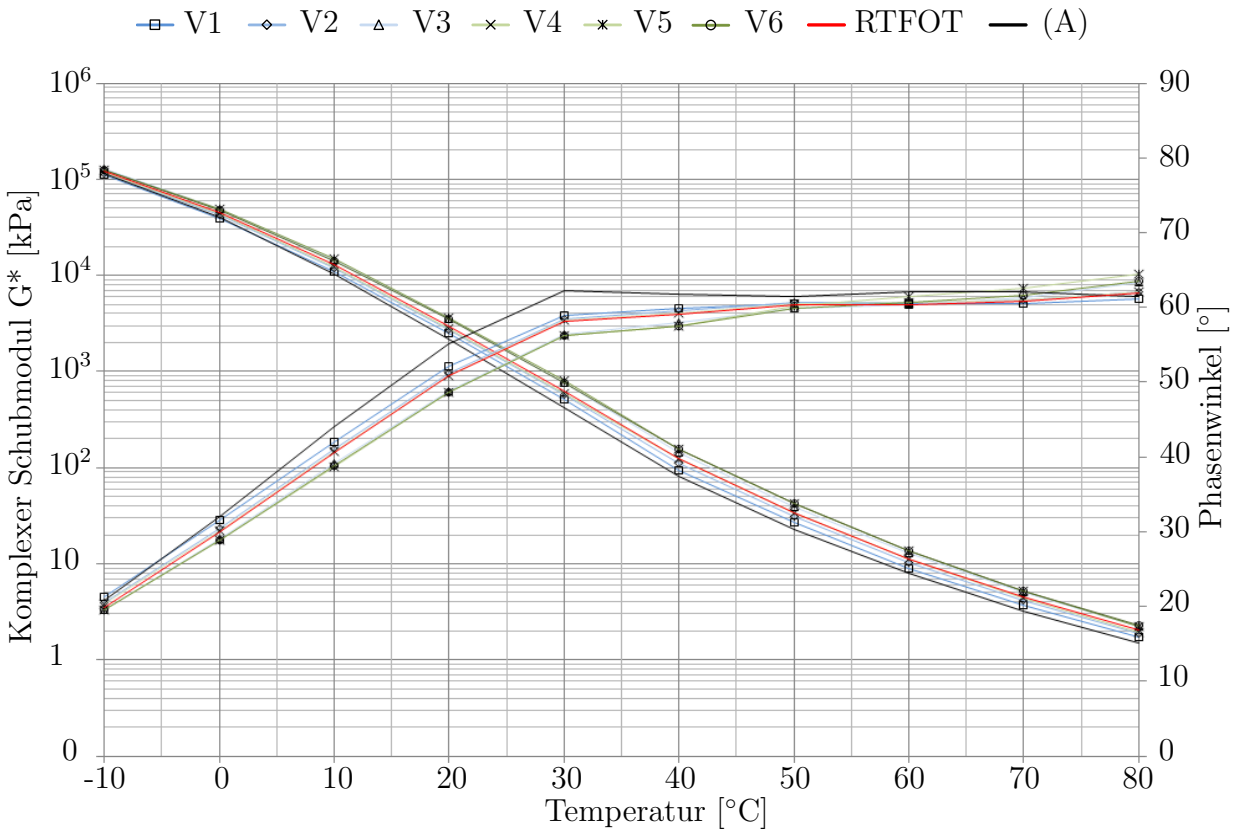


Abbildung 6.10.: DSR 1,59 Hz in den Laboralterungsstufen V1 - V6, B533

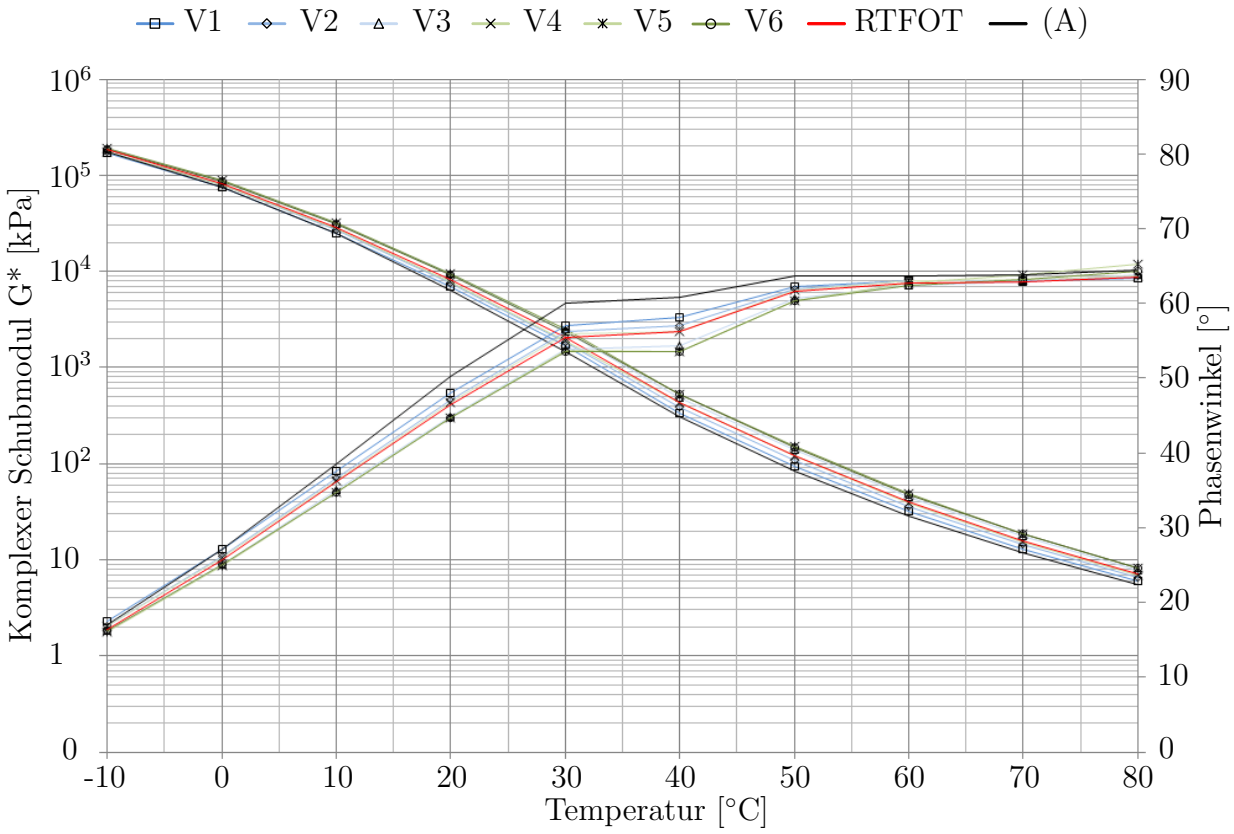


Abbildung 6.11.: DSR 10 Hz in den Laboralterungsstufen V1 - V6, B533

Korrelation der gemessenen Steifigkeit G* im DSR mit den Nadelpenetrationsversuchen

Für diesen Vergleich werden die DSR Messungen bei 1,59 Hz im Temperaturbereich von 10°C - 30°C in Abbildung 6.12 und die PEN Daten in Abbildung 6.2 herangezogen. Die Stärke der Abnahme der Nadelpenetration für die Oxidationsversuche (V1 - V3) nimmt mit der Versuchsdauer ab, hingegen steigt die Steifigkeitszunahme im DSR Versuch von V2 zu V3 stark an, was gegenläufige Trends in den Messergebnissen anzeigt. Zwischen V4 und V5 fällt der Messwert der Nadelpenetration ab, hingegen steigt dieser von V5 auf V6 wieder an (komplexes Zusammenwirken Grundbitumen und Polymer). Dies würde bedeuten, dass das Material laut Penetrationsversuch von V5 - V6 wieder weicher wird. Auch im DSR Versuch zeigt sich ein geringer Abfall der Steifigkeit von V5 auf V6 bei annähernd gleichbleibenden Phasenwinkel. Der Vergleich zeigt im Allgemeinen eine sehr gute Korrelation der beiden Versuche. Die Penetrationswerte nach dem RTFOT des B533 entsprechen den Werten des Oxidationsversuches V3. Im Vergleich mit den DSR Ergebnissen bei denen V2 und V4 am stärksten den RTFOT Ergebnissen in Bezug auf die Steifigkeit entsprechen kann hierbei keine Korrelation gefunden werden.

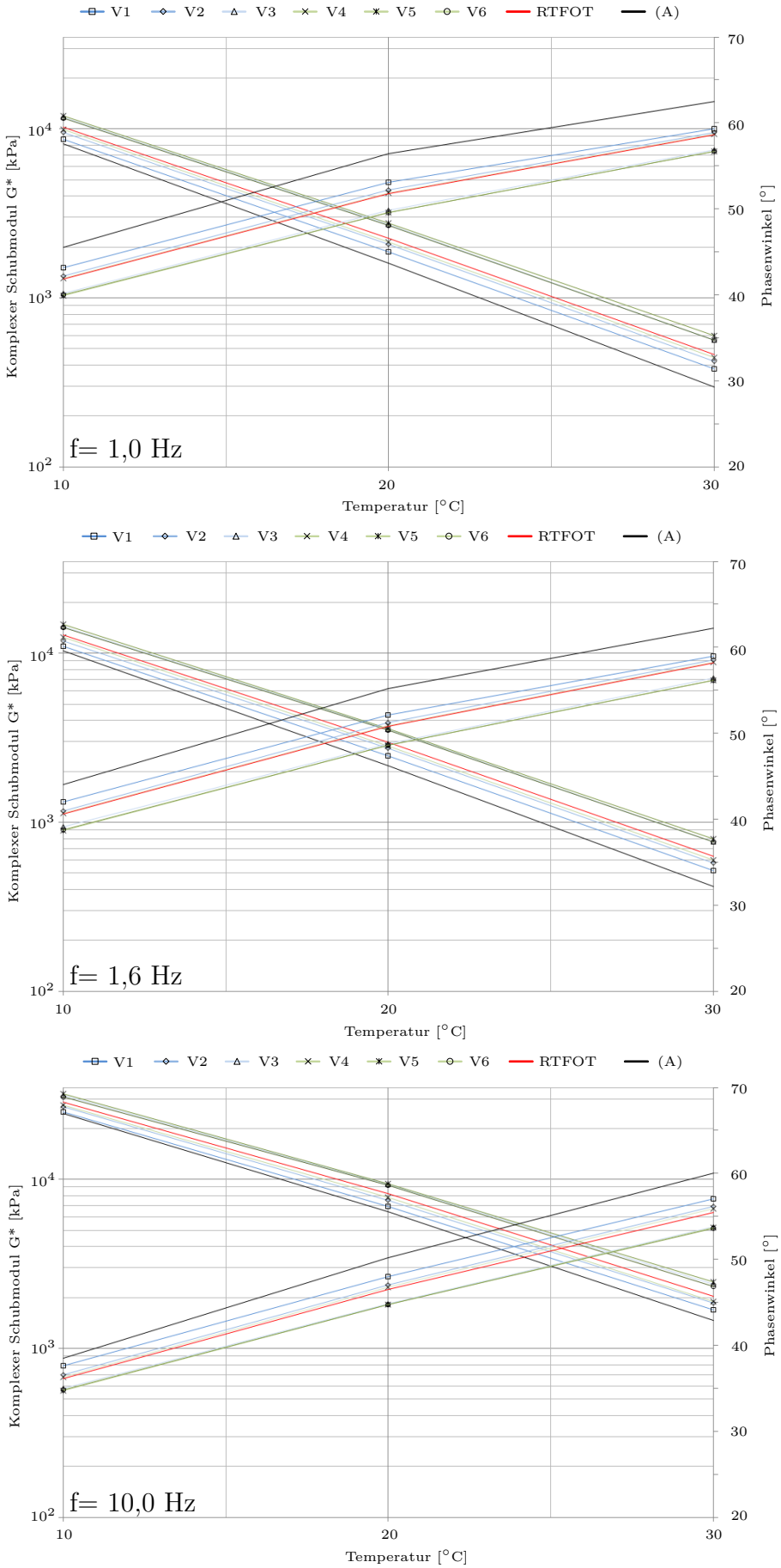


Abbildung 6.12.: DSR 1/ 1,6/ 10 Hz in den Laboralterungsstufen V1 - V6, 10 - 30 °C, B533

Das in Abbildung 6.13 dargestellte Cole-Cole Diagramm zeigt das visko-elastische Verhalten des Bitumens ohne Frequenzeinflüsse. Die annähernde Linearität der Messergebnisse zeigt eine Alterung des Grundbitumens ohne Zerstörung des SBS beziehungsweise der Bindungen zwischen den beiden Komponenten (Bitumen - SBS). Dies bestätigt die Eignung des STA Mischgutalterungsversuchs für polymermodifizierte Bindemittel.

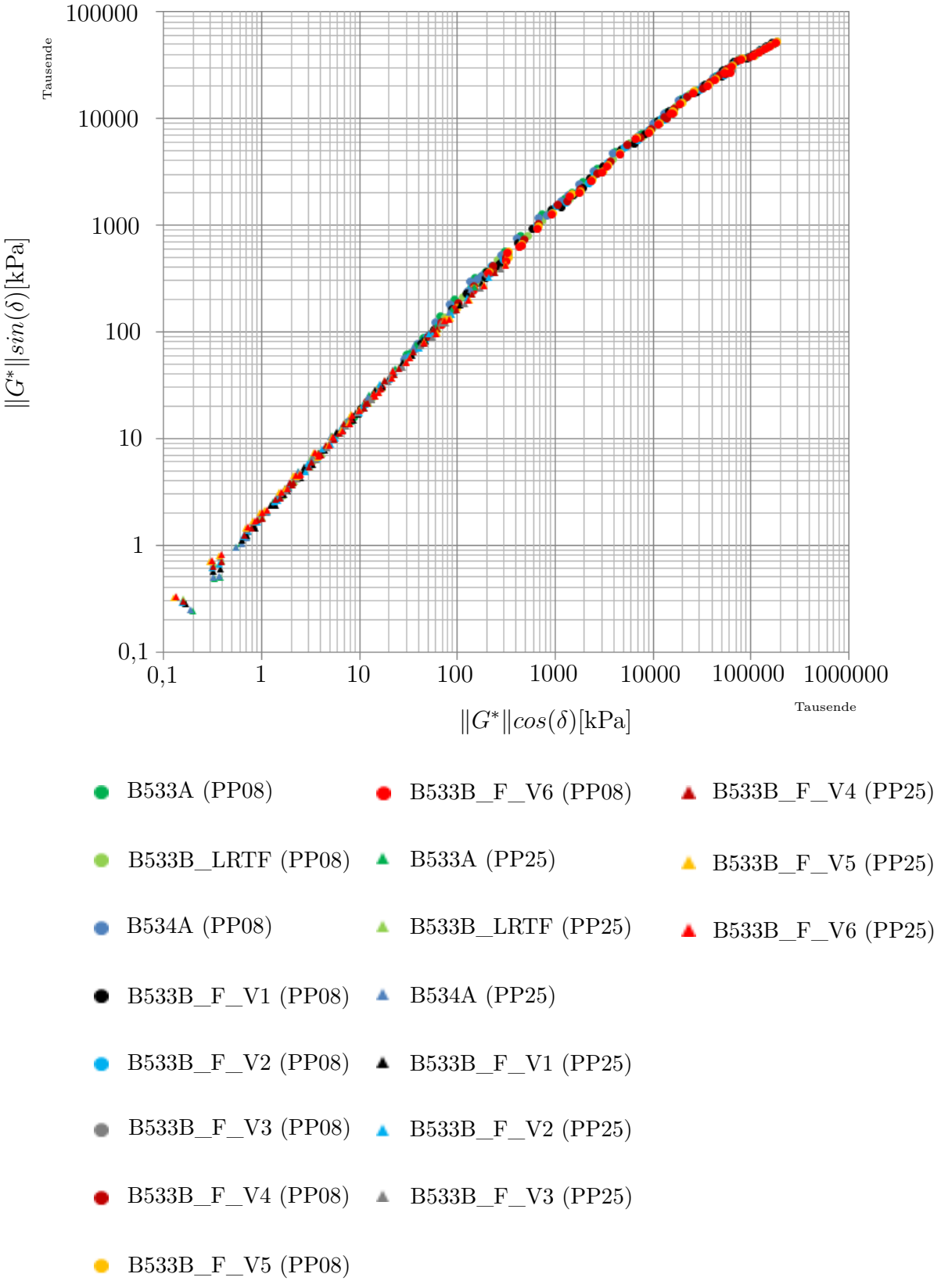


Abbildung 6.13.: Cole-Cole Diagramm, DSR, B533

7. Interpretationen der Laborergebnisse

7.1. STA Mischgutalterungsversuche versus Roling Thin Film Oven Test (RTFOT)

Ziel des RTFOT Verfahren nach [48] ist die Simulation der Bindemittelversprödung und Versteifung während des Herstellungsprozesses durch eine künstliche Alterung mit Hilfe von Luft und Wärme. Die Norm weist darauf hin, dass dieses Verfahren keine Gültigkeit für alle Bindemittel besitzt. Die Präzisionsangaben in Tabelle 7.1 sind für unmodifizierte Bindemittel gültig. Für PmBs gelten die Werte lediglich als Richtwerte.

Tabelle 7.1.: Präzisionen des RTFOT Verfahrens nach [48]

Merkmal	**Wiederhol-präzision**	**Vergleichs-präzision**
Masseänderung (% absolut) (>0,3% und < 0,8%)	0,15	0,20
Verbleibende PEN bei 25 °C (% absolut)	7	10
Anstieg des Erweichungspunktes R&K (°C)		
Werte < 6,5 °C	1,5	2,0
Werte ≥ 6,5 °C	3,0	4,0

Der im Zuge dieser Forschungsarbeit entwickelte STA Mischgutalterungsversuch (siehe Kapitel 2) soll ähnlich wie das RTFOT Verfahren die gesamte Versprödung und Versteifung des Asphaltbetons beziehungsweise des Bindemittels während des Herstellungsprozesses simulieren. Ein Ziel dieser Arbeit war, eine Untersuchung der Plausibilität beziehungsweise Anwendbarkeit des RTFOT Verfahrens für die Abschätzung von herstellungsinduzierten Versprödungserscheinungen in Abhängigkeit der Materialmanipulationszeit von Asphaltbeton im Wasserbau. Der entwickelte STA Mischgutalterungsversuch unterscheidet sich grundsätzlich im Versuchsablauf zum RTFOT Verfahren (realitätsnahe, herstellungsbedingte Alterung von Bitumen in der Mischgutmatrix im Vergleich zu reiner Bitumenalterung) und soll die Realität hinsichtlich Mischgutmanipulation während des Herstellungsprozesses besser abbilden. Tabelle 7.2 zeigt den Vergleich gemessener Bitumenkennwerte (Teil II) in den einzelnen Alterungsstufen (V1-V6) des STA Mischgutalterungsversuchs gegenüber parallel durchgeführter RTFOT Versuchen (jeweils selbes Ausgangsbindemittel).

Tabelle 7.2.: Vergleich Bitumenkennwerte, STA Mischgutalterungsversuch - RTFOT Versuch

	(A)	RTFOT	Beste Näherung	Messwert	Δ[%]
Bitumen 70/100					
Ring und Kugel [°C]	48,3	53,5	V1	54,1(54,9)	1,1(2,5)
Nadelpenetration [1/10mm]	81	50,5	V5	50,5	0,0
PmB 45/80-65 (B520)					
Ring und Kugel [°C]	71,2	83,5	V6	70,1	-19,1
Nadelpenetration [1/10mm]	65,6	45,5	V5/V6	45,6	0,2
Ela. Rükstellung [%]	89,5	86	V5	81,9	-5,0
PmB 45/80-65 (B533)					
Ring und Kugel [°C]	82,6	70,8	V3	70,3	-0,7
Nadelpenetration [1/10mm]	66,0	44,7	V3	44,7	0,0
Ela. Rükstellung [%]	96,0	89,8	V1	89,3	-0,6

Die Alterungsversuche (Stufen) mit der besten Korrelation zum RTFOT sind in Tabelle 7.2 angeführt.

Bitumen 70/100 Die Ergebnisse weisen partiell eine sehr gute Übereinstimmung auf. Der RTFOT bildet beim Ring- und Kugelversuch den Oxidationsversuch Stufe 1 (V1) und bei der Nadelpenetration den Kombinationsversuch Stufe 2 (V5) am besten ab.

PmB 45/80-65 (B520) Die Abweichung von 19,1% des R&K Wertes zur Kombinationsversuchsstufe 3 (V6) ist sehr markant und bietet keine befriedigende Korrelation zwischen den Versuchsergebnissen (mögliche Ursachen siehe Kapitel 5). Für die Nadelpenetration zeigt sich eine ähnlich hohe Korrelation beim PmB wie bei Bitumen 70/100. Die Übereinstimmung zeigt sich in der selben Kombinationsversuchsstufe (V5/V6). Die 5% Abweichung bei der elastischen Rückstellung stellen ein zufriedenstellendes Ergebnis dar.

PmB 45/80-65 (B533) Im Vergleich zum getestet PmB (B520) decken sich alle Ergebnisse des B533 nach dem RTFOT mit diversen Versuchsstufen (V1-V6). Bei der Zuordnung der RTFOT Ergebnisse zu den unterschiedlichen Alterungsstufen zeigt sich die beste Übereinstimmung bei den Oxidationsversuchen (V1-V3).

Im Vergleich der Versuchsergebnisse der getesteten Bindemittel (70/100, B520 und B533) zeigen sich übereinstimmende Trends bei den Versuchsabläufen Nadelpenetration und elastischer Rückstellung. Beim Erweichungspunkt Ring und Kugel teilen sich die Ergebnisse in zwei Gruppen. Beim unmodifizierte Bitumen 70/100 sowie modifizierte B520 tritt eine Steigerung des Messwertes nach dem RTFOT auf. Hingegen fallen die Werte bei den beiden modifizierten Proben B533 und B288 (Vergleichsprobe 3,7 m% SBS). Gegenläufige Trends bei den Messwerten werden auf Einflüsse des Grundbitumens sowie spezielle Eigenschaften des Polymers oder auch auf die Herstellung (Verwendung unterschiedlicher

Vernetzer etc.) zurück geführt. Die beiden Proben B533 und B288 weisen höhere Qualitäten hinsichtlich Homogenität als Probe B520 auf (siehe Abschnitt 4). Das ähnliche Verhalten beziehungsweise die Dominanz des Grundbitumens beim Alterungsprozess des B520 im Vergleich zum getesteten 70/100, ist auf die bei den Laboranalysen festgestellte geringe Menge an SBS sowie die schlechte Homogenisierung zurückzuführen. Ein Anstieg des PEN_{Index} mit steigendem Polymergehalt (SBS) wurde in [2] (siehe Tabelle 1.2) für zwei unterschiedliche Grundbitumen nachgewiesen. Gegenläufiges zeigen die Messungen in Tabelle 7.3. Mit steigendem Polymergehalt fällt der PEN_{Index}. Bei den konventionellen Prüfmethoden ist das Nadelpenetrationsverfahren, auf Grundlage der geringeren Schwankungen in den Messergebnissen sowie die übereinstimmenden Trends, bei allen getesteten Bindemittelsorten, besser geeignet für die Bestimmung der Versprödung und Versteifung in den Alterungszuständen als das Ring- und Kugelverfahren (siehe Tabelle 7.3). Grundsätzlich ist jedoch bei PmBs eine vermehrte Verwendung von gebrauchsverhaltensorientierten Bitumenprüfungen (GVO[1]) für die Grunduntersuchungen (Eignungsprüfungen sowie STA Mischgutalterungsversuch) wünschenswert, im speziellen liefern DSR Untersuchungen eine sehr breite und gute Interpretationsgrundlage (siehe Abschnitt 6.4).

Tabelle 7.3.: Vergleich Auswirkungen RTFOT Alterung

Probe	Veränderung [%]	Index (RTFOT/A)
R&K 70/100 (A) - RTFOT	10,8	1,11
R&K B520 (A) -RTFOT	17,3	1,17
R&K B533 (A) - RTFOT	-14,3	0,86
R&K B288 (A) - RTFOT	-4,5	0,95
PEN 70/100 (A) - RTFOT	-37,7	0,62
PEN B520 (A)-RTFOT	-30,6	0,69
PEN B533 (A) - RTFOT	-32,3	0,68
PEN B288 (A) - RTFOT	-25,4	0,75
ELA B520 (A)-RTFOT	-3,9	0,96
ELA B533 (A) - RTFOT	-6,5	0,94
ELA B288 (A) - RTFOT	-5,4	0,95

Der Vergleich zwischen dem entwickelten STA Mischgutalterungsversuch und dem RTFOT Verfahren zeigt die bessere Eignung ersteren durch die Möglichkeit der flexiblen Anpassung der Versuchsdauer an die jeweiligen projektspezifischen Gegebenheiten (siehe Abschnitt 10.1.2).

[1] Bitumenprüfungen werden in konventionelle und gebrauchsverhaltensorientierte Bitumenprüfungen unterschieden. In dieser Arbeit wurde als GVO Prüfung das DSR eingesetzt, die Prüfungen PEN, R&K sowie Ela.R. zählen zu den konventionellen Prüfungen. (Beschreibung der Laborprüfungen siehe [25])

7.1.1. Vergleich RTFOT Untersuchungsergebnisse mit [11]

In [11] wurden vier unmodifizierte Bitumensorten vor und nach dem RTFOT sowie der Einfluss des Mischvorganges und des Gesteins für häufig verwendete Asphaltmischungen untersucht. Folgende Aussagen wurden aufgrund einer statistischen Auswertung der Ergebnisse getroffen und mit den Untersuchungen in dieser Arbeit verglichen.

1. Provenienz und Qualität des Bitumens haben einen maßgebenden Einfluss auf den Versprödungswiderstand.

   Die durchgeführten Untersuchungen bestätigen den Einfluss der Provenienz und der Bitumenqualität auf den Versprödungswiderstand. Dies entspricht dem allgemeinen Wissensstand der Bitumenforschung (siehe Abschnitt 3.3, Kapitel 5 und 6).

2. Das Herstellungsverfahren sowie die Zusammensetzung des Asphaltmischgutes hat keine signifikante Auswirkung auf die Versprödung und Versteifung.

   Diese Feststellung kann nicht bestätigt werden, hierzu wurden keine Vergleichsuntersuchungen in dieser Arbeit durchgeführt.

3. Die Prognose der Kurzzeitalterung durch das RTFOT Verfahren ist zufriedenstellend. Der Ring- und Kugelwert lässt sich mit akzeptabler Genauigkeit vorhersagen.

   Die im Straßenbau auftretenden kurzen Materialmanipulationszeiten bilden die Grundlage für die zufriedenstellende Prognose der Ring- und Kugelwerte nach dem RTFOT. Aufgrund der längeren Materialmanipulationszeiten im Wasserbau stellt der RTFOT nur eine begrenzte Anwendbarkeit bei kurzen Transportzeiten dar (vergleiche Abbildung 5.2). Es wurde gezeigt, dass für eine Bestimmung des Alterungszustandes das Nadelpenetrationsverfahren besser als das Ring- und Kugelverfahren geeignet ist, jedoch liefert das Ring- und Kugelverfahren eine ausreichende Genauigkeit bei unmodifizierten Bindemitteln bei kurzen Alterungszeiträumen. Bei der Verwendung von polymermodifizierten Bindemitteln ist das Ring- und Kugelverfahren ungeeignet zur Bestimmung des Alterungszustandes.

4. Die Versprödung ist nach dem RTFOT weiter fortgeschritten als in der Realität, daher ist dieser ein adäquates Mittel für die Abschätzung der Versprödung.

   Diese Aussage kann nur für kurze Transportzeiten von Asphaltmischgütern mit nicht modifizierten Bindemiteln bestätigt werden (siehe Fragestellung 3).

7.2. Bitumen versus polymermodifiziertes Bitumen

Oberflächendichtungen aus Asphaltbeton können aus nicht modifizierten als auch mit polymermodifizierten Bitumen hergestellt werden. Mit beiden Materialien liegen bereits breite und gute Erfahrungswerte vor. Die ersten Oberflächendichtungen wurden mit nicht modifizierten Bitumen ausgeführt. Seit 1980 werden neben den nicht modifizierten auch polymermodifizierte Bitumen eingesetzt. Das Wissen in Bezug auf das Verhalten während langer Liegedauern $\geq$ 30 Jahre (LTA) ist aufgrund der längeren Anwendung von nicht modifizierten im Vergleich zu modifizierten Bitumen breiter. Die Vorteile von PmB liegen in der teilweise höheren Affinität und Adhäsion zwischen Gestein und Bindemittel, was einen Einbau auf steileren Böschungen, besonders im warmen Zustand während des Herstellungsprozesses erleichtert. Dieser Vorteil kommt auch in Gebieten mit erhöhter Sonneneinstrahlung und damit verbundenen höheren thermischen Belastungen zum Tragen. Allgemein gilt, dass mit der Zugabe von Polymeren die Gebrauchsspanne vergrößert werden kann. Durch die Verwendung eines solchen Polymers wird das Verhalten des Bindemittels im Hochtemperatur- beziehungsweise Tieftemperaturbereich positiv beeinflusst. Dieser Vorteil kommt bei Dichtungen zum Tragen, welche großen Wasserspiegelschwankungen unterliegen und daher lange Zeit ohne Wasserüberdeckung sind. Als Beispiel sind Pumpspeicheranlagen zu nennen. Diese Modifikation der Gebrauchspanne geht mit einer erschwerten Verarbeitbarkeit des Bindemittels einher (siehe Abbildung 10.5). Polymermodifizierte Bitumen werden in höheren Temperaturbereichen verarbeitet, was im Wasserbau bei langen Transportwegen und Einbauzeiten zu Problemen führen kann (siehe Tabelle 2.1). Die Erhöhung der Temperatur wirkt als Katalysator für einen beschleunigten Alterungsprozess. Die Ergebnisse der Untersuchungen in Kapitel 5 und 6 zeigen, dass ein Großteil der Alterung (Versprödung und Versteifung), während des Herstellungsprozesses einer Dichtung statt findet. Aus diesem Grund führt eine Erschwerung der Materialmanipulation zu einem erhöhten Risiko das Bindemittel bei der Herstellung zu beschädigen. Setzt man die mögliche Verbesserung der Gebrauchseigenschaften der Asphaltbetonoberflächendichtung durch die Verwendung von PmB anstatt nicht modifizierten Bitumen in Abhängigkeit zur erschwerten Verarbeitung, ist das Risiko einer Beschädigung des Material während der Herstellung um einiges höher als der Mehrwert durch die Verbesserung der Gebrauchseigenschaften im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit bzw. des Langzeitverhaltens. Sinnvolle Anwendungsgebiete von PmB stellen Oberflächendichtungen mit speziellen Anforderungen dar, wenn die Materialmanipulationszeiten kurz gehalten werden können. Die Auswertung der Bohrkernproben von bestehenden Dichtungen zeigt, dass AF welche mit nicht modifizierten Bindemitteln sachgemäß hergestellt wurden, sehr gute Langzeiteigenschaften aufweisen.

7.3. Bitumenbezeichnung und Klassifikation

Die im Zuge dieses Forschungsprojektes durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass Bindemittel, im speziellen polymermodifizierte durch die gebräuchlichen und in den Normen festgelegten Bezeichnungen nicht ausreichend hinsichtlich deren Eigenschaften charakterisiert beziehungsweise beschrieben werden. Für die Modifikation mittels Polymer ist die Angabe des verwendeten Polymers sowie der mengenmäßige Anteil nicht verpflichtend. Den Haupteinfluss auf die Eigenschaften des Endproduktes (PmB) haben die Rohölprovenienz, das verwendete Polymer, der Homogenisierungsprozess (Vernetzung) und die eingesetzte Polymermenge. Ohne diese Informationen beziehungsweise genaue Beschreibung der Zusammensetzung des PmBs ist es sehr schwierig oder fast unmöglich Aussagen über das Kurzzeit- (STA) und das Langzeitverhalten (LTA) ohne umfangreiche Bindemitteluntersuchungen zu treffen. Grundsätzlich zeigen die Untersuchungen, dass durch höhere Qualitäten (Homogenität, Polymerverteilung etc.) des Bindemittels auch bessere Eigenschaften (STA + LTA) beziehungsweise genauere Prognosen zu erwarten sind. Aufgrund dieser Prognosen können wiederum die verschiedenen Bindemittelsorten zielgerichteter eingesetzt und somit auch eine Kosteneinsparung über den Lebenszyklus (Liegezeit) erwirkt werden. Dieser Umstand verdeutlicht die große Bedeutung und Notwendigkeit von genaueren Bindemittelbezeichnungen seitens der Hersteller hinsichtlich deren Zusammensetzung und Eigenschaften.

Teil III.

Auswertung von Bestandsdaten

Allgemeines

Für eine Beurteilung des Einflusses des Herstellungsprozesses auf das Langzeitverhalten, wurden im Teil III der Arbeit die Laborergebnisse aus Teil I mit Bestandsdaten abgeglichen. Abbildung 1.1 zeigt, die Zusammensetzung des Alterungsprozess aus Kurzzeit- und Langzeitalterung (STA + LTA). Bindemittelproben aus Bohrkernen oder Aushackstücken bilden den gesamten Versprödungsprozess ab. Durch Abzug der herstellungsbedingten Versprödung (Kurzzeitalterung - STA) wurde auf die Versprödung während der Liegezeit geschlossen (siehe Kapitel 1). In den Kapiteln 8 und 9 wurden für eine bessere Interpretierbarkeit die Bestandsdaten von Speichern und Dämmen (Reservoirs) getrennt von Kanälen aufbereitet. Der Bau einiger Dichtungen liegt bis zu 40 (50) Jahre zurück und weist teilweise eine mangelhafte Dokumentation beziehungsweise Archivierung auf. Um eine vergleichbare und aussagekräftige Interpretation zu ermöglichen, flossen nur Daten von AF mit ausreichendem Informationsstand in die Beurteilung ein.

Um die Datengrundlage für die Analyse der Bitumenalterung von AF in Zukunft zu erweitern, werden laufend neue Bestandsdaten erhoben und ausgewertet.

8. Bestandsdaten AF - Reservoirs

8.1. AF 1

Datengrundlage für STA- und LTA-Auswertung.

8.1.1. Allgemeines

- Baujahr 1958
- Stauziel ca. 1200 m.ü.A
- Stauhöhe ca. 14 m
- Böschungsneigung 1:1,75
- AF auf Dammböschung 9 cm (2 x 4,5 cm) mit Asphaltmastixporenversiegelung
- Bitumensorte B 80/100 + Trinidad Evapure
- Sieblinie Dichtasphalt 0 - 11 mm
- Verwendetes Gerät: Böschungsfertiger (2 m breite Bahnen), Verdichtung mittels selbstfahrenden Einmann - Rüttelwalzen (2 m unter Krone händische Verdichtung), Sohle mittels Amann - Straßenfertiger
- Einbautemperatur $\leq$ 160 °C
- 1985 Einbau einer Beckenberieselungsanlage zur Kühlung der sonnenbeeinflussten Asphaltflächen
- 1995 Umbau und Erweiterung der Asphaltberieselungsanlage
- Betriebsform: Sommer - Tagesspeicher, Winter - Wochenspeicher

8.1.2. Bestandsdaten 1958

Tabelle 8.1.: Zusammensetzung Asphaltdichtschicht, 1958

Bezeichnung	**Anteil [m%]**
Bitumen 80/100 Trinidad Evapure	8,1%
Steinmehl	10,4%
Sand	25,2%
Dolomitsplitt 0 bis 4 mm	25,2%
Dolomitsplitt 5 bis 10 mm	31,1%

Tabelle 8.2.: Kontrollprüfungen während Herstellung 1958, AF auf Böschung und Sohle

Bitumensorte: Shell 80-100 + **Frischbitumen** Trinidad Evapure		
Probe Nr.	R&K [°C]	PEN [1/10mm]
B1	46,2	77
B2	47,0	79
B3	47,0	88
B4	47,5	89
B5	46,0	83
B6	45,0	83

AC Mischung		Bitumengehalt	R&K
Probe Nr.	Lage	[m%]	[°C]
D1	Böschung	8,0	46
D2	Böschung	8,5	48
D3	Böschung	8,8	47
D4	Beckensohle	8,6	46
D5	Böschung	9,1	46
D6	Böschung	7,9	48
		⌀ 8,48	⌀ 46,8

AC Verdichtet		Bitumengehalt	R&K
Probe Nr.	Lage	[m%]	[°C]
1	Böschung	9,2	50,0
2	Böschung	8,0	49,0
3	Böschung	9,6	43,0
4	Sohle	9,4	50,0
5	Sohle	9,2	49,0
6	Sohle	9,6	49,5
		⌀ 9,17	⌀ 48,4

8.1.2.1. Kontrollprüfung 2008

Tabelle 8.3.: Kontrollprüfung 2008, AF auf Böschung und Sohle

Bitumensorte: Shell 80-100			
Probe Nr.	Lage	R&K [°C]	PEN [1/10mm]
BK2	oberes Drittel Böschung	64,6	41
BK3	oberes Drittel Böschung	51,8	43

8.2. AF 2

Datengrundlage für LTA-Auswertung.

8.2.1. Allgemeines

- Baujahr 1975
- Stauziel ca. 1700 m.ü.A
- Stauhöhe ca. 24 m
- Böschungsneigung 1:1,6
- AF auf Dammböschung 8 cm
- Bitumensorte B 80
- Sieblinie Dichtasphalt 0-11 mm
- Hohlraumgehalt (Marshallkörper, beidseitige Verdichtung 20 Schläge) ca. 2,75 vol%
- Festgelegte Walztemperatur $\geq$ 100 °C
- Ausgleichsspeicher

8.2.1.1. Sanierung 2006

- Sanierung 2006
- Bitumen 70/100
- Mindestdicke Sanierungsasphalt 6 cm
- Maximale Schichtdicke pro Arbeitsgang 8 cm
- Verdichtung 2,5 t Bomag Rüttelwalze (BW 120) + händischer Einbau (Anschlüsse)
- Mittlerer Hohlraumgehalt Marshallkörper ca. 1 vol%
- Manipulationstemperaturen:
  - Mischtemperatur 180 - 190 °C
  - Einbautemperatur 150 - 160 °C
  - Walztemperatur $\geq$ 125 °C

8.2.2. Bestandsdaten 1975

Tabelle 8.4.: Zusammensetzung Asphaltdichtschicht, 1975

Bezeichnung	**Anteil [m%]**
Bitumen B 80	7,5%
Kalksteinmehl (80%<0,09)	9,3%
Brechsand 0/5	46,2%
Splitt 5/12	37,0%

8.2.3. Sanierung AF 2006

Die auftretenden Schäden wie Blasen (daraus resultierende Netzrisse) und Risse wurden großflächig abgefräst und anschließend mit Dichtasphalt abgedichtet. Das Hauptausmaß der Schäden wurde im Wasserspiegelschwankungsbereich (8 - 10 m breites Band, Schwellbetrieb) festgestellt. Auch wurden Einzelrisse im Übergangsbereich zur Herdmauer mit einer Länge von bis zu 2 m festgestellt.

Tabelle 8.5.: Zusammensetzung Asphaltdichtschicht, 2006

Bezeichnung	**Anteil [m%]**
Bitumen 70/100	7,2%
Kalksteinmehl	5,6%
Brechsand 0/2	46,4%
Edelsplitt 2/4	13,9%
Edelsplitt 4/8	26,9%

8.2.3.1. Kontrollprüfung 2008

Tabelle 8.6.: Kontrollprüfung 2008, Asphaltbetondichtung auf Böschung,

Bitumensorte:	B 80		
Probe Nr.	Lage	R&K [°C]	PEN [1/10 mm]
BK1	sanierte Fläche (2006)*	51,2	43**
BK2	Bestand (1975)*	51,2	45**
BK3	Bestand (1975)*	49,4	76
BK4	sanierte Fläche (2006)*	-	-

*Alle Bohrkerne selbe Höhenlage, knapp unter Stauziel
**Penetration in 7 gestapelten RK-Formen gemessen

8.3. AF 3

Datengrundlage für LTA-Auswertung.

8.3.1. Allgemeines

- Baujahr 1973
- Stauziel ca. 1700 m.ü.A
- Böschungsneigung 1:1,6
- AF auf Böschung 8,0 cm, maschineller- (vertikale Bahnen) bzw. händischer Einbau bei Herdanschlüssen
- Bitumensorte 80/100
- Sieblinie Dichtasphalt 0 - 11 mm
- Hohlraumgehalt (Marshallprobekörper, beidseitige Verdichtung 15 Schlägen ca. 1,2 vol%
- Walztemperatur $\geq$ 100 °C
- Betriebsform: Vorspeicher/ Tagesspeicher (Wochenspeicher)

8.3.2. Bestandsdaten 1973

Tabelle 8.7.: Frischbitumenprüfung 1973 (Bitumenlieferant Firma Geißler & Peer)

Prüfung	**Ergebnis**
Ring und Kugel	48 °C
Nadelpenetration (25°C)	82 [1/10 mm]

Tabelle 8.8.: Zusammensetzung Asphaltdichtschicht 1973

Bezeichnung	**Anteil [m%]**
Bitumen 80/100	6,8%
Kalksteinmehl (80%<0,09)	8,4%
Brechsand 0/2	41,9%
Edelsplitt 2/5	14,0%
Edelsplitt 5/8	12,1%
Edelsplitt 8/12	16,8%

8.3.2.1. Kontrollprüfung 2008

Tabelle 8.9.: Kontrollprüfung 2008, Asphaltbetondichtung auf Böschung

Bitumensorte:	80-100		
Probe Nr.	Lage	R&K [°C]	PEN [1/10 mm]
BK1	unterhalb Krone*	50,0	70
BK2	unterhalb Krone*	52,0	71
BK3	unterhalb Krone*	52,8	59

*Alle Bohrkerne selbe Höhenlage, knapp unter Stauziel

8.3.3. Sanierung 2008

Die auftretenden Schäden wie Pusteln und Blasen (daraus resultierende Netzrisse) und Einzelrisse ($\leq$ 2,5 m) wurden großflächig abgefräst und anschließend mit Dichtasphalt abgedichtet. Das Hauptausmaß der Schäden wurde im Wasserspiegelschwankungsbereich (8 - 10 m breites Band, Schwellbetrieb) festgestellt.

8.4. AF 4

Datengrundlage für LTA-Auswertung.

8.4.1. Allgemeines

- Baujahr 1964
- Stauziel ca. 1400 m.ü.A
- Stauhöhe ca. 34 m
- Böschungsneigung 1:1,7
- AF auf Böschung 8 cm Dichtlage und Mastix
- Bitumen B 85
- Böschung 8582 m^2

8.4.1.1. Sanierung 2010

- Sanierung durch Abfräsen der alten Dichtschicht (1 cm Dichtlage, Altbestand)
- Maschineller- (vertikale Bahnen) bzw. händischer Einbau bei Herdanschlüssen
- Einbauart: Böschung - vertikal, Anschlussbereich - horizontal
- Aufbau neu:
  - 8 cm Dichtschicht (einlagig)
  - Bitumen 70/100 und PmB 45/80-65
  - GK 16 mm
- Mastix 70/100 - 26 %
- Entfernung Asphaltmischanlage 14 km

8.4.2. Bestandsdaten 1989

Im Jahr 1989 wurden bei der Inspektion kleinflächige Aufwölbungen der Asphaltoberfläche infolge lokalem Fließen, sowie lokalen Rissbildungen am westlichen, oberen Teil der Dammdichtung dokumentiert. Zur Überprüfung der Schadensursache wurden sechs Bohrkerne (DN 100) an folgenden stellen genommen.

- BK 1: auf einem Riss
- BK 2: schadfreier Bereich (zwischen Schadstellen)
- BK 3 und 6: auf einer Aufwölbung
- BK 4 und 5: schadfreier Bereich (abseits der Schadstellen)

Das Material für die Laboruntersuchungen wurde aus den oberen 5 cm der Asphaltdichtschicht gewonnen.

Tabelle 8.10.: Bitumenprüfung 1989, BK 2 und 3

Prüfung	**Ergebnis**
Ring und Kugel	44,5 °C
Nadelpenetration (25°C)	78 [1/10 mm]

Tabelle 8.11.: Kontrollprüfung 1989, Asphaltbetondichtung auf Böschung

Bitumensorte: B85 Probe Nr.	Lage	Raumdichte [g/cm^3]	Hohlraumgehalt [vol%]
BK2	11,6 m westl. Rand, 2,6 m unter Krone	2,337	4,3
BK3	13,5 m westl. Rand, 3,1 m unter Krone	2,276	4,9
BK4	12,3 m östl. Rand, 1,2 m unter Krone	2,334	2,1
BK5	11,2 m westl. Rand, 1,2 m unter Krone	2,347	1,6

Für die Bestimmung der Bindemittelkennwerte sowie der Sieblinie wurde eine Mischprobe aus den Bohrkernen 2 und 3 gebildet.

Tabelle 8.12.: Zusammensetzung Asphaltdichtschicht BK 2 und 3

Bezeichnung	**IST [m%]**	**SOLL [m%]**
Bitumen B85	8,7%	8 - 8,5%
Füller	16,3%	11,5%
Kornanteil 0/2	58,3%	50,0%
Kornanteil > 4	25,4%	30,0%

Tabelle 8.13.: Zusammensetzung Asphaltdichtschicht BK 4 und 5

Bezeichnung	**IST [m%]**	**SOLL [m%]**
Bitumen B85	9,4%	8 - 8,5%
Füller	14,8%	11,5%
Kornanteil 0/2	57,9%	50,0%
Kornanteil > 4	29,1%	30,0%

Interpretation der Laborergebnisse

Im Jahr 1963 wurde ein Bitumen B 85 für die Herstellung der Dichtung verwendet. Die Prüfergebnisse zeigen, dass sich die Kennwerte R&K sowie PEN in den vergangenen 26 Jahren nur geringfügig veränderten (Kurz- + Langzeitalterung).

8.4.2.1. Kontrollprüfung 2008

Im Jahr 2008 wurden 8 Bohrkerne entnommen. Aus diesen wurde das Bindemittel getrennt für die Dichtschicht und den Binder rückgewonnen und hinsichtlich seiner Eigenschaften untersucht. Abbildung 8.1 zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse. B139 bezeichnet die Dichtschicht und B140 die Binderschicht.

Eigenschaft	*Einheit*	*ÖNORM EN*	*B 139*	*B 140*	*Bitumen 30/45*	*Bitumen 35/50*	*Bitumen 100/150*	*Bitumen 70/100*)*
PEN Nadelpenetration	1/10 mm	1426	101,7	35,7	30 – 45	35 – 50	100 - 150	84
RuK Erweichungspunkt Ring & Kugel	°C	1427	45,0	52,9	52 - 60	50 - 58	39 – 47	46,8
G* dynamischer Schubmodul bei +64 °C	MPa	14770	1098	3899	KLF**)	KLF	KLF	1243
Phasenwinkel ϕ bei +64 °C	°	14770	88,4	86,7	KLF	KLF	KLF	87,9
G*/sin(ϕ) bei +64 °C	MPa	14770	1098	3906	KLF	KLF	KLF	1242
Steifigkeit S bei -18 °C	MPa	14771	109	219	KLF	KLF	KLF	260
m-Wert bei -18 °C	-	14771	0,316	0,402	KLF	KLF	KLF	0,338

*) Ungealtertes Bitumen

**) Die Bezeichnung „KLF" in den mittleren Spalten für die Bitumen 30/45, 35/50 und 100/150 bedeutet, dass es bei Straßenbaubitumen keine Anforderung an diese Kennwerte/Eigenschaften gibt (keine Leistung gefordert)

Abbildung 8.1.: Bindemittelprüfung 2008 an 8 Bohrkernen

Die Bindemittelprüfungen (Dichtschicht) 2008 weisen starke Abweichungen im Vergleich zu jenen aus dem Jahr 1989 auf. Die Messergebnisse werden für die Auswertung nicht heran gezogen. Die Ergebnisse sollen trotzdem zeigen, dass Unterschiede bei Laboruntersuchungen möglich sind, wenn kein kritisches Hinterfragen erfolgt, was im konkreten Fall unterblieben ist.

8.5. AF 5

Datengrundlage für STA-Auswertung.

8.5.1. Allgemeines

- Baujahr 1980
- Stauziel ca. 1900 m.ü.A
- Höhe Absperrbauwerk 45 m
- Böschungsneigung 1:1,6
- AF auf Böschung 7 cm auf 4 cm Drainageschicht (auf bestehender Dichtung)
- Bitumen B 80
- Festgelegte Temperaturbereiche Herstellung
  - Mischtemperatur $\leq$ 200 °C
  - Einbautemperatur 140 - 155 °C
- Entfernung Asphaltmischanlage 40 km
- Materialmanipulationszeit ca. 150 min

8.5.2. Bestandsdaten 1980

Tabelle 8.14.: Bitumenprüfung 1980, Dichtasphalt Mischanlage (nach Mischvorgang)

Prüfung	**Ergebnis**
Ring und Kugel	51,5 [°C]
Nadelpenetration (25°C)	65 [1/10 mm]
Bindemittelgehalt	8,3 %

Tabelle 8.15.: Zusammensetzung Dichtasphalt Mischanlage, 1980

Bezeichnung	**IST [m%]**
Bitumen B80	8,3%
< 0,09 mm	14,2 %
0,09 - 0,2 mm	3,7 %
0,2 - 0,63 mm	9,6 %
0,63 - 2 mm	23,5 %
2 - 5 mm	19,0 %
5 - 8 mm	25,0 %
8 - 12,5 mm	15,0 %

Tabelle 8.16.: Mischgutprüfung 1980, Proben aus LKW

Bitumensorte:	B80		
Probe Nr.	Temperatur MG	PEN [1/10 mm]	R&K [°C]
MG	188	71	47
MG-NE	206	65	49
MG	-	66	45

MG... Mischgut, MG-NE...MG Nicht eingebaut (zu stark gealtert)

8.5.2.1. Kontrollprüfung 1989

Drei Proben aus dem Bereich der Pustelbildung wurden untersucht.

Tabelle 8.17.: Kontrollprüfung Bohrkerne 1989, Asphaltbetondichtung auf Böschung

Bitumensorte:	B80	
Probe Nr.	PEN [1/10 mm]	R&K [°C]
1	28	53
2	29	53
3	30	53

8.5.2.2. Kontrollprüfung 2011

Tabelle 8.18.: Kontrollprüfung Bohrkerne 2011, Asphaltbetondichtung auf Böschung

Bitumensorte:	B80		
Probe Nr.	PEN [1/10 mm]	R&K [°C]	Bindemittel [m%]
B 520	-	52,6	6,9
B 521	-	50,6	7,3
B 529	-	50,8	7,1
Platte 1	-	52,2	6,8

8.6. AF 6

Datengrundlage für LTA-Auswertung.

8.6.1. Allgemeines

- Baujahr 1963
- Stauziel ca. 560 m.ü.A
- Dammhöhe 17 m
- Böschungsneigung 1:1,75
- Bitumen 70/100
- Böschung 40 000 m^2
- Sohle 142 000 m^2
- Asphaltmischanlage vor Ort
- Tagesspeicher

8.6.1.1. Sanierung 2011

- Auf bestehenden Binder- und Dichtasphalt (Böschung)
- Maschineller- (vertikale Bahnen)
- Dichtasphalt auf Böschung 4 cm
- Dichtasphalt auf Sohle 7 cm
- Bitumen 70/100
- GK 16 mm
- Asphaltmischanlage vor Ort

8.6.2. Bestandsdaten 1963

Temperaturmessungen während Dichtungsherstellung
Die Temperaturmessungen wurden abwechselnd im LKW oder im Fertiger durchgeführt und ergaben Werte zwischen 149 °C und 218 °C. Für den Dichtbelag der Sohle lag die mittlere Einbautemperatur bei 182 °C (Streuung 7,7 %, Extremwerte 149 °C und 215 °C). Die Werte für die Herstellung der Böschung lagen im Mittel bei 184 °C (Streuung 6,0 %, Extremwerte 160 °C und 218 °C). Laut Laborbericht wurden keine Veränderungen der PEN- sowie der R&K Wert gegenüber dem ungealterten Frischbitumen festgestellt.

Tabelle 8.19.: Temperaturkontrolle während Herstellung 1963, Sohldichtung (Messung in LKW oder Fertiger),

Bitumensorte:	70-100	Rote Markierung	T≥190 °C	
	Stunde	Temperatur [°C]	Prüfnummer	Anmerkung
	16:30	160	1	
	17:00	175	2	
	17:30	172	3	
	10:00	181	4	
	11:00	191	5	
	15:00	183	6	
	11:25	160	7	kalte feuchte Witterung
	13:30	170	8	
	17:30	197	9	
	11:30	190	10	
	08:20	192	11	
	14:15	190	12	
	10:20	182	13	
	10:00	196	14	
	16:30	202	15	kalte feuchte Witterung
	17:30	192	16	
	10:10	184	17	
	14:30	186	18	
	08:30	200	19	
	14:40	200	20	
	11:50	190	21	
	14:00	183	22	
	17:00	215	23	
	14:55	190	24	
	18:35	184	25	
	11:40	166	26	
	10:00	149	27	
	08:00	185	28	
	10:20	184	29	
	16:30	160	30	
	16:30	167	31	
	11:00	175	32	
	11:30	185	33	
	10:30	187	34	
	11:30	195	35	
	10:00	177	36	
	16:00	175	37	
	10:00	175	38	
	11:00	190	39	
	10:30	184	40	
$T_{Mittelwert}$	182 °C	Streuung 7,7 %		

Tabelle 8.20.: Temperaturkontrolle während Herstellung 1963, Dichtung an Böschung (Messung in LKW oder Fertiger)

Bitumensorte:	70-100 Stunde	Rote Markierung Temperatur [°C]	T≥190 °C Prüfnummer	Anmerkung
	11:30	189	1	
	14:30	192	2	
	17:00	176	3	
	10:00	178	4	
	14:20	195	5	
	18:00	182	6	
	09:45	194	7	
	10:00	175	8	
	09:55	196	9	
	10:25	160	10	*beginnender Regen
	09:45	180	11	
	11:40	187	12	
	07:35	192	13	
	10:35	191	14	
	11:25	184	15	
	15:30	190	16	
	11:15	205	17	
	08:20	192	18	
	08:05	197	19	
	11:10	203	20	
	09:20	188	21	
	09:45	218	22	Probe Bitumenprüfung
	14:30	185	23	
	15:45	173	24	
	11:30	182	25	
	17:30	165	26	
	10:30	180	27	
	11:30	193	28	
	16:00	185	29	
	11:00	185	30	
	16:15	180	31	
	09:45	177	32	
	16:00	185	33	
	10:00	175	34	
	15:00	190	35	
	11:00	180	36	
	09:00	190	37	
	09:30	187	38	
	15:30	172	39	
	16:00	170	40	Zweite Dichtlage (Sanierung)
$T_{Mittelwert}$	184 °C	Streuung 6,0 %		

8.6.2.1. Kontrollprüfung 2005

Kontrollprüfungen Dichtungsbelag der Sohle

Bei 45 Extraktionen wurde ein Bindemittelgehalt zwischen 7,1 m% und 8,6 m% (Mittelwert 7,6 %) festgestellt (angegebene Toleranz von ± 0,5 % wurde 3 mal überschritten).

Kontrollprüfungen Dichtungsbelag der Böschung

Bei 39 Extraktionen von Böschungsmaterial wurde ein mittlerer Bindemittelgehalt von 8,4 m% festgestellt (angegebene Toleranz von ± 0,5 % wurde 7 mal überschritten). Weitere 45 Extraktionen wurde an Sohlmaterial durchgeführt, diese Messungen ergaben einen Bindemittelgehalt von 7,6 m.% mit einer Streuung von 4,3 %.

Tabelle 8.21.: Kontrollprüfung 2005, Bitumenprüfung 70/100, Platten (Sohle)

Prüfung	Platte 1	Platte 2	Platte 3	Pl. 3 Wied. Prüfung
Penetration [1/10 mm]	91,0	92,0	90,0	87,0
Erweichungspunkt R&K [°C]	51,0	50,0	52,0	52,0
Brechpunkt Fraaß [°C]	-13,5	-11,0	-10,5	-
Bindemittelgehalt [vol%]	8,2	6,8	7,7	-
Hohlraumgehalt [vol%]	1,0	1,6	1,1	-

8.6.3. Sanierung 2011

Im Zuge der Sanierung 2011 kam ein Straßenbaubitumen 70/100 der OMV zur Anwendung. Der Tabelle 8.23 können die laufend durchgeführten Bindemittelkontrollen (LKW) entnommen werden.

Tabelle 8.22.: Frischbitumenprüfung 2011, 70/100 OMV

Prüfung	1	2	3
Penetration 25 °C [1/10 mm]	82,0	86,0	82,0
Erweichungspunkt R&K [°C]	46,0	46,8	47,2

Tabelle 8.23.: Bitumenprüfung 2011, 70/100, LKW

Prüfung	1	2	3	4	5	6	7	8
Penetration [1/10 mm]	75,0	74,7	81,3	75,0	78,3	78,6	77,5	76,3
Erweichungspunkt R&K [°C]	46,8	46,9	45,8	47,4	46,7	46,9	46,9	47,2
Löslicher Bitumenanteil [%]	5,67	5,62	5,70	5,83	5,82	5,82	5,84	5,90
Hohlraumgehalt [vol%]	2,1	1,8	1,6	1,9	2,0	1,7	1,9	1,7

8.7. AF 7

Daten wurden nicht für die Auswertungen herangezogen.

8.7.1. Allgemeines

- Baujahr 1988
- Stauziel ca. 1100 m.ü.A
- Böschungsneigung 1:1,5
- AF auf Böschung 6 cm
- Bitumen B100 (Elan OMV)
- Betriebsform: Tagesspeicher

8.7.2. Bestandsdaten 1988

Tabelle 8.24.: Bitumenprüfung nach Mischvorgang 1987, B 100 Elan-OMV, Mischanlage Mayreder

Prüfung	**Ergebnis**
Ring und Kugel	44,8 °C
Nadelpenetration (25°C)	82 [1/10 mm]
Ring und Kugel	45,8 °C
Nadelpenetration (25°C)	94 [1/10 mm]
Ring und Kugel	46,3 °C
Nadelpenetration (25°C)	92 [1/10 mm]
Ring und Kugel	46,2 °C
Nadelpenetration (25°C)	81 [1/10 mm]
Ring und Kugel	46,9 °C
Nadelpenetration (25°C)	85 [1/10 mm]
Ring und Kugel	47,0 °C
Nadelpenetration (25°C)	84 [1/10 mm]
Ring und Kugel	47,3 °C
Nadelpenetration (25°C)	73 [1/10 mm]
Ring und Kugel	46,6 °C
Nadelpenetration (25°C)	83 [1/10 mm]
Ring und Kugel	47,5 °C
Nadelpenetration (25°C)	82 [1/10 mm]

8.8. AF 8

Datengrundlage LTA-Auswertung.

8.8.1. Allgemeines

- Baujahr 1967 (ohne Mastixversiegelung)
- Böschungsneigung 1:1,5
- Mastixversiegelung (B 80) 1969 aufgrund von Sickerwasser in Kontrollgängen und Drainagen
- Bitumen B 65
- Bohrkernentnahme 2010 zur Feststellung des Alterungszustandes

8.8.2. Bestandsdaten 2010

Tabelle 8.25.: Zusammensetzung Asphaltdichtschicht

Bezeichnung	**BK 2.1 und BK 2.2**	**BK 3 und BK 4**	**BK 5.1 und BK 5.2**
Bitumen B65	8,1%	6,5%	7,0%
11,2 mm	13,2%	8,0%	8,8%
8,0 mm	16,9%	15,7%	12,8%
5,6 mm	18,9%	25,9%	28,2%
2,0 mm	8,6%	11,8%	12,1%
1,0 mm	18,2%	16,2%	17,3%
0,25 mm	5,8%	5,9%	7,3%
0,125 mm	4,2 %	2,8%	3,2%
0,063 mm	14,2%	13,7%	10,3%

Tabelle 8.26.: Kontrollprüfung 2010, AF auf Böschung und Sohle, (Teilsanierung 1968, lokale Leckagen)

Bitumensorte:	B 65 (entspricht ca. B 50/70)			
Probe Nr.	Lage/Himmelsrichtung	R&K [°C]	PEN [1/10 mm]	Hohlraumg. [vol%]
2.1,2.2	Unterbecken/Böschung/Süd	58,4	49	1,8
3,4	Oberbecken/Böschung/West	61,6	29	2,2
5.1,5.2	Oberbecken/Sohle/Süd-Ost	71,8	15	10,2

Die Bohrkerne im Unterbecken (3 und 4) zeigen eine starke Rissbildung durch den gesamten Dichtungsaufbau. Auffällig ist der hohe Hohlraumgehalt der Kerne 5.1 und 5.2, welcher weit über den Anforderungen hinsichtlich Dichtheit liegt. Die Untersuchungen am zurückgewonnenen Bindemittel weisen auf einen geringen Alterungsfortschritt während der Liegedauer von ca. 40 Jahren hin, dies ist womöglich durch den hohen Bindemittelgehalt sowie die großen Schichtdicken erklärbar. Nach heutigen Normen würde das gealterte Bindemittel einem 35/50 an der Grenze zum Bitumen 30/45 entsprechen. Im Oberbecken

ist eine stärkere Versprödung zu erkennen (Kerne 3,4, 5.1 und 5.2). Nach den heutigen Normen würden diese Bindemittelwerte ungefähr einem Bitumen 20/30 entsprechen. Die Messwerte zeigen einen deutlichen Verlust der benötigten Bindemitteleigenschaften um eine einwandfreie Funktion der Oberflächendichtung zu gewährleisten.

8.9. AF 9

Datengrundlage für LTA-Auswertung.

8.9.1. Allgemeines

- Baujahr 1968
- Böschungsneigung 1:1,7
- AF Schichtdicke siehe Tabelle 8.27, 8.28, 8.29 und 8.30
- Bitumensorte B 80
- Betriebsform: Tagesspeicher

8.9.2. Bestandsdaten 2012

Tabelle 8.27.: Kontrollprüfungen 2012, Bereich 1

Nr.	Kern	Schichtdiche	Raumdichte	Rohdichte	Vol.	B. Gehalt	R&K	PEN
1	101	10,3	2,346	2,382	1,5	9,4	54,3	47
2	102	10,2	2,319	2,373	2,3	8,0	47,4	58
3	103	10,7	2,371	2,402	1,3	9,7	48,4	56
4	104	9,5	2,363	2,406	1,8	9,4	48,1	55
5	105	6,3	2,359	2,389	1,3	9,6	48,7	57
6	106	8,2	2,352	2,380	1,2	10,4	49,9	59
7	107	6,8	2,384	2,405	0,9	9,6	45,2	58
8	108	6,8	2,352	2,398	1,9	9,5	46,4	58
9	109	9,2	2,362	2,378	0,7	7,9	51,8	60
10	110	7,1	2,355	2,387	1,3	9,5	47,7	63
11	111	8,7	2,366	2,380	0,6	9,3	44,8	58
12	112	10,0	2,354	2,367	0,5	9,1	52,5	58
13	113	12,5	2,345	2,394	2,0	9,0	49,2	66
14	114	11,2	2,367	2,414	1,9	9,0	49,2	65
15	115	6,6	2,357	2,386	1,2	9,4	52,0	59
16	116	7,2	2,360	2,382	0,9	9,7	46,9	57
17	117	9,4	2,350	2,396	1,9	9,4	47,8	60
18	118	7,4	2,359	2,389	1,3	9,2	44,4	59
19	119	10,3	2,352	2,384	1,3	9,3	45,8	62
20	120	10,1	2,346	2,387	1,7	9,4	46,6	59
21	121	9,3	2,362	2,416	2,2	9,1	48,6	60
22	122	8,8	2,345	2,404	2,5	9,3	50,8	61
		⌀	2,356	2,393	1,5	9,3	48,8	59
		Max.	2,391	2,419	3,8	10,4	54,6	66
		Min.	2,319	2,367	0,5	7,9	44,4	47

Tabelle 8.28.: Kontrollprüfungen 2012, Bereich 2

Nr.	Kern	Schichtdiche	Raumdichte	Rohdichte	Vol.	B. Gehalt	R&K	PEN
26	202	8,4	2,372	2,436	2,6	7,8	53,0	45,0
27	203	8,3	2,378	2,439	2,5	8,1	52,8	54,0
28	204	8,7	2,410	2,450	1,6	7,0	53,5	52,0
29	205	10,5	2,371	2,446	3,1	7,1	52,2	53,0
30	206	9,8	2,375	2,446	2,9	7,0	54,4	47,0
31	207	9,4	2,368	2,448	3,3	7,3	54,3	47,0
32	208	9,8	2,438	2,454	0,7	7,6	54,5	44,0
33	209	5,5	2,384	2,423	1,6	8,1	55,0	46,0
34	210	6,5	2,387	2,430	1,8	7,3	54,2	50,0
35	211	7,5	2,342	2,407	2,7	8,3	54,5	51,0
36	212	7,7	2,333	2,409	3,2	8,4	55,0	50,0
37	213	7,8	2,366	2,434	2,8	7,3	56,0	43,0
38	214	6,6	2,362	2,430	2,8	7,6	55,3	42,0
39	215	6,0	2,380	2,449	2,8	6,9	56,8	43,0
40	216	6,2	2,350	2,429	3,3	7,2	65,0	26,0
41	217	7,0	2,383	2,422	1,6	7,9	54,8	40,0
42	218	6,0	2,379	2,430	1,8	7,8	53,4	46,0
43	219	7,2	2,373	2,434	2,5	7,4	56,4	42,0
44	220	7,0	2,390	2,442	2,1	7,1	56,6	45,0
		⌀	2,376	2,435	2,4	7,5	55,1	45,8
		Max.	2,438	2,454	3,3	8,4	65,0	54,0
		Min.	2,333	2,407	0,7	6,9	52,2	26,0

Tabelle 8.29.: Kontrollprüfungen 2012, Bereich 3

Nr.	Kern	Schichtdicke	Raumdichte	Rohdichte	vol.	B. Gehalt	R&K	PEN
46	302	6,5	2,372	2,436	2,6	7,8	53,0	45
47	303	6,3	2,378	2,439	2,5	8,1	52,8	54
48	304	4,7	2,410	2,450	1,6	7,0	53,5	52
49	305	6,0	2,371	2,446	3,1	7,1	52,2	53
50	306	5,3	2,375	2,446	2,9	7,0	54,4	47
51	307	6,2	2,368	2,448	3,3	7,3	54,3	47
52	308	4,8	2,438	2,454	0,7	7,6	54,5	44
		⌀	2,387	2,444	2,363	7,363	53,588	49
		Max.	2,438	2,454	3,300	8,100	54,500	54
		Min.	2,368	2,436	0,700	7,000	52,200	44

Tabelle 8.30.: Kontrollprüfungen 2012, Bereich 4

Nr.	Kern	Schichtdicke	Raumdichte	Rohdichte	vol.	B. Gehalt	R&K	PEN
62	502	7,0	2,432	2,446	0,6	7,8	51,2	65
63	503	5,5	2,421	2,450	0,2	7,4	50,0	68
64	504	3,7	2,380	2,443	2,6	8,0	48,8	68
65	505	4,2	2,434	2,464	1,2	7,1	54,0	57
		⌀	2,421	2,451	1,020	7,340	51,200	64
		Max.	2,438	2,464	2,600	8,000	54,000	68
		Min.	2,380	2,443	0,200	6,400	48,800	57

8.10. AF 10

Datengrundlage für STA- und LTA-Auswertung.

8.10.1. Allgemeines

- Baujahr 1972
- Stauziel ca. 990 m.ü.A
- Böschungsneigung 1:1,7
- AF auf Dammböschung 8 cm und Sohle 6 cm
- Bitumen 60/70 von Shell und OMV
- Betriebsform: Tagesspeicher

8.10.1.1. Sanierung 2011

- Sanierung 2011
- Asphaltdichtschicht ca. 100 000 m^2
- Bitumen 70/100
- Mischanlage vor Ort
- Materialmanipulationszeit ca. 1 h

8.10.2. Bestandsdaten 1972

Tabelle 8.31.: Bitumenuntersuchungen (A) 60/70 (Shell), 1972

Prüfung	Ergebnis
Ring und Kugel	52,3 [°C]
Nadelpenetration (25°C)	60,0 [1/10 mm]

Tabelle 8.32.: Bitumenuntersuchungen (A) 60/70 (OMV), 1972

Prüfung	Ergebnis
Ring und Kugel	51,5 [°C]
Nadelpenetration (25°C)	63,0 [1/10 mm]

Tabelle 8.33.: Untersuchung Aushackstücke, 1973

Proben Nr.	Raumdichte [g/cm³]	Rohdichte [g/cm³]	Hohlraumgehalt [vol%]	Bitumengehalt [m%]
B II/1	2,45	2,48	1,3	7,9
B II/2	2,40	2,49	1,3	7,9
Mittelwert	2,43	2,49	1,3	7,9

Tabelle 8.34.: Zusammensetzung Asphaltdichtschicht aus Aushackstücken 1973

Bezeichnung	**B II/1**	**B II/2**
Bitumen B 60/70	7,9 %	7,9 %
16,0 mm	100,0%	100,0%
12,5 mm	99,3%	97,1%
8,0 mm	80,1%	87,9%
5,0 mm	63,6%	75,7%
2,0 mm	46,4%	53,5%
1,0 mm	35,3%	38,6%
0,63 mm	30,6%	32,4%
0,31 mm	24,5%	23,2%
0,2 mm	20,7%	18,6%
0,09 mm	11,6%	11,6%

8.10.3. Sanierung 2010

Tabelle 8.35.: Bitumenuntersuchungen (A) 70/100, 2010

Prüfung	**Ergebnis**
Ring und Kugel	47,0 [°C]
Nadelpenetration (25°C)	81,0 [1/10 mm]

Tabelle 8.36.: Zusammensetzung Asphaltdichtschicht

Bezeichnung	**Soll/Design**	**Mittelwert BK**
Bitumen 70/100	6,3 %	6,3 %
16,0 mm	12,4%	13,0%
11,2 mm	12,4%	12,1%
8,0 mm	10,8%	8,1%
5,6 mm	19,8%	19,6%
2,0 mm	10,5%	13,9%
1,0 mm	15,2%	14,9%
0,25 mm	3,8%	4,2%
0,125 mm	3,1 %	3,4%
0,063 mm	12,0%	10,8%

Während des Einbauprozesses wurden Mischgutuntersuchungen zur Qualitätssicherung durchgeführt (siehe Tabelle 8.37). Temperaturmessung und Probenahme erfolgte am Fertiger. Referenz der R&K sowie PEN Werte sind die Mittelwerte der laufend durchgeführten Bitumenprüfungen (R&K 49,0 °C, PEN 78,4 1/10 mm).

Tabelle 8.37.: Qualitätskontrolle während Einbau

Bezeichnung	Temp. [%]	BM lösl. [%]	PEN [1/10 mm]	R&K [°C]	Raumd. [g/cm^3]	Rohd. [g/cm^3]	Hohlr.* Gehalt [%]
DAW 16-B	173	6,30	-	-	2,469	2,492	0,90
DAW 16-B	175	6,20	-	-	2,471	2,498	1,10
DAW 16-B	179	6,60	77,00	50,00	2,458	2,479	0,80
DAW 16-B	184	6,50	78,00	48,70	2,476	2,500	1,00
DAW 16-B	185	6,20	79,60	48,60	2,479	2,499	0,90
DAW 16-B	189	6,10	77,30	49,70	2,479	2,503	1,00
DAW 16-B	185	6,00	78,80	47,60	2,476	2,499	0,90
DAW 16-B	182	6,40	-	-	2,475	2,496	0,80
DAW 16-B	185	6,20	75,70	50,70	2,471	2,493	0,90
DAW 16-B	187	6,40	79,30	47,20	2,473	2,492	0,80
DAW 16-B	187	6,60	75,00	49,70	2,459	2,476	0,70
DAW 16-B	183	6,40	-	-	2,466	2,488	0,90
DAW 16-B	182	6,30	-	-	2,465	2,484	0,80
DAW 16-B	185	6,40	-	-	2,462	2,483	0,80
DAW 16-B	189	6,30	79,00	48,00	2,470	2,487	0,70
DAW 16-B	184	6,00	-	-	2,469	2,487	0,70
DAW 16-B	185	6,20	-	-	2,472	2,490	0,70
DAW 16-B	187	6,30	82,00	49,00	2,469	2,491	0,90
DAW 16-S	177	6,50	-	-	2,480	2,507	1,10
DAW 16-B	186	6,40	-	-	2,478	2,495	0,70
DAW 16-S	180	6,20	-	-	2,479	2,505	1,00
DAW 16-B	188	6,10	-	-	2,475	2,497	0,90
DAW 16-S	187	6,40	-	-	2,475	2,498	0,90
DAW 16-S	189	6,10	-	-	2,478	2,503	1,00
DAW 16-S	188	6,40	-	-	2,475	2,498	0,90
DAW 16-S	190	5,80	73,00	50,80	2,487	2,501	0,60
DAW 16-B	187	6,60	-	-	2,475	2,493	0,70
DAW 16-B	188	6,30	-	-	2,480	2,505	1,00
DAW 16-B	188	5,90	-	-	2,472	2,498	1,00
DAW 16-B	189	6,50	-	-	2,461	2,493	1,30
DAW 16-B	185	6,50	-	-	2,464	2,482	0,70
DAW 16-S	180	6,30	75,00	51,10	2,485	2,501	0,60
DAW 16-S	181	6,10	-	-	2,485	2,512	1,10
DAW 16-S	183	6,20	-	-	2,489	2,499	0,50
DAW 16-B	188	6,20	71,00	48,20	2,469	2,488	0,80
DAW 16-S	188	6,10	-	-	2,474	2,492	0,70
DAW 16-S	189	6,20	-	-	2,469	2,489	0,80
DAW 16-S	191	5,80	-	-	2,465	2,503	1,50

B...Böschung, S... Sohle, *...Marshallk. aus Probe

8.10.3.1. Kontrollprüfung 2016

Tabelle 8.38.: Bohrkernentnahme, 2016

Proben Nr.	Füllergehalt [m%]	Bindemittelgehalt [m%]	PEN [1/10 mm]	Δ PEN [1/10 mm]	R&K [°C]	Δ R&K [°C]
A 1 (B589C_F)	13,4	7,1	40	41	50,0	3,0
A 2 (B590C_F)	13,2	7,0	59	22	49,6	2,6
Mittelwert	13,3	7,1	49,5	31,5	49,8	2,8

Tabelle 8.39.: Beschreibung der entnommenen Bohrkerne

Bezeichnung	**Anmerkung**
A 1 (B589C_F)	kompakt
A 2 (B590C_F)	Oberflächliche Risse an Entnahmestelle, t = 2 cm, neben Riss gebohrt

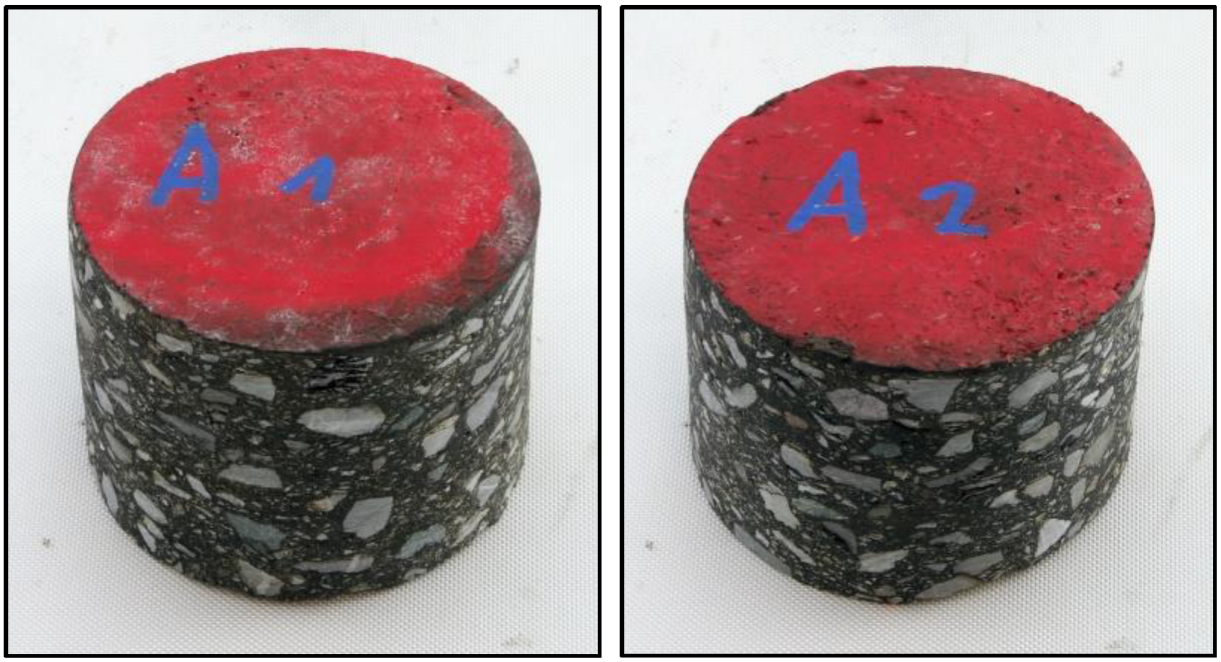


Abbildung 8.2.: Bohrkerne DN 100 2016, links: A1, rechts: A2

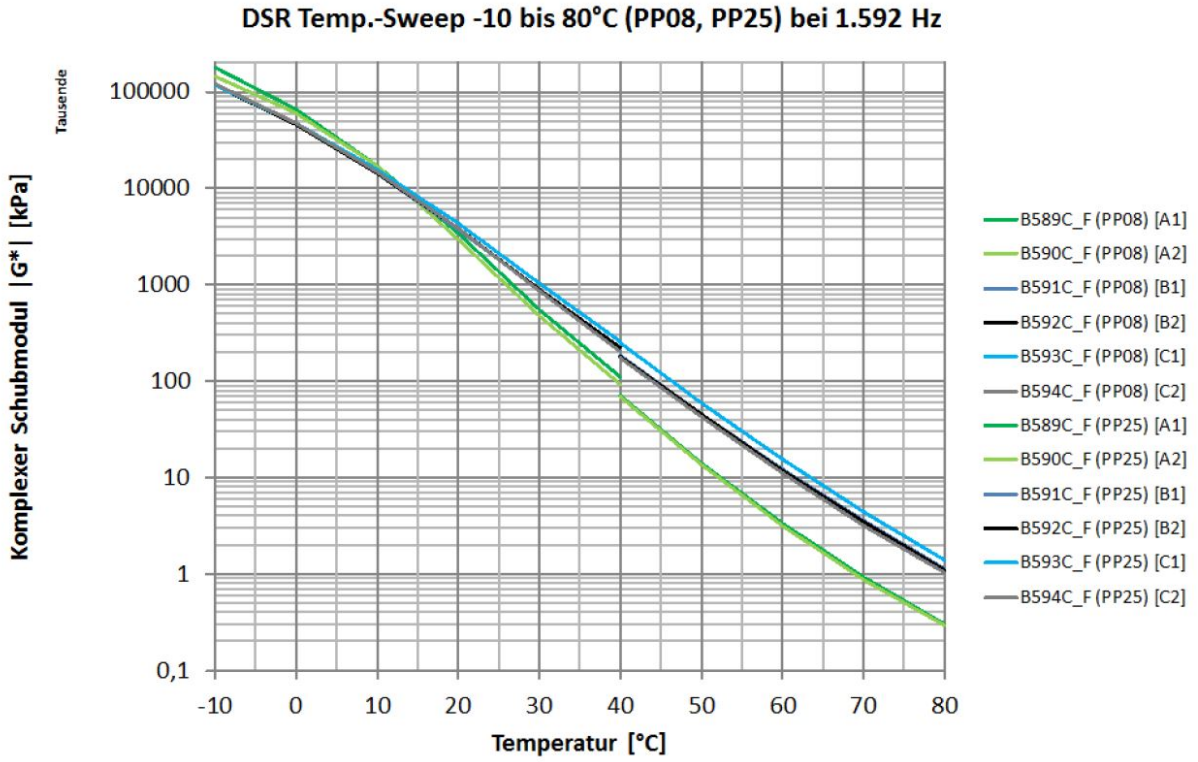


Abbildung 8.3.: DSR Temperature-Sweep -10 bis 80 °C bei 1,592 Hz, Bohrkerne 2016

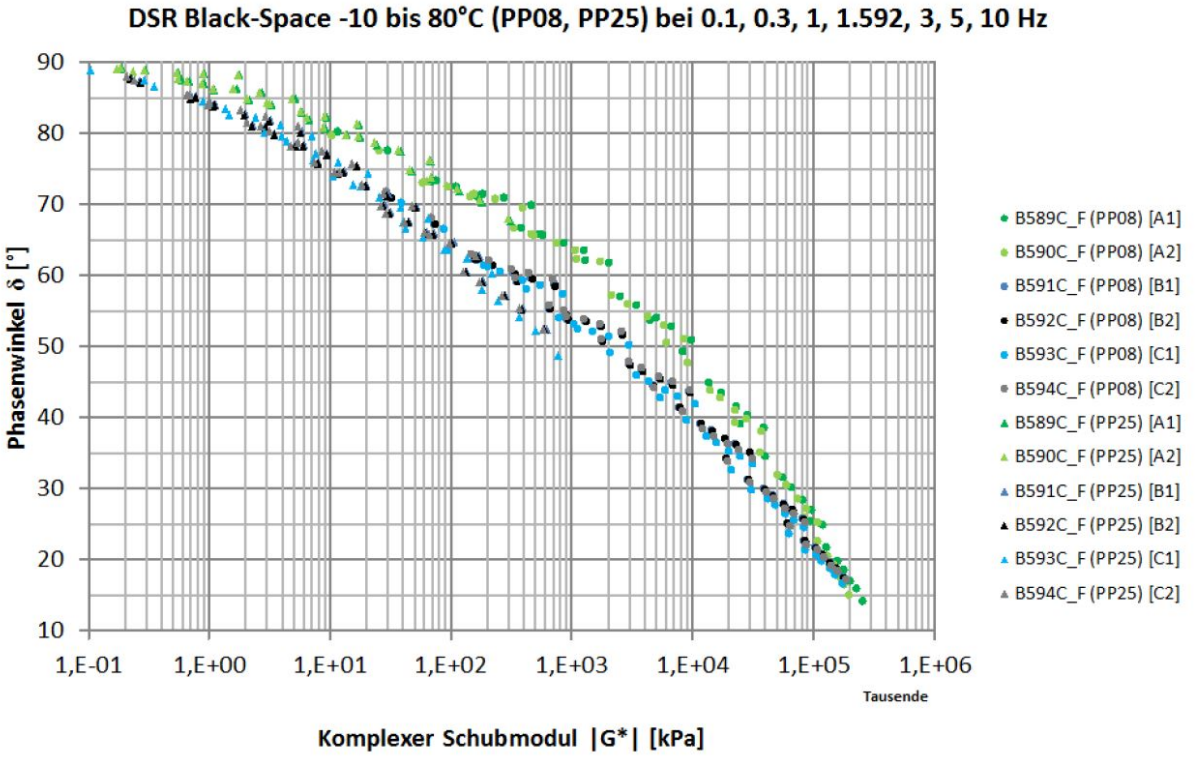


Abbildung 8.4.: DSR Black-Space -10 bis 80 °C bei 0.1,0.3,1,1.592.3,5.10 Hz, Bohrkerne 2016

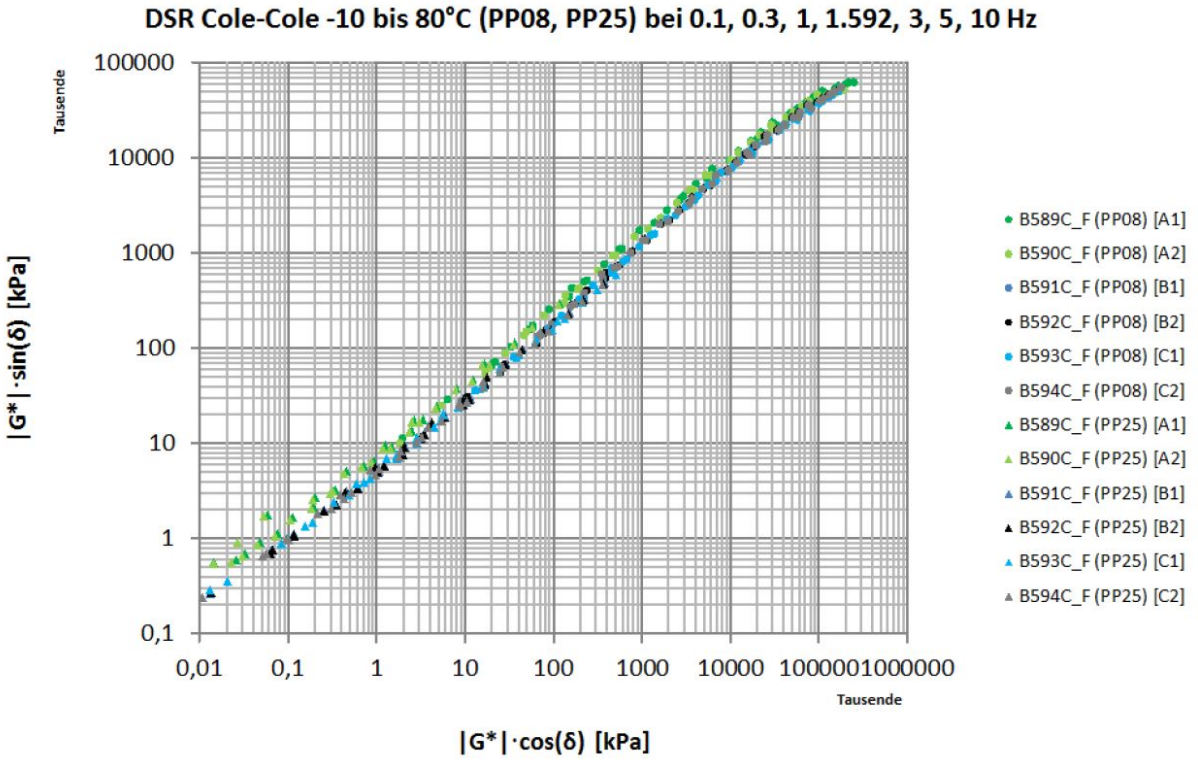


Abbildung 8.5.: DSR Cole-Cole -10 bis 80 °C bei 0.1,0.3,1,1.592.3,5.10 Hz, Bohrkerne 2016

8.11. AF 11

Datengrundlage für LTA-Auswertung.

8.11.1. Allgemeines

- Baujahr 1972-1973
- Stauziel ca. 992 m.ü.A
- Böschungsneigung 1:2 - 1:2,5
- AF auf Böschung und Sohle 8 cm
- Bitumen B 60/70 (Shell und OMV)
- Bitumengehalt ≈ 8,2 m%
- Materialmanipulationszeit ca. 1 h
- Betriebsform: Tagesspeicher

8.11.2. Bestandsdaten 1972

Tabelle 8.40.: Bitumenuntersuchungen (A) 60/70 (Shell), 1972

Prüfung	**Ergebnis**
Ring und Kugel	52,3 [°C]
Nadelpenetration (25°C)	60,0 [1/10 mm]

Tabelle 8.41.: Bitumenuntersuchungen (A) 60/70 (OMV), 1972

Prüfung	**Ergebnis**
Ring und Kugel	51,5 [°C]
Nadelpenetration (25°C)	63,0 [1/10 mm]

Tabelle 8.42.: Untersuchung Aushackstücke, 1973

Proben Nr.	Raumdichte [g/cm^3]	Rohdichte [g/cm^3]	Hohlraumgehalt [vol%]	Bitumengehalt [m%]
B I/1	2,43	2,47	1,7	8,4
B I/2	2,41	2,49	2,9	8,0
Mittelwert	2,42	2,48	2,3	8,2

Tabelle 8.43.: Zusammensetzung Asphaltdichtschicht aus Aushackstücken 1973

Bezeichnung	**B I/1**	**B I/2**
Bitumen B 60/70	8,4 %	8,0 %
16,0 mm	100,0%	100,0%
12,5 mm	98,3%	98,9%
8,0 mm	89,0%	87,0%
5,0 mm	74,7%	71,7%
2,0 mm	54,7%	51,3%
1,0 mm	39,8%	39,4%
0,63 mm	33,0%	34,4%
0,31 mm	24,8%	26,5%
0,2 mm	20,9%	20,1%
0,09 mm	11,6%	10,4%

8.11.2.1. Kontrollprüfung 2016

Tabelle 8.44.: Bohrkernentnahme 2016

Proben Nr.	Füllergehalt [m%]	Bindemittelgehalt [m%]	PEN [1/10 mm]	Δ PEN [1/10 mm]	R&K [°C]	Δ R&K [°C]
B 1 (B591C_F)	14,4	8,7	51	10,5*	59,0	7,1*
B 2 (B592C_F)	14,0	8,5	40	21,5*	59,2	7,3*
C 1 (B593C_F)	12,8	9,0	32	29,5*	60,8	8,9*
C 2 (B594C_F)	13,1	8,4	43	18,5*	57,8	5,9*
Mittelwert	13,6	8,7	41,5	20*	59,2	7,3*

*Werte auf Mittelwert der beim Bau verwendeten Frischbitumen (A) in Tabelle 8.40 und 8.41 bezogen.

Tabelle 8.45.: Beschreibung der entnommenen Bohrkerne

Bezeichnung	**Anmerkung**
B 1 (B591C_F)	kompakt
B 2 (B592C_F)	kompakt, Einzelrisse Oberfläche, t = 1 cm
C 1 (B593C_F)	Bohrkern gerissen an Trennfläche Binder - Beton sowie in Beton selbst in 7 cm Entfernung von Binder
C 2 (B594C_F)	Gerissen an Trennfläche Binder - Beton, ungerissene Trennschicht in Beton in ca. 5 cm Entfernung von Binder

Abbildung 8.6.: Bohrkerne DN 100 2016, links: B1, B2; rechts: C1, C2

8.12. AF 12

Datengrundlage für STA-Auswertung.

8.12.1. Allgemeines

- Baujahr 1981/82
- Stauziel ca. 2530 m.ü.A
- Höhe 40 m
- Böschungsneigung 1:1,5
- Böschung (Damm) 17500 m^2
- AF auf Böschung 9 cm (Höhe Dammkrone) - 12,0 cm (bei Herdmauer), maschineller Einbau (vertikale Bahnen)
- Bitumen B 80
- GK 12 mm
- Materialmanipulationszeit zirka 4 bis 5 Stunden (Mischanlage im Tal)
- KK-LKWs ohne Planen
- Jahresspeicher

8.12.2. Bestandsdaten 1982

Die Untersuchungen des Grundbitumen wurden an Proben aus dem Bitumentank, welcher anschließend die Mischanlage versorgte, vorgenommen.

Tabelle 8.46.: Bitumenuntersuchungen (A) B80 Villbit, 1982

Prüfung	Ergebnis
Ring und Kugel	46,0 [°C]
Nadelpenetration (25°C)	75,5 [1/10 mm]

Tabelle 8.47.: Bitumenuntersuchungen (A) B80 Spezial, 1983

Prüfung	Ergebnis
Ring und Kugel	47,8 [°C]
Nadelpenetration (25°C)	81,5 [1/10 mm]

Tabelle 8.48.: Untersuchung Asphaltproben (Bohrkerne und Aushackstücke), 1982 und 1983

Proben Nr./Jahr	Raumdichte [g/cm^3]	Rohdichte [g/cm^3]	Hohlraumgehalt [vol%]	Bitumengehalt [m%]	R&K [°C]	PEN [1/10 mm]
Z3/1982	2,435	2,477	1,62	7,61	49,9	44,0
Z8/1982	2,423	2,489	2,42	7,38	55,7	33,9
Z11/1982	2,422	2,475	2,15	6,87	52,7	40,2
Z19/1982	2,412	2,448	1,46	7,38	51,9	46,0
Mittelwert*	2,411	2,472	2,50	7,38	52,6	41,0
Z34/1983	2,381	2,431	2,05	7,27	53,9	41,5
Z37/1983	2,370	2,461	3,70	6,86	47,5	51,2
Mittelwert*	2,390	2,452	2,54	6,99	50,7	46,4

* Mittelwerte wurden von allen gezogenen Bohrkernen ermittelt, in der Tabelle sind nur jene angeführt bei denen auch Bitumenuntersuchungen durchgeführt wurden.

8.13. AF 13

Datengrundlage für STA-Auswertung.

8.13.1. Allgemeines

- Baujahr 1973 (erste Phase) - Bitumen B 80
- Baujahr 1980 (zweite Phase) - Bitumen B 70
- Stauziel (zweite Phase) ca. 2420 m.ü.A
- Böschungsneigung 1:1,5
- Dichtasphalt 0 - 12 mm
- Materialmanipulationszeit ca. 3 bis 4 Stunden (Mischanlage im Tal)
- Betriebsform: Jahresspeicher
- KK-LKWs ohne Planen

8.13.2. Bestandsdaten 1973

Tabelle 8.49.: Bitumenuntersuchungen (A) B80, 1973

Prüfung	Ergebnis
Ring und Kugel	48,0 [°C]
Nadelpenetration (25°C)	82 [1/10 mm]

8.13.2.1. Kontrollprüfung 1980

Tabelle 8.50.: Bitumenkennwerte B 70 laut Richtlinie (1980)

Prüfung	Ergebnis
Ring und Kugel	48 - 50 [°C]
Nadelpenetration (25°C)	ca. 60 - 85 [1/10 mm]

Tabelle 8.51.: Zusammensetzung Asphaltdichtschicht, 1980 (Siebdurchgang)

Bezeichnung	**Mittelwert BK**
B 70	7,53 %
18,0 mm	100,0%
12,5 mm	97,1%
8,0 mm	76,3%
5,0 mm	62,1%
2,0 mm	43,6%
1,0 mm	33,1%
0,63 mm	28,0%
0,31 mm	22,2%
0,20 mm	19,2%
0,09 mm	13,1%

Tabelle 8.52.: Kontrollprüfung 1980, Bohrkernentnahme

Proben Nr.	Raumdichte [g/cm^3]	Rohdichte [g/cm^3]	Hohlraumgehalt [vol%]	Bitumengehalt [m%]	R&K [°C]
2	2,395	2,448	2,16	7,58	55,1
3	2,382	2,460	3,17	7,75	56,7
4	2,507	2,560	2,06	7,25	50,8
Mittelwert*	2,428	2,489	2,46	7,53	54,2

8.14. AF 14

Datengrundlage für STA-Auswertung.

8.14.1. Allgemeines

- Baujahr 1979 (1. Phase)
- Stauziel ca. 2390 m.ü.A
- Stauhöhe 61 m
- Böschungsneigung 1:1,5
- Bitumensorte B 80 Spezial
- Sieblinie Dichtasphalt 0 - 12 mm
- Materialmanipulationszeit ca. 2,5 Stunden (Mischanlage im Tal)
- KK-LKWs ohne Planen
- Betriebsform: Pumpspeichersystem (Tagesganglinie)

8.14.2. Bestandsdaten 1979

Tabelle 8.53.: Kontrollprüfung 1979, Untersuchung Aushackstücke

Proben Nr.	Raumdichte [g/cm^3]	Hohlraumgehalt [vol%]	B. Gehalt [m%]
A1	2,459	1,12	8,4
A2	2,449	2,175	10,4
A3	2,470	1,325	9,52

8.14.2.1. Kontrollprüfungen 1983

Tabelle 8.54.: Bitumenuntersuchungen (A) B80 Spezial, 1983

Prüfung	**1**	**2**	**3**	**Mittelwert**
Ring und Kugel [°C]	49,0	49,5	48,8	49,1
Nadelpenetration (25°C) [1/10 mm]	73,5	75,5	79,5	76,2

Tabelle 8.55.: Untersuchung Asphaltbetonkernen, Alte Decke (1982) und Neue Decke (1983)

Proben Nr./Jahr	Raumdichte [g/cm^3]	Rohdichte [g/cm^3]	Hohlraumgehalt [vol%]	Bitumengehalt [m%]	R&K [°C]	PEN [1/10 mm]
Alte Decke						
K1b/1982	2,411	2,461	2,03	7,9	49,4	67,5
K3/1982	2,426	2,436	0,42	8,0	48,5	66,0
K5/1982	2,480	2,594	4,39	4,9	57,5	28,7
K7/1982	2,467	2,491	0,95	7,3	52,2	39,8
Mittelwert*	2,425	2,457	1,90	7,9	51,9	50,5
Neue Decke						
O23a/1983	2,360	2,422	2,54	7,29	53,5	52,7
O62/1983	2,273	2,431	6,48	7,44	56,0	46,0
O65/1983	2,385	2,444	2,43	7,34	54,5	56,3
O52/1983	2,367	2,455	3,60	7,45	55,1	43,3
O52/1983	2,367	2,455	3,60	7,45	55,1	43,3
Mittelwert*	2,367	2,436	2,83	7,58	54,5	49,3

* Mittelwerte wurden von allen gezogenen Bohrkernen ermittelt, in der Tabelle sind nur jene angeführt bei denen auch Bitumenuntersuchungen durchgeführt wurden.

8.15. AF 15

Datengrundlage für STA-Auswertung.

8.15.1. Allgemeines

- Baujahr 1984
- Stauziel ca. 1540 m.ü.A
- Böschungsneigung 1:1,2 - 1:1,5
- AF auf Dammböschung 7 - 8 cm
- Bitumensorte B 80 Spezial
- Sieblinie Dichtasphalt 0 - 12 mm
- KK-LKWs ohne Planen
- Betriebsform: Tagesspeicher

8.15.2. Bestandsdaten 1984

Tabelle 8.56.: Bitumenkennwerte B 80 Spezial (1984)

Prüfung	**Ergebnis**
Ring und Kugel	50,5 [°C]
Nadelpenetration (25°C)	78 [1/10 mm]

8.15.2.1. Kontrollprüfung 1985

Tabelle 8.57.: Kontrollprüfung Bohrkerne, 1985

Proben Nr.	Raumdichte [g/cm³]	Rohdichte [g/cm³]	Hohlraumgehalt [vol%]	Bitumengehalt [m%]	R&K [°C]	PEN [1/10 mm]
5	2,406	2,444	1,56	7,61	61,7	48,0
8	2,365	2,446	3,33	7,68	61,2	48,0
10	2,432	2,465	1,33	7,36	61,3	45,0
Mittelwert	2,401	2,452	2,07	7,55	61,4	47,0

9. Bestandsdaten AF - Kanäle

9.1. Ausleitungskanal

Datengrundlage für LTA-Auswertung.

9.1.1. Allgemeines

- Baujahr 1963
- Stauziel ca. 260 m.ü.A
- Dammhöhe ca. 9 m
- Böschungsneigung 1:1,5
- AF auf Böschung und Sohle (4 cm Dichtschicht)
- B 60 (Kennwerte laut [59] R&K 52-54, PEN 51-69)
- Gesamtlänge Kanal 6700 m
- Stauhöhe ca. 7,2 m
- Hohlraumgehalt (Marshallprobekörper) ca. 1,3 vol%
- Verdichtung durch Tandem - Walzen mit 4,2 t

9.1.2. Bestandsdaten

Tabelle 9.1.: Zusammensetzung Asphaltbetondichtschicht

Bezeichnung	**Anteil [m%]**
Bitumen B 60 (Bitumen ex Raffinerie Nagylengyel)	8,0%
Füller	13,9%
Sand	40,3%
Splitt/Kies	45,8%
Grobkorn	24,9%

Für die Bewertung und Veranschaulichung des Versprödungszustandes wurden sämtliche Messdaten der Jahre 1963 (Fertigstellung), 1982 (Kontrollprüfung) und 2002 (Kontrollprüfung) in den folgenden Abbildungen visualisiert.

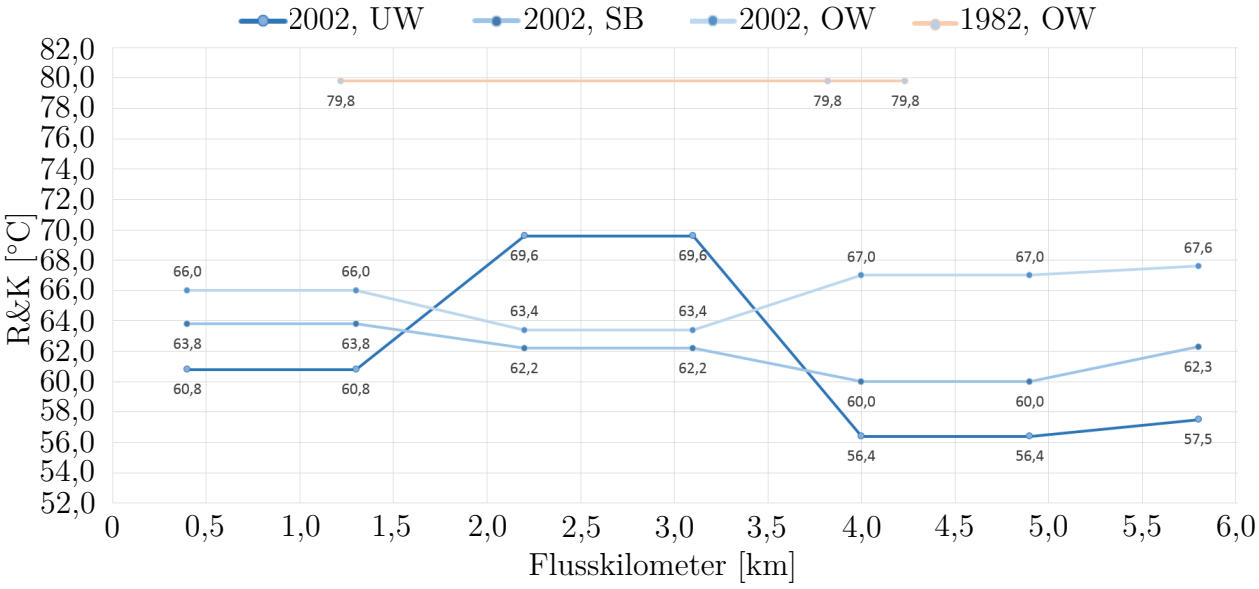


Abbildung 9.1.: Erweichungspunkt Ring und Kugel, linke Kanalseite, Kontrollprüfungen 1982 und 2002

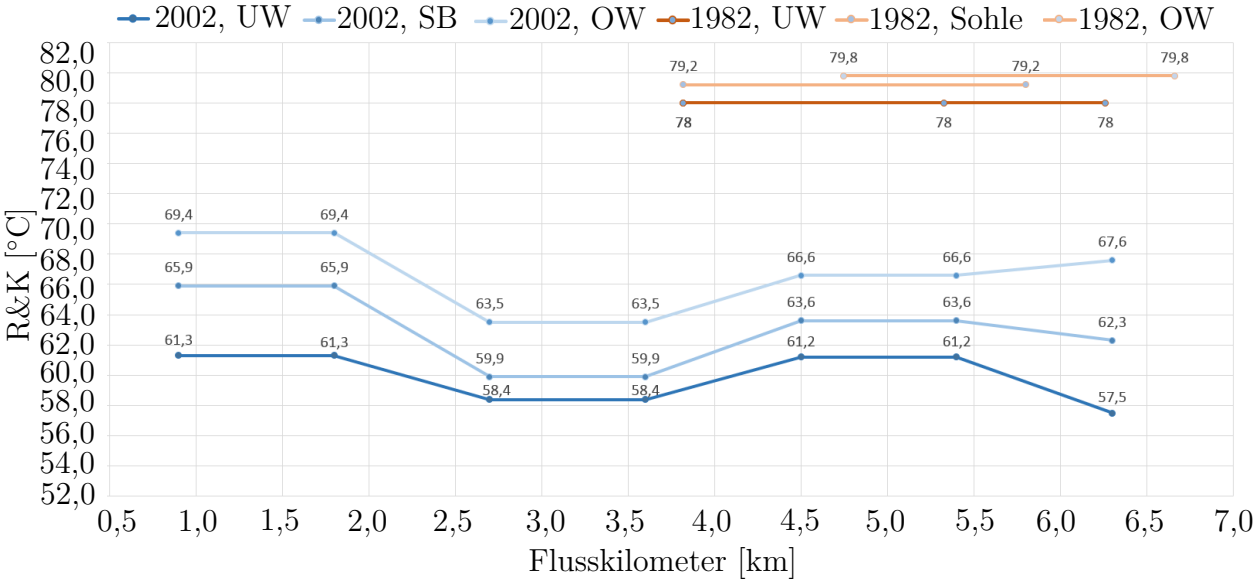


Abbildung 9.2.: Erweichungspunkt Ring und Kugel, rechte Kanalseite, Kontrollprüfungen 1982 und 2002

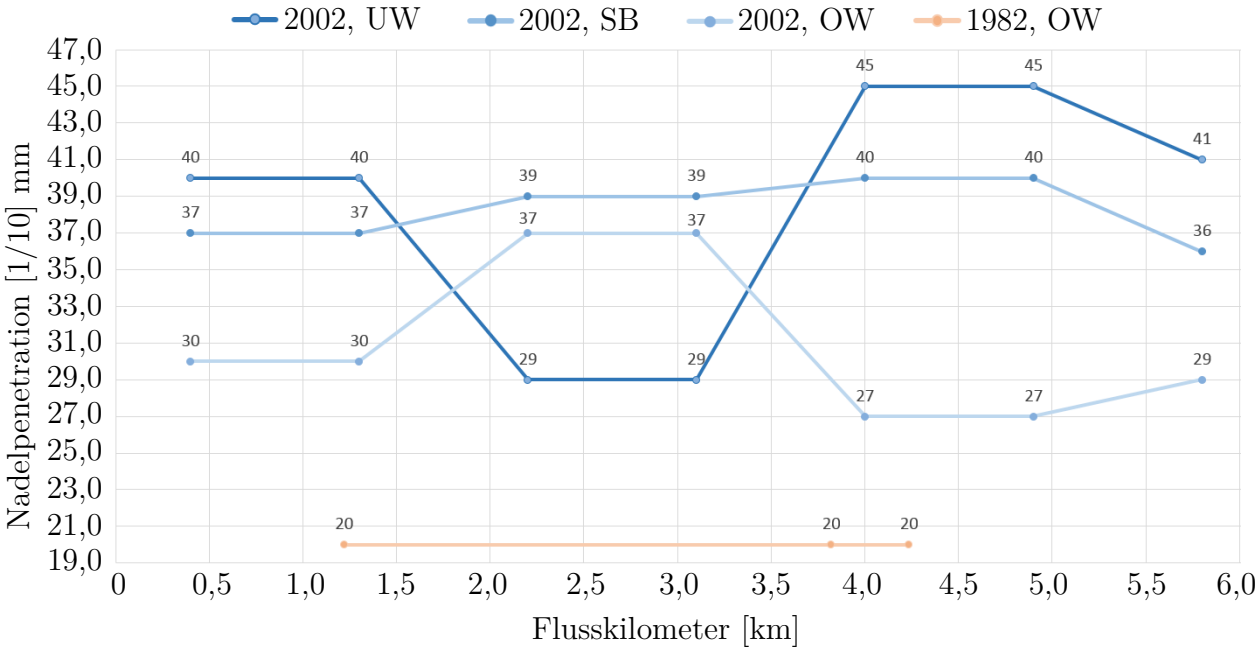


Abbildung 9.3.: Nadelpenetration, linke Kanalseite, Kontrollprüfungen 1982 und 2002

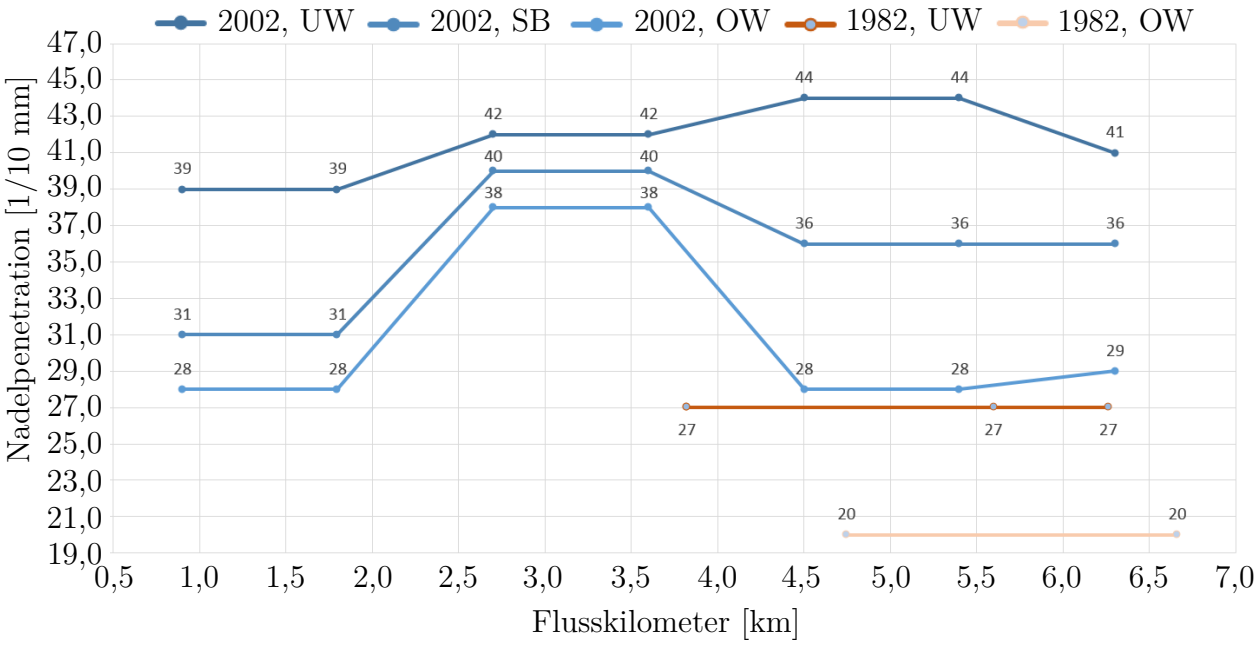


Abbildung 9.4.: Nadelpenetration, Rechte Kanalseite, Kontrollprüfungen 1982 und 2002

9.2. Oberwasserkanal

Datengrundlage für LTA-Auswertung.

9.2.1. Allgemeines

- Baujahr 1974
- AF an Böschung (5 cm Dichtschicht Talseitig, 7 cm Dichtschicht Bergseitig) und Sohle (6 cm Dichtschicht)
- Gesamtlänge Kanal 2500 m
- Stauhöhe ca. 6 m
- Böschungsneigung 1:1,75
- Hohlraumgehalt (Marshallprobekörper) ca. 1,3 vol%
- Bitumensorte B 60
- Bitumengehalt 6,5 - 7,5 m%
- Sieblinie Dichtasphalt 0-11 mm aus vier Fraktionen zusammengesetzt

9.2.2. Bestandsdaten

Tabelle 9.2.: Oberwasserkanal, Kontrollprüfung 2008

Bitumensorte:	B 60 (Neu ca. B 50/70)		
Probe Nr.	Lage	R&K [°C]	PEN [1/10 mm]
BK1	OW	56,0	56
BK2	UW	52,2	-*

*zu wenig Bindemittel

Tabelle 9.3.: Zusammensetzung Asphaltdichtschicht aus Kontrollprüfung 2008

Bezeichnung	**Anteil [m%]**
Bitumen B 60	7,2%
Fülleranteil	16,0%
Sandanteil	31,6%
Splitt/-Kiesanteil	52,4%
Grobkornanteil	7,2%

10. Abgleich und Interpretation der erhobenen Bestandsdaten mit Teil II

Für eine fundierte und schlüssige Interpretation der Bestandsdaten in Bezug auf den Versprödungsprozess während der Liegedauer, ist die Kenntnis der Betriebsform (Wasserspiegelschwankungen) sowie die Ausrichtung (Exposition, Himmelsrichtung etc.) des betrachteten Dichtungsabschnittes von großer Bedeutung. Um das Spektrum diverser Einwirkungen auf die Dichtung zu berücksichtigen muss grundsätzlich zwischen Dichtungen von Speichern und Dämmen (Reservoirs) sowie von Kanalabdichtungen unterschieden werden (Beschreibung der möglichen Einwirkungen auf AF siehe [37]).

10.1. AF - Reservoirs

Die Art der Speicherbewirtschaftung hat einen maßgebenden Einfluss auf die Dauerhaftigkeit von Asphaltbetonoberflächendichtungen. In früher Vergangenheit entwickelte sich ein verstärkter Trend zum Neubau oder Umrüstung von bestehenden Anlagen hin zu Pumpspeicherkraftwerken, was eine Veränderung der Speicherbewirtschaftung mit sich bringt. Bei diesen Kraftwerkstypen und deren Betriebsform kommt es zu vermehrten Wasserspiegelschwankungen in den Speichern und damit verbunden zu einer Veränderung der Belastungen beziehungsweise Einwirkungen auf die Dichtungssysteme. Diese Betriebsform führt zu erhöhten Anforderungen an den Versprödungs- und Belastungswiderstand des Asphaltbetons. Für jede Betriebsform und die daraus resultierenden Einwirkungen hat eine Prüfung hinsichtlich des Dichtungsdesigns zu erfolgen. Durch den zeitabhängigen Betriebsspeicherspiegel liegen die Dichtungen unterschiedlich lange Zeiträume ohne oder nur mit geringer Wasserüberdeckung frei an der Luft (Menge $ROS_{unterWasser} << ROS_{Luft}$). Die untersuchten Dichtungen von Pumpspeichern (z.B.: AF 8 und 9) in Abbildung 10.3 und 10.4 weisen eine zeitabhängig stärkere Versprödungen auf. Besonders im Winter bei tiefen Temperaturen können Frostschäden durch das Absenken des Stauziels auftreten. In der Asphaltmatrix entstehen durch diesen Vorgang lokale Überschreitungen der aufnehmbaren Spannungen welche zu einem Entstehen und Fortschreiten von Rissen führen kann. Eine weitere Gefährdung für AF sind Eisschollen, welche beim Absenken des Wasserstandes durch Abrutschen an der Dichtung Schäden (Furchen) verursachen können. Im Winter wie auch im Sommer können freiliegende Dichtungsstellen Probleme hinsichtlich der Temperatur und der damit verbundenen Spannungen darstellen. Durch das thermoviskoelastische Materialverhalten (siehe Abbildung 10.5) wird das Bindemittel bei hohen

Temperaturen weicher und neigt zu Kriechverformungen. Dies kann durch die richtige Wahl der Sieblinie und des Bindemittels verhindert werden. Die UV-Strahlung führt zu einer oberflächlichen Versprödung welche lediglich bis zu 5 μm in das Material eindringt, jedoch den Ursprung für weiterführende Schäden darstellen kann (fortschreitender Prozess, ROS können tiefer in das Material eindringen, gefrierendes Wasser etc.). Im Vergleich von diversen AF von Reservoirs, ist eine Häufung von Schadstellen in den Wasserwechselzonen und darüber erkennbar, selbiges gilt auch für AF von Kanälen. Eine genaue Beschreibung von Schäden und deren Ursachen ist in [44] zu finden.

Die aufbereiteten Daten in Teil III zeigen, dass bei älteren Projekten größtenteils die Dokumentation des Einbauprozesses in einem sehr geringen Umfang erfolgte beziehungsweise nicht lückenlos archiviert wurde. Dieser Umstand schränkt das wissenschaftlich verwertbare Datenkollektiv erheblich ein. Jüngere Bauvorhaben wie in Abschnitt 8.10, weisen einen sehr hohen Kontrollumfang aufgrund der implementierten, den Baufortschritt begleiteten Qualitätskontrolle auf. Diese Vorgehensweise hat eine große Bedeutung für die Planung von spätere Sanierungsmaßnahmen sowie die Feststellung von Schadensursachen und wird daher für zukünftige Projekte empfohlen.

10.1.1. Beschreibung und Interpretation der Bestandsdaten

Die Sanierung der AF 10 (Abschnitt 8.10) zeigt in Tabelle 8.37 eine genaue Kontrolle und Dokumentation der Bindemittelkennwerte vor und während des Einbaus. Beim Abgleich mit den Kennwerten des ungealterten Bitumens kann lediglich an drei Proben eine leichte herstellungsbedingte Versprödung aufgrund des geringeren PEN Wertes bei annähernd gleichbleibenden R&K Werten festgestellt werden. Die Temperatur des Mischgutes im Fertiger lag im Schnitt bei 185 °C (Min. 173 °C Max. 191 °C). In diesem Temperaturbereich treten bei Bitumen 70/100 unter gewöhnlichen Bedingungen geringe Versprödungserscheinungen auf. Hierfür sind kurze Misch- und Transportzeiten (kurze Oxidationszeit, niedrige Mischtemperatur) essenziell. Die Nähe der Mischanlage (zirka 23-25 km) und die Abdeckung der KK-LKWs mit Planen stellte sicher, dass das Mischgut keine unnötig hohen Temperaturen beim Herstellungsprozess ausgesetzt war und zeitnahe eingebaut werden konnte (vgl. Abkühlung Kapitel 2). Aufgrund dieser Randbedingungen waren die auftretenden Materialversprödungen prozentual geringer als in der simulierten Kurzzeitalterung (vgl. Abbildung 5.1 und 5.3 mit Tabelle 8.37). Für die Laborsimulationen wurde nicht das exakt gleiche Bindemittel verwendet, lediglich die selbe Sorte. Aus diesem Grund kam es zur Abweichung der Messergebnisse zwischen Laborprüfungen und Baustellenproben.

Exkurs: *Diverse Vergleichsuntersuchungen zeigen, dass verschiedene Typen von Labormischern unterschiedlich "scharf" mischen (scharf ≡ Einfluss des Mischers auf Versprödung) und der Einfluss auf die Alterung teilweise beträchtlich höher ist als bei Asphaltmischanlagen.*

Die Zustandserhebung anhand von zurückgewonnenen Bitumen aus Bohrkernen des Speichers in Abschnitt 8.9 zeigt eine Dichtung welche nach über 40 Jahren Liegedauer noch gute Gebrauchseigenschaften aufweist. Während die R&K Werte (im Mittel 54,4°C) bei den Proben 26 bis 52 eine mäßige Erhöhung (Δ_{Mittel} 7,4 °C) im Vergleich zu den Werten des ungealterten B 80 aufweisen (Bitumen 80 ungealtert R&K im Mittel 47 °C) zeigen die PEN Werte eine stärkere Versprödung von im Mittel 47,4 [1/10 mm], was einem Δ_{Mittel} von 37,6 [1/10 mm] entspricht. Nach heutigen Normen würde das gealterte Bitumen laut den R&K Werten einem 50/70 und nach den PEN Werten einem 35/50 entsprechen. Die Proben 1 bis 24 und 62 bis 65 zeigen geringere Versprödungserscheinungen, laut R&K Werten würden die Proben einem 70/100 an der unteren Grenze und nach den PEN Werten einem 50/70 entsprechen. Die Dichtung weist nach 40 Jahren Liegedauer einen guten Zustand über die gesamte Fläche auf und erfüllt bis auf lokale Fehlstellen (diverse Ursachen siehe [44]) alle Anforderungen. Die Oberflächendichtungen des Ober- und Unterbeckens der Kraftwerksanlage (KW), welche in Abschnitt 8.8 beschrieben werden weisen stark abweichende Zustände auf. Die Bitumenkennwerte des Unterbeckens sind vergleichbar mit jenen aus Abschnitt 8.9, die des Oberbeckens zeigen starke Versprödungserscheinungen und großräumige Schadstellen. Im Ober- und Unterbecken wurde für die Herstellung ein B 65 verwendet (heute ca. 50/70), nach über 40 Jahren entspricht das rückgewonnene Bindemittel im Unterbecken einem 35/50 an der Grenze zum 30/45 (geringe Verschlechterung der Eigenschaften) und das Bindemittel im Oberbecken einem 20/30 (starke Verschlechterung der Eigenschaften). Während die Dichtung des Unterbeckens bis auf lokale Fehlstellen den gestellten Anforderungen genüge trägt, ist eine Komplettsanierung des Oberbeckens unumgänglich. Der nachträgliche Einbau einer Mastixversiegelung kurz nach Fertigstellung können die ähnlichen Bitumeneigenschaften im Oberbecken wie bei der Dichtung in Abschnitt 8.9 trotz unterschiedlicher Ausgangsbindemittel erklären. Da keine genaue Dokumentation des Herstellungsprozesses vorliegt, können keine eindeutigen Gründe für die unterschiedlichen Alterungszustände zwischen Ober- und Unterbecken identifiziert werden. Die weitere Entfernung des Oberbeckens von der Mischanlage und die daraus resultierenden längeren Transportzeiten können als möglicher Grund für eine stärkere transportbedingte Versprödung angeführt werden. Die Verdichtungswilligkeit des Mischgutes sinkt mit fallender Temperatur, diese Überlegung des verstärkten Abkühlens aufgrund des längeren Transportweges im Vergleich zum Unterbecken wird durch die schlechtere Verdichtung im Oberbecken gestützt (siehe Hohlraumgehalt BK 5.1 und 5.2 in Tabelle 8.26). Das Volumen und die Eindringtiefe von ROS nimmt mit steigendem Hohlraumgehalt zu, was wiederum eine verstärkte Versprödung bewirkt. Aufgrund der Betriebsführung kann davon ausgegangen werden, dass die Dichtung im Oberbecken längere Zeiträume nicht von Wasser bedeckt war. Die Liegedauer der AF des Speichers in Abschnitt 8.6 beträgt ca. 50 Jahre und wurde mit einem 70/100 hergestellt. Bei einer Kontrollprüfung wurden die R&K und PEN Werte in Tabelle 8.21 ermittelt. Das Bindemittel für die Laboranalyse wurde lediglich von Proben an der Sohle des Speichers gewonnen. Durch die Wasserüberdeckung, welche das Vorhandensein von Oxidationsmittel begrenzt kam es zu keiner merklichen Alterung des Bindemittels während der Liegedauer. Die Kontrolle der Einbautemperaturen in Tabelle 8.19 und 8.20 zeigt teilweise überhöh-

te Temperaturen des Mischgutes im LKW bzw. Fertiger. Die Probendichte an der Sohle ist zu gering um den Gesamtalterungszustand festzustellen. Lokal auftretende Schadstellen können auf die teilweise überhöhten Temperaturen während des Herstellungsprozesses zurück geführt werden. Die Schäden führten zu einer Komplettsanierung der Oberflächendichtung welche im Abschnitt 8.6.3 dokumentiert ist. Die beiden Tabellen 8.22 und 8.23 zeigen eine geringen herstellungsbedingte Alterung (vgl. Tabelle 8.10), welche durch das leichte Abfallen des PEN Wertes gezeigt wird (kurze Materialmanipulationszeit). Die Oberflächendichtung des Dammes in Abschnitt 8.3 wurde nach 35 Jahren aufgrund von verstärkt auftretenden Schadstellen saniert. Die Bitumenproben aus den Bohrkernen in Tabelle 8.9 welche knapp unterhalb des Stauziels genommen wurden, weisen keinen stark fortgeschrittenen Versprödungszustand auf, welcher die Schadstellen (Blasen, Netzrisse und Einzelrisse) verursachen könnte. Ausgehend von den Bitumenkennwerten in Tabelle 8.7 entspricht das rückgewonnene Bindemittel einem 50/70 (Alterung von 80/100 auf 50/70). Das auftretende Schadensbild der Blasen wird auf eine Dampfbildung zwischen den Lagen der Dichtung zurückgeführt. Die Netzrisse entstanden vermutlich durch eine Überlagerung von Einbaufehlern. Der in Abschnitt 8.2 beschriebene Damm weist ein sehr ähnliches Schadensbild wie jener in Abschnitt 8.3 auf. Die Bitumenkennwerte aus den Bohrkernen zeigen eine Verschlechterung des Bindemittels von einer Klasse (untere Grenze 70/100 zu 50/70). Die Dichtung in Abschnitt 8.1 weist eine gute Dokumentation des herstellungsbedingten Alterungsprozesses auf (siehe Tabelle 8.2). Durch die Festlegung der Einbautemperatur auf 160 °C und der Begrenzung der Transportwege wurde eine Überhitzung des Mischgutes vermieden. Die marginalen Erhöhungen der R&K Werte bestätigen einen sehr gut funktionierenden Herstellungsprozess. Da keine vergleichbaren Nadelpenetrationsuntersuchungen durchgeführt wurden, kann keine eindeutige Aussage zu den herstellungsbedingten Versprödungen getroffen werden. Die auftretenden Schäden nach der Herstellung (Kriechen der Dichtung) werden mit der Mischgutrezeptur (Bindemittelgehalt mehr als 9 m%) begründet.

10.1.2. Vergleich der realen Kurzzeitalterung (STA) mit den Laborergebnissen

Abbildung 10.1 und 10.2 zeigen eine Gegenüberstellung des gemessenen (dokumentierten) Alterungsfortschritts während des Transportes (Herstellungsprozesses, STA) bei Wasserbaustellen im Vergleich zu den erzeugten Materialversprödungen und -versteifungen der Laborversuche. Der entwickelte STA Mischgutalterungsversuch (siehe Kapitel 2) zeigt besonders in den für zukünftige Simulationen des Alterungsprozesses vorgesehenen Kombinationsversuchsstufen (V4 - V6) eine sehr gute Übereinstimmung mit den Feldmessungen beziehungsweise liefert dieser immer leicht konservative Materialkennwerte.

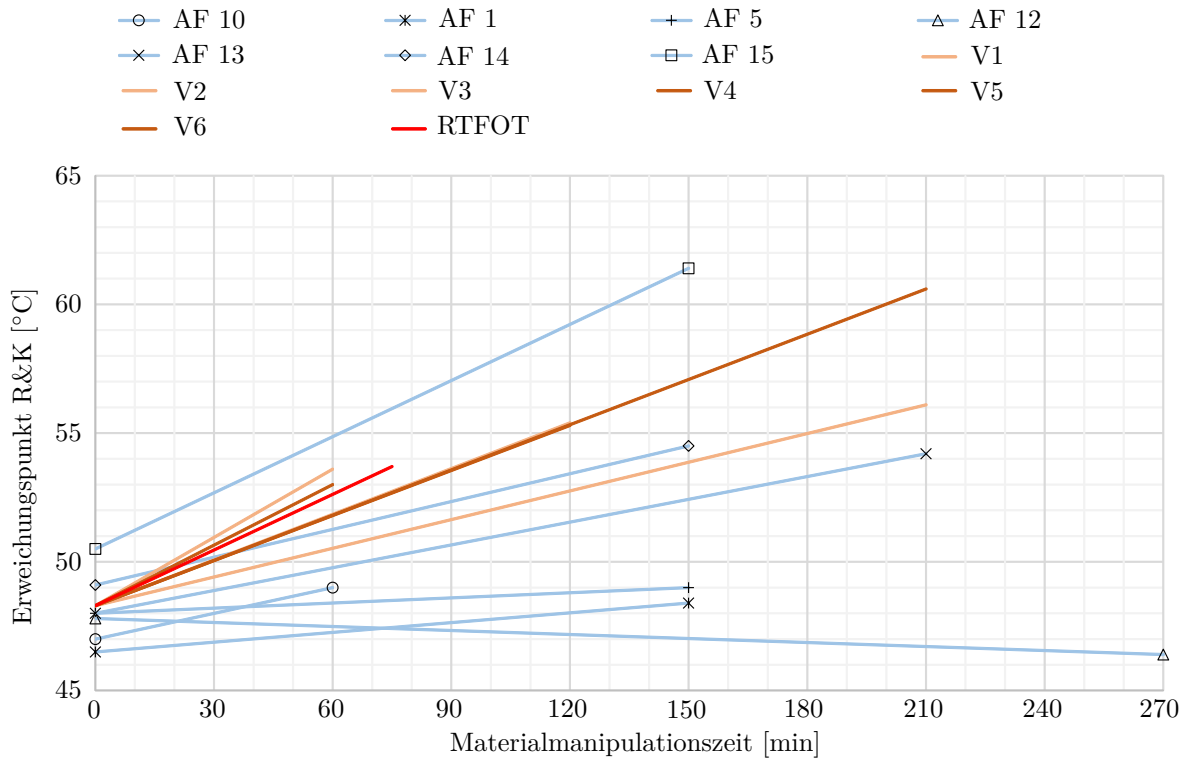


Abbildung 10.1.: Kurzzeitalterung (STA) Bestandsdaten versus Laborversuche (70/100), Erweichungspunkt Ring und Kugel

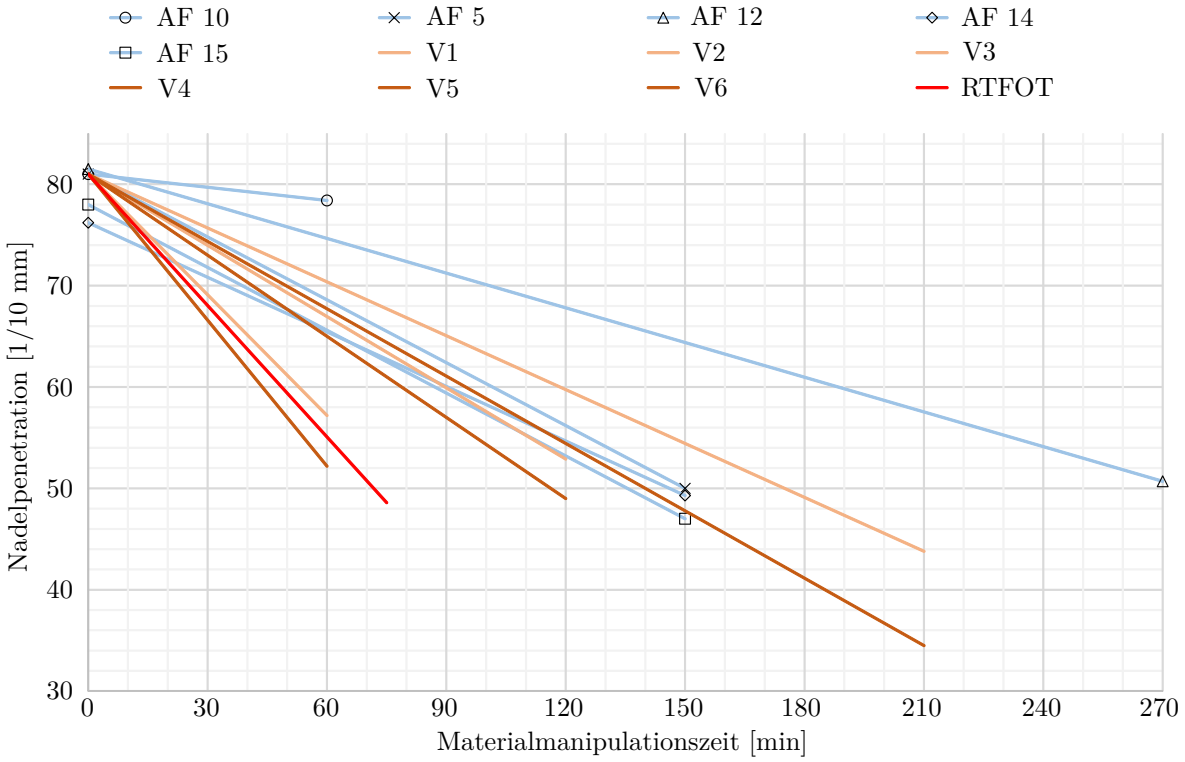


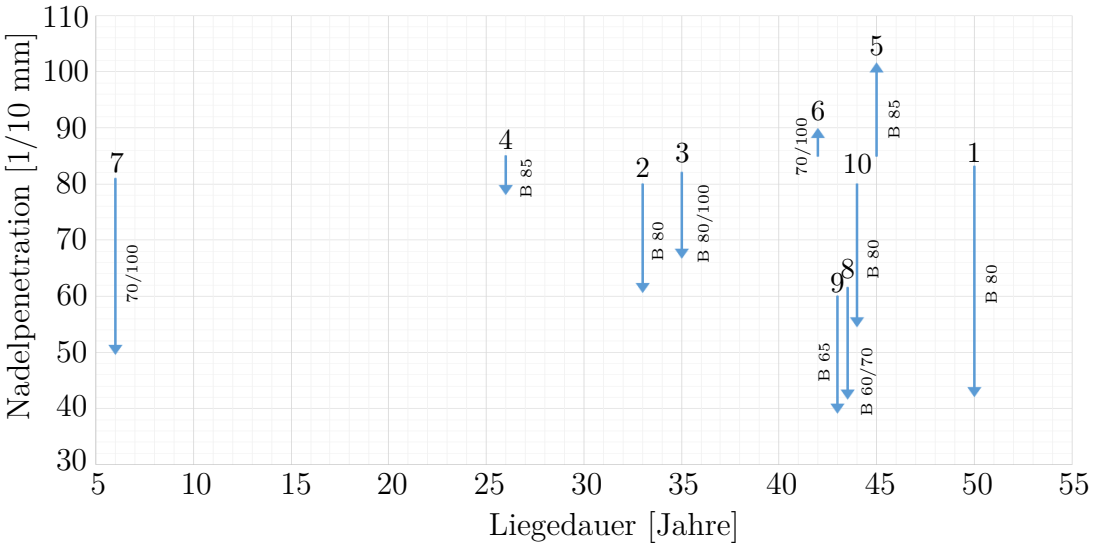
Abbildung 10.2.: Kurzzeitalterung (STA) Bestandsdaten versus Laborversuche (70/100), Nadelpenetration

Im Simulationsbereich zwischen 0 bis 60 Minuten sind die Ergebnisse deutlich konser-

vativer als in der Realität (siehe Abbildung 10.2). Grund dafür ist eine gleichmäßigere Durchströmung und Oxidation des Testmischgutes im Versuchsstand als im Fertigungsprozess (LKW-Transport).

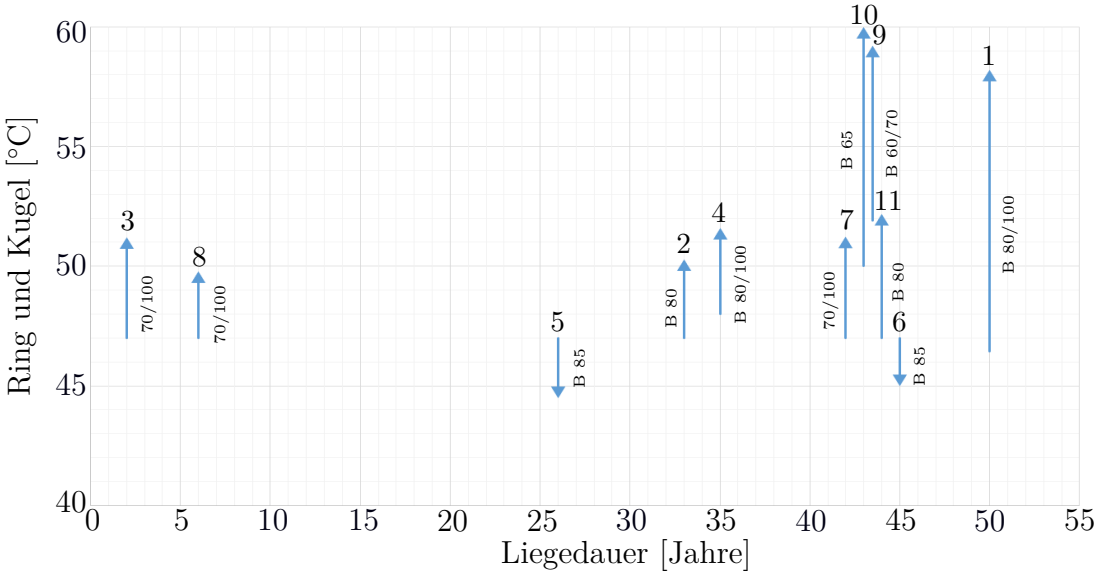
10.1.3. Auswertung der Langzeitalterung (LTA)

Abbildungen 10.3 und 10.4 zeigen die gesamte Versprödung des Bindemittels ($A_{ges.} = A_{kurz} + A_{lang}$) anhand der Nadelpenetrations- und Ring- und Kugelwerte. Durch Abzug der im Labor ermittelten Materialalterung (Referenz V4/V5, 60-120 min) aufgrund der Kurzzeitalterung ($A_{kurz,60-120min}$) für das Bindemittel 70/100 zeigt sich der theoretisch sehr geringe Versprödungs- und Versteifungszuwachs während der Liegedauer. Um adäquate Aussagen zur Veränderung der Steifigkeit und Elastizität des Bindemittels tätigen zu können, liefern die Penetrtions- und Ring- und Kugelmessungen eine grundlegende und solide Aussage. Weiterführende und präzisere Analysen ermöglichen DSR Untersuchungen (siehe Abschnitt 6.4).



1. AF 1, 50 Jahre
2. AF 2, 33 Jahre
3. AF 3, 35 Jahre
4. AF 4, 26 Jahre
5. AF 4*, 45 Jahre
6. AF 6*, 42 Jahre
7. AF 10, 6 Jahre
8. AF 11, 43,5 Jahre
9. AF 8, 43 Jahre
10. AF 9, 44 Jahre

Abbildung 10.3.: Veränderung der Nadelpenetrationswerte während des Herstellungsprozesses und der Liegedauer (*Messfehler)



1. AF 1, 50 Jahre
2. AF 2, 33 Jahre
3. AF 2 Sanierung, 2 Jahre
4. AF 3, 35 Jahre
5. AF 4*, 26 Jahre
6. AF 4*, 45 Jahre
7. AF 6, 42 Jahre
8. AF 10, 6 Jahre
9. AF 11, 43,5 Jahre
10. AF 8, 43 Jahre
11. AF 9, 44 Jahre

Abbildung 10.4.: Veränderung der Ring- und Kugelwerte während des Herstellungsprozesses und der Liegedauer (*Messfehler)

10.1.3.1. Exemplarische Auswertung A_{Gesamt}, AF 10

Für die Sanierung der AF 4 (siehe 8.10) liegen Daten für das STA und das LTA vor. Die AF weist eine Liegedauer von 6 Jahren auf, dies resultiert in einem sehr geringen Alterungsprozess während der Liegedauer. Tabelle 10.1 zeigt die Anteile des STA und des LTA an der Gesamtalterung (A_{Gesamt}).

Tabelle 10.1.: Anteile STA und LTA an A_{Gesamt}

	Frisch (A)	STA (2010)	Δ % zu (A)	LTA (2016)	Δ % zu STA
PEN	81,0	78,4*	-3,2	49,5**	-36,9
R&K	47,0	49*	+4,3	49,8	+1,6

*gemessen an MG-Probe aus Fertiger, ** Starke Abweichung zwischen Bohrkernen (Möglicher Einfluss - Mastixversiegelung)

Die Materialversprödung und -versteifung für das STA fällt im Mittel für die PEN mit -3,2 % und für die R&K Werte mit + 4,3 % in Bezug auf das Frischbitumen sehr gering aus. Zu beachten ist, dass die Bestimmung der Kennwerte an Mischgut aus dem Fertiger nach kurzer Materialmanipulationszeit durchgeführt wurde. Um das gesamte STA abzubilden, hätte die Bestimmung nach dem fertigen Einbauprozess an Bohrkernen oder Aushackstücken erfolgen müssen. Die Materialkennwerte des LTA zeigen eine starke Streuung der

Nadelpenetrationswerte (siehe Tabelle 8.38) in Abhängigkeit der Bohrkernentnahmestelle (Abstand 0,3 m). Für die Beurteilung der Gesamtalterung beziehungsweise des Dichtungszustandes sind daher, für diesen Fall, die R&K Werte (Standartbitumen 70/100, geringe Streuung der Messwerte) sowie die DSR Messungen maßgebend. Der leichte Anstieg des Erweichungspunktes R&K während des STA von +4,3% zeigt einen sehr gut funktionierenden Herstellungsprozess. Die durchschnittliche Erhöhung des Messwertes von +1,6% während der Liegedauer von 6 Jahren entspricht der allgemeinen Erwartungshaltung. Unter Berücksichtigung der DSR Ergebnisse in Abschnitt 8.10.3.1, welche die Interpretationen auf Grundlage der R&K Werte bestärken, kann der Zustand der Dichtung beziehungsweise des Bindemittels nach 6 Jahren Liegedauer als sehr gut beurteilt werden.

10.2. AF - Kanäle

Neben den in Abschnitt 10.1 beschrieben Einwirkungen, sind besonders Abrieb und Erosion für Dichtungsschäden bei Kanälen verantwortlich. Die Anfälligkeit von Asphaltoberflächendichtungen im Hinblick auf Abrieb und die Erosion ist sehr stark vom Aufbau des Dichtmaterial abhängig, insbesondere von der Wahl der Gesteinskörnung, des Bindemittels und der Schichtdicke. Auch die Erosionsdauer ist von großer Bedeutung. Falls der Angriff auf die Dichtung über einen längeren Zeitraum erfolgt, müssen besonders bei den Anschlüssen beziehungsweise Übergängen der Asphaltschichten die Fugen entsprechend ausgelegt werden. Im Großen und Ganzen ist der Widerstand gegen Abrieb und Erosion von Asphaltoberflächendichtungen nicht markant schlechter als jener von Beton.

Abschnitt 9.1 zeigt eine Zusammenstellung von Messdaten eins 6,7 km langen Ausleitungskanals mit einer Asphaltbetonliegedauer von über 40 Jahren. Die Abbildungen 9.1, 9.2, 9.3 und 9.4 zeigen eine eindeutige Abhängigkeit des Alterungsfortschrittes von der Lage der Bohrkernentnahme. Das verwendete Bitumen 50/70 weist im Allgemeinen einen PEN Wert zwischen 50 - 70 [1/10 mm] und einen R&K Wert zwischen 45 - 55 °C auf (keine Daten der Erstprüfung und nach dem Einbau vorhanden). Auffällig in sämtlichen Diagrammen ist die starke Abweichung der Kontrollmessungen im Jahr 1982. Dies wird auf ungenaue Laborarbeit zurückgeführt. Einzig die PEN Messungen im Unterwasser (UW) - Bereich korrelieren mit den Messungen im Jahr 2002. Der Trend der Materialversprödung ist plausibel und nachvollziehbar. Es zeigt sich ein Abfall der PEN und Anstieg des R&K Wertes mit fortlaufender Alterung. Die Messwerte nach der Bindemittelrückgewinnung aus den entnommenen Kernen im Bereich 2,0 bis 3,8 km zeigen ein stark differenziertes Verhalten im Vergleich zu den übrigen Materialkennwerten. An Proben die dauerhaft unter dem Wasserspiegel lagen ist dies besonders deutlich ersichtlich. Die übrigen R&K Werte (0,5 - 1,5 km und 4,0 - 6,0 km) weisen eine hohe Korrelation in den einzelnen Messhorizonten auf (innerhalb Vergleichspräzision nach [47]). Selbiges zeigen die Messungen der Penetrationswerte. Die allgemeine Aussage, dass die stärkste (schnellste) Alterung im Schwankungsbereich auftritt wird durch die Auswertung dieses Ausleitungskanals nicht bestätigt. Die Ergebnisse R&K und PEN zeigen die geringste Versprödung im UW Bereich und die stärkste im Oberwasser (OW) Bereich. Absolut

gesehen ist der Alterungsfortschritt über die Jahre im UW Bereich als sehr gering anzusehen (mangelnder Luftsauerstoff, gut funktionierende Geschiebeschwelle bei Einlauf). Ausgehend davon, dass größtenteils die Versprödung während des Herstellungsprozesses induziert wurde (vergleiche Teil II) können die abweichenden Messwerte der OW- von den UW Bohrkernen als Alterung aufgrund von Umwelteinflüssen betrachtet werden. Das getestete Bitumen entspricht laut heutigen Spezifikationen einem 30/45, was einem Verlust von zirka zwei Bitumenklassen entspricht (50/70 und 35/50). Im Vergleich der R&K Messdaten des Ausleitungskanals mit den des Oberwasserkanals in Abschnitt 9.2 zeigt sich ein ähnlicher Versprödungstrend (vgl. Liegedauer 30 und 40 Jahre). Eine starke Abweichung weisen die PEN Werte auf. Es gilt jedoch den kleinen Probenumfang des Oberwasserkanals zu berücksichtigen. Gesamtheitlich gesehen zeigt der Ausleitungskanal in Abschnitt 9.1 die Leistungsfähigkeit einer Asphaltbetonoberflächendichtung bei ordnungsgemäßer Herstellung. Nach über 40 Jahren Liegedauer ist im Falle einer Sanierung nicht der gesamte Kanal zu erneuern sondern lediglich die Schwankungs- (SB) und OW- Bereiche, welche flächenmäßig einen wesentlich geringeren Anteil als die UW Bereiche ausmachen. Der Umstand des geringen Alterungsfortschrittes während der Liegedauer verdeutlicht die große Bedeutung der sorgfältigen und korrekten Dichtungsherstellung.

10.3. Allgemeine Bemerkungen zum Einbauprozess

Die Ausführungsqualität von Asphaltschichten hängt stark von der temperaturabhängigen Verdichtbarkeit des Mischgutes ab. Um eine homogene und dauerhafte Asphaltschicht zu gewährleisten ist eine entsprechende und gleichmäßige Einbautemperatur während des Einbauprozesses zu erreichen (siehe Tabelle 2.1). Die Materialeigenschaften des Bitumens lassen sich gut über die Viskosität beschreiben. Die Viskosität ist ein Maß für die Zähigkeit eines Stoffes. Abbildung 10.5 verdeutlicht die Temperaturabhängigkeit der Viskosität eines Bitumen 70/100 (B287) und eins PmBs 45/80-65 (B288). Das B288 wurde aus dem selben Grundbitumen (B287) durch eine Modifikation von 3,7 m% SBS produziert. Die höhere Viskosität bei gleicher Temperatur kommt durch das Polymer zustande. Bei einer kombinierten Betrachtung von Tabelle 2.1 und Abbildung 10.5 wird die maßgebende Bedeutung der Einhaltung der Einbautemperaturen für eine langlebige und qualitativ hochwertige Dichtung deutlich. Weiters bildet Abbildung 10.5 den Einfluss der Kurzzeitalterung (STA) auf die Viskosität ab.

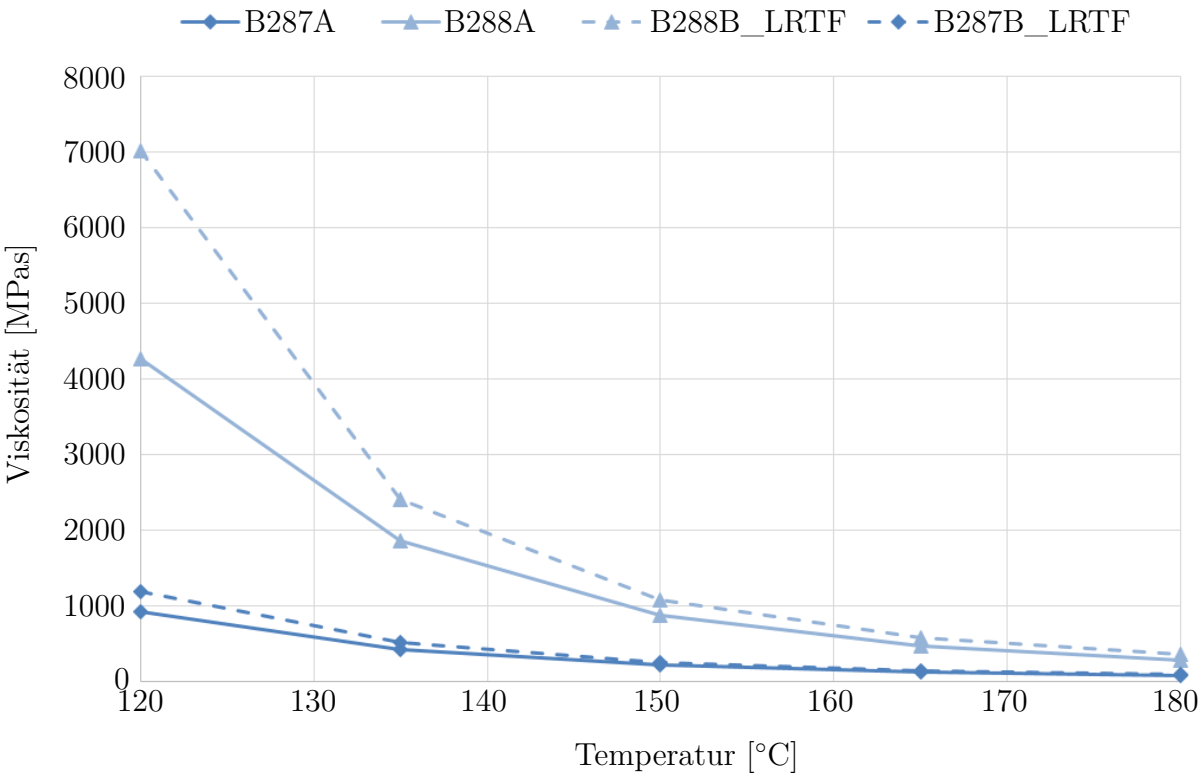


Abbildung 10.5.: Viskosität, Vergleich Bitumen 70/100 (B287) versus PmB 45/80-65 (B288), ungealtert (A) sowie RTFOT (LRTF)

Vor jeder Übergabe vom LKW in den Beschickungswagen sollte eine Temperaturmessung nach [50] erfolgen. Neben der Materialtransportzeit welche maßgeblich von der Entfernung Mischanlage zur Einbaustelle, der Exposition (Zustand der Zufahrtsstraßen etc.) sowie der Baustellenlogistik abhängig ist, haben die eingesetzten Maschinen einen bedeutenden Einfluss auf die Qualität der fertigen Dichtung. Im Fertiger erfährt das Material eine gewissen Durchmischung, welche eine Homogenisierung beziehungsweise gleichmäßigere Temperaturverteilung gewährleistet. Für die Beschickung des Fertigers mit Mischgut wird meist ein Beschickungswagen mit Seilzug verwendet. Für den Transport des Asphaltmischgutes von der Mischanlage zur Baustelle kommen LKWs mit zwei unterschiedlichen Abladesystemen zum Einsatz. Einerseits verfügen die thermoisolierten LKWs über Abschiebevorrichtungen (TA-LKW) zum anderen laden konventionelle LKWs durch heben (kippen) der Ladefläche ab (KK-LKW). Die Vorteile des Einsatzes von TA-LKWs gegenüber KK-LKWs wurden in einer Untersuchung des Institutes für Straßenbau an der TU Wien belegt. Die Vorteile der TA-LKWs steigen mit fallender Außentemperatur (siehe Abbildung 10.6 und 10.7).

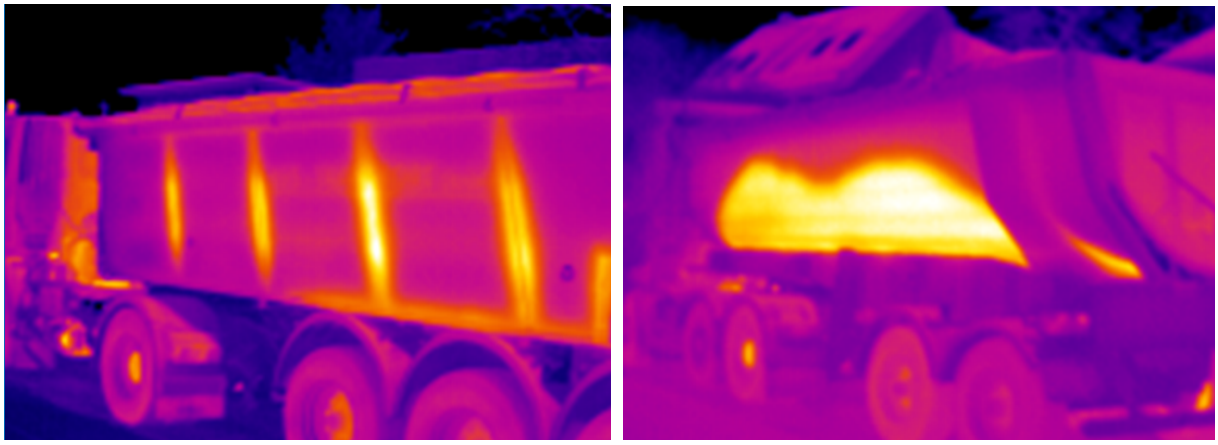


Abbildung 10.6.: Wärmebild TA-LKW versus KK-LKW [22]

Abbildung 10.7 zeigt eine Gegenüberstellung des mittleren Temperaturverlustes während des Transportes (ca. 50-60 min) in beiden LKW Typen (Außenlufttemperatur zirka 10 °C).

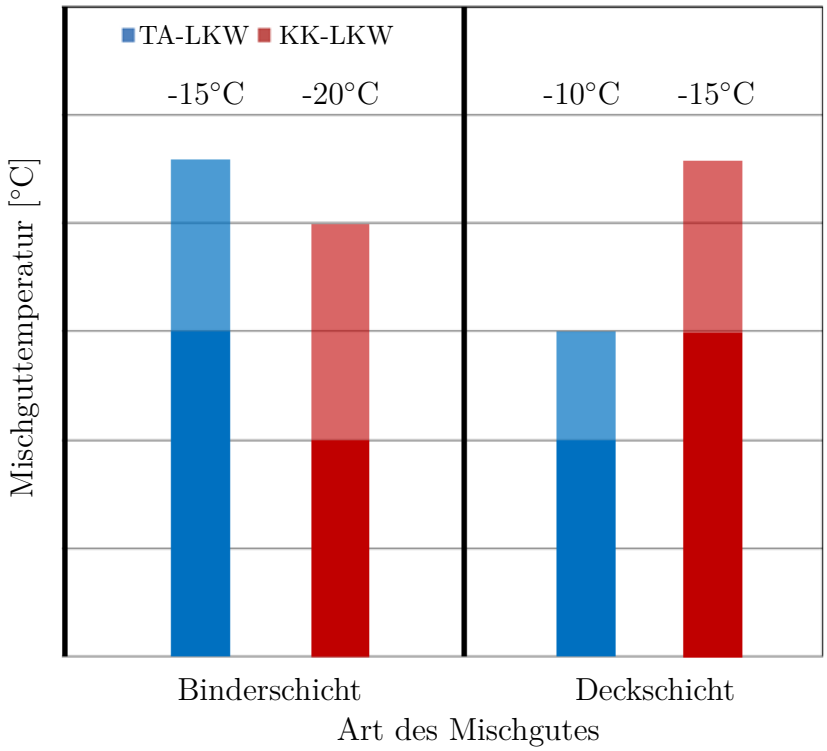


Abbildung 10.7.: Abkühlverlauf während Transport TA-LKW versus KK-LKW [22]

Empfehlenswert ist die Abladetechnik mittels Abschiebevorrichtung da bei diesem Prozess die kälteren und heißeren Mischgutbereiche konstant gleichmäßig in den Beschickungswagen abgeladen werden, wodurch eine Material- und Temperaturhomogenisierung erfolgt. Beim Abladeprozess mittels Abkippen fehlt die Durchmischung aufgrund des Abgleitens großer kühlerer Mischgutschollen (Klumpen). Nach einem Transportzyklus eines LKWs müssen vor Neubeladung etwaige Mischgutrückstände im Laderaum beseitigt werden, da

diese bei einer Neubeladung unweigerlich zu einer diskontinuierlichen Temperaturverteilung führen. Temperaturmessungen nach der Fertigerbohle und Bohrkernanalysen zeigen, dass kältere Agglomerate von Mischgut im LKW beziehungsweise Fertiger unweigerlich zu Qualitätseinbußen der fertigen Dichtung führen („kalte Nester"). Für eine genaue Beschreibung von Dichtungsschäden und deren Ursache siehe [37] und [44].

Übersicht Baustellenausrüstung Asphaltwasserbau [44]

Beschickungswagen mit Seilwinde

Verdichtungswalze mit Seilwinde

Fertiger mit Seilwinde

Abbildung 10.8.: Baustellengeräte Asphaltwasserbau

Teil IV.

Resümee

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden Untersuchungen zum Alterungsverhalten von Asphaltbeton im Wasserbau durchgeführt und mit einigen Bestandsdaten von Asphaltbetonoberflächendichtungen (AF) verglichen. Ein Ziel war eine realitätsnahe Simulation des Kurzzeitalterungsprozesses (STA) in Abhängigkeit der für den Wasserbau adäquaten Mischrezepturen und Materialmanipulationszeiten. Nach der Entwicklung eines geeigneten Kurzzeitalterungsverfahrens (STA Mischgutalterungsversuch) für Asphaltmischgut sowie einer Auswertung der Laborprüfungen und Bestandsdaten können folgende Fragestellungen wie folgt beantwortet werden.

1. **Wie hängt der Herstellungsprozess mit der Dauerhaftigkeit und dem Langzeitverhalten von Asphaltbetondichtschichten zusammen?**

   Aufgrund der Mischgutalterungssimulationen im entwickelten Kurzzeitalterungsversuch (siehe Abschnitt 2) und dem Abgleich mit Bestandsdaten wurde gezeigt, dass ein Hauptteil der Materialversprödung und -versteifung während der Herstellung der AF aufgrund der destillativen und oxidativen Alterungsprozesse erfolgt (siehe Abschnitt 1.3.1). Somit ist der Herstellungsprozess maßgebend für das Langzeitverhalten beziehungsweise die Dauerhaftigkeit von Asphaltbetonoberflächendichtungen. Längere Transportzeiten erfordern höhere Mischtemperaturen, welche wiederum eine verstärkte Alterung des Asphaltbetons bewirken. In Kombination mit den ausgewerteten Bestandsdaten wird besonders darauf hingewiesen, dass die Einhaltung der Temperaturobergrenzen für den Transport einzuhalten sind und vor der Übergabe vom LKW in den Fertiger kontrolliert werden müssen (vgl. Tabelle 8.37). Zu kalt oder zu heiß eingebautes Material führt unweigerlich zu irreversiblen Schädigungen der fertigen AF.

2. **Ist die Kurzzeitalterungsmethode RTFOT für die Simulation der Materialversprödung und -versteifung während des Herstellungsprozesses einer AF geeignet?**

   In Abschnitt 7.1 wurden die Ergebnisse des entwickelten STA Mischgutalterungsversuchs (Kurzzeitalterungsversuch) dem RTFOT Alterungsverfahren gegenüber gestellt. Übereinstimmende Alterungstrends hinsichtlich Ring- und Kugelwert, Nadelpenetration und Elastischer Rückstellung zeigten sich in verschiedenen Versuchsstufen (V1-V6). Der RTFOT ermöglicht keine flexible Anpassung an den Transportweg (Transportzeit) und die Mischtemperatur, daher ist diese Methode aufgrund der projektbezogenen Variation dieser Parameter nur begrenzt geeignet für den Asphaltwasserbau. Durch die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit der Versuchsabläufe an variierende Transportzeiten und damit verbundene Materialtemperaturen, ist eine realitätsnahe Prognose der Materialversprödung und -versteifung (Alterung) im entwickelten Kurzzeitalterungsversuch sehr gut möglich (siehe Abschnitt 10.1.2 Abbildung 10.1 und 10.2).

3. **Ist PmB im Vergleich zu Standard Bitumen für AF zu bevorzugen?**

   Durch die stark variierenden Anforderungen an das Bitumen für AF in Abhängigkeit des Bauprojektes (Exposition, Dammneigung, Speicherbewirtschaftung etc.) kann keine generelle Aussage getroffen werden. Aufgrund der Viskosität (siehe Abbildung 10.5) müssen PmBs bei höheren Temperaturen verdichtet werden. Daraus resultiert ein erhöhter Anspruch in Bezug auf das eingesetzte Gerät (siehe Abschnitt 10.3) sowie die Baustellenlogistik (LKW Standzeiten etc.). PmBs eignen sich besonders für Spezialanwendungen (z.B.: steile Dichtungen etc.) unter der Voraussetzung von kurzen Transportzeiten. Für Standardanwendungen sind aufgrund der leichteren (leichteren) Verarbeitbarkeit in niedrigen Temperaturbereichen und den damit verbundenen geringeren Alterungserscheinungen nicht modifizierte Bindemittel zu bevorzugen. Neben den technischen Anforderungen sind für die Auswahl der Bindemittelsorte auch die Verfügbarkeiten dieser bei den speziellen Bauprojekten maßgebend.

4. **Welche Bitumenprüfungen sind in welchem Arbeitsschritt zu welchem Zeitpunkt durchzuführen?**

   Grundsätzlich muss zwischen Eignungsprüfung und Prüfungen während des Bauablaufes (begleitenden Kontrollprüfungen - Qualitätssicherung) unterschieden werden. Tabelle 10.2 zeigt ein empfohlenes Prüfprogramm auf Grundlage der gewonnenen Forschungsergebnisse.

Tabelle 10.2.: Bitumenprüfungen für den Asphaltwasserbau

Eignungsprüfung				
Standard Bitumen				
Frischbitumen	PEN	R&K	DSR	
Kurzzeitalterungsversuch (variable Transportzeit)	PEN	R&K	DSR	
PmB				
Frischbitumen	PEN	R&K**	EL	DSR
Kurzzeitalterungsversuch (variable Transportzeit)	PEN	R&K**	EL	DSR
Begleitende intervallsmäßige Kontrolle (Herstellung)				
Standard Bitumen	PEN	-	T*	
PmB	PEN	EL	T*	

* Im LKW nach Beladung und vor Übergabe in Fertiger

** Für Abgleich mit Frischbitumen (A), kein Bewertungskriterium

10.4. Anwendbarkeit und Vorteile - STA Mischgutalterungsversuch

Um eine adäquate Prognose der Materialversprödung und -versteifung während des Herstellungsprozesses zu ermöglichen, wurde der STA Mischgutalterungsversuch (siehe Kapitel 2) entwickelt. Mit Hilfe dieses Laborversuches ist es möglich, beliebige Materialmanipulationszeiten (Entfernungen Mischanlage - Einbauort) sowie die damit verbundenen Materialtemperaturen als Randbedingungen anzusetzen und die daraus resultierende Alterung des Asphaltbetons (Bitumens) zu simulieren. Die Simulation des Einbauprozesses hat folgende bautechnisch relevante Vorteile:

- Verbesserte Ausschreibungskriterien
- Abschätzung der maximal möglichen Entfernung zwischen Mischanlage und Einbauort ohne zu ausgeprägter und unzulässiger Bindemittelalterung
- Wahl des optimalen Bindemittels in Abhängigkeit der herstellungsbedingten Materialversprödung und -versteifung
- Wahl der optimalen Baustelleneinrichtung (LKW Typ; Konventioneller Kipp LKW mit Plane oder Thermomulde etc.)
- Entscheidungshilfe Standard Bitumen oder PmB
- Hilfestellung für die Prognose des Langzeitverhaltens.

10.5. Ausblick und Forschungsbedarf

Die in dieser Arbeit erzielten Forschungsergebnisse zeigen die eindeutigen und markanten Auswirkungen des Herstellungsprozesses auf die Dauerhaftigkeit beziehungsweise das Langzeitverhalten von Asphaltbeton im Wasserbau. Mit Hilfe des entwickelten STA Mischgutalterungsversuchs ist es möglich, die herstellungsbedingten Materialversprödungen und -versteifungen realitätsnah und präzise zu simulieren und abzubilden. Auf das LTA wurde für die meisten Auswertungen indirekt über Gleichung 1.2 geschlossen. Für eine künstliche Abbildung der Langzeitalterung im Labor, ist die Überprüfung von diversen LTA - Alterungsversuchen auf die Eignung für den Wasserbau (diverse Prüfverfahren liegen bereits vor oder sind Gegenstand der Forschung) von großem Interesse. Weiterer Forschungsbedarf besteht in Bezug auf das Tieftemperaturverhalten (Schwindverhalten) von AF. Die Eindringtiefe und der daraus resultierende Einfluss von UV-Strahlung auf das Alterungsverhalten von AF bedarf weiterer Untersuchungen. Quadratische Prüffelder auf neuen und bestehenden Dichtungen sowie auf Testfeldern wären für weitere Forschungszwecke in Bezug auf die alterungsbedingten Veränderungen im Verformungsverhalten (Flexibilität) von AF wünschenswert. Für die Flexibilitätsprüfung von Asphaltbetonoberflächendichtungen wurde, parallel zur Dissertation, ein physikalischer Materialprüfstand (Basis Vakuumprüfung) entwickelt . Bei lokalen Sanierungen von AF mit unterschiedlichen Methoden, liegen einige Jahrzehnte an Erfahrung vor. Derzeit stehen nur eingeschränkt dauerhafte und langlebige lokale Sanierungsmethode zur Verfügung, welche eine ähnlich hohe Dauerhaftigkeit wie die ursprüngliche AF aufweisen. Zur weiteren Optimierung des Langzeitverhaltens und der Dauerhaftigkeit würde die Entwicklung einer neuen umfassenden und widerstandsfähigen lokalen Sanierungslösung maßgebend beitragen.

Literaturverzeichnis

[1] Airey D. G.; 10.2003; *Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens*; Fuel Volume 82, Issue 14, Page 1709-1719

[2] Airey G.D., Brown S. F.; 1998;*Rheological Performance of Aged Polymer Modified Bitumens*; Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 67, Pages 66-100, ISBN 0270-2932

[3] Asbeck W. F.; 1955; *Bitumen im Wasserbau, Band 1*; London

[4] Asphalt Institute Inc. and European Bitumen Association - Eurobitume; 2011; *The Bitumen Industry A Global Perspective Production, chemistry, use, specification and occupational exposure*; ISBN 978-1-934154-61-8

[5] ASTM D4124; 2009; *Standard Test Method for Separation of Asphalt into Four Fractions*; ASTM International

[6] Baglieria O, Dalmazzoa D., Baraziaa M., Tabatabaeeb H., Bahiab H.; 2012; *Influence of Physical Hardening on the Low-Temperature Properties of Bitumen and Asphalt Mixtures*; Procedia - Social and Behavioral Sciences Volume 53, pages 504-513

[7] Bonemazzi F., Giavarini C.; 01.1999; *Shifting the bitumen structure from sol to gel*; Journal of Petroleum Science and Engineering, Volume 22, Issues 1-3, Pages 17-24

[8] Czubak T.; 2012; *Untersuchung von Bitumina zur Herstellung von Öl-in-Wasser-Emulsionen*; Dissertation - RWTH Aachen, Fak01 - Fachgruppe Chemie

[9] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT); 2008; *Empfehlungen für die Ausführung von Asphaltarbeiten im Wasserbau*; 5.Ausgabe

[10] Eurobitumen; 01.2012; *Performance Related Specifications for Bituminous Binders*; European Bitumen Association, ISBN 2-930160-24-1

[11] Fehrl; *BitVal - Analysis of Available Data for Validation of Bitumen Tests*; BiTVal Phase 1 Report

[12] Gao Y., Gu F., YongLi Z.; 02.2013 *Thermal oxidative aging characterization of SBS modified asphalt*; Journal of Wuhan University of Technology-Master.Sci. Ed., Volume 28, Issue 1, Pages 88-91

[13] Gershkoff D.; 1995; *Polymer modified Bitumens - performance in empirical and rheological tests*; 1st European Workshop on the Rheology of Bituminous Binders, Brüssel, Belgien, Paper 34

[14] Großegger D.; 04.2015; *Investigation of Aged, Non-aged Bitumen and their Bitumen Fractions*; Vienna University of Technology, Institute of Material Chemistry

[15] Handle F.; 2011; *Description of the interface between bitumen and mineral aggregates in respect to adhesive behaviour*; Vienna University of Technology, Institute of Material Chemistry

[16] Handle F.; 2014; *Abbildung und Analyse der Bitumen Mikrostruktur - Beschreibung des Alterungsverhaltens auf Basis Mikrostruktureller Informationen*; Vienna University of Technology, Institute of Material Chemistry

[17] Haas H.; 04.1992; *Zur Verformbarkeit von Dichtungsbelägen aus Asphalt*; Bitumenheft Nr.4

[18] Hofko B., Hospodka M., Eberhardsteiner L., Blab R., Füssl, Grothe, Großegger, Handle; 2014; *Aktuelle Erkenntnisse zum Alterungsverhalten von Bitumen und Asphalt*; Technische Universität Wien, Straßen und Autobahnen

[19] Hospodka M., 2013; *Alterungsmechanismen von Bitumen und Simulation der Alterung im Labor*; Technische Universität Wien (Institut für Verkehrswesen), Universität für Bodenkultur Wien (Department für Raum, Landschaft und Infrastruktur)

[20] Hunter R., Self A., Read J.; 2015; *The Shell Bitumen Handbook*; London: ICE Publishing, ISBN 978-0-7277-5837-8

[21] Institut für Verkehrswissenschaften (unveröffentlicht), Forschungsbereich für Straßenwesen; 2013; *Protokoll zum 9. Jour Fixe im Projekt Ökophalt*; TU Wien

[22] Kluger-Eigl W., Steiner D.; 2016; *Asphaltmischguttemperatur "so hoch wie notwendig, aber so gering wie möglich "*; Gestrata Bauseminar

[23] Lesueur D.; 09.2009 *The colloidal structure of bitumen: Consequences on the reology and on the mechanisms of bitumen modification*; Advances in Colloid and Interface Science, Volume 145, Issues 12, Pages 4282

[24] Linde S., Johansson U.; 1992; *Thermo - Oxidative Degeneration of Polymer Modified Bitumen*; American Society for Testing and Material, (The Swedish National Testing and Research Institute)

[25] Litzka J., Strobl R., Pass F., Augustin H.; 1998; *Gebrauchsverhaltensorientierte Bitumenprüfung*; Technische Universität Wien (Mitteilungen des Instituts für Straßenbau und Straßenerhaltung, Heft 9)

[26] Litzka J., Strobl R., Pass F., Augustin H.; 1998; *Gebrauchsverhaltensorientierte Bitumenprüfung, Mitteilungen des Instituts für Straßenbau und Straßenerhaltung, Heft 9*; Wien: Technische Universität Wien

[27] Masson J-F., Collins P., Polomark G.; 2005; *Steric Hardening and the Ordering of Asphaltenes in Bitumen*; Energie&Fuels, 19(1), Pages 120-122

[28] McNally T.; 2011 *Polymer Modified Bitumen: Properties and Characterisation*; Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineeri, ISBN-10:0857090488

[29] Mill T., Tse D., Loo B., Yao D., Canavesi E.; 1998; *Oxidation Pathways in Asphalt*; Chemistry Laboratory SRI International

[30] Mollenhauer, Simnofske; 2014; *Bitumenanalyse mit FTIR/ATR*; Universität Kassel

[31] Neroth G., Vollenschaar D.; 04.2011; *Wendehorst Baustoffkunde: Grundlagen - Baustoffe - Oberflächenschutz*; Vieweg+Teubner Verlag, ISBN-13: 978-3835102255

[32] Nicholls J. C., Carswell J., Gershkoff D.; 10.2.1999; *Rheological Properties of Polymer-Modified Binders for use in Rolled Asphalt Wearing Course.*; Thomas Telford Ltd

[33] Partl M.; 2011; *Asphalt und Bitumen - Werkstoffe I*; ETH Zürich

[34] Petersen J. C.; 10.2009; *A Review of the Fundamentals of Asphalt Oxidation - Chemical, Physicochemical, Physical Property, and Durability Relationships*; Transportation Research Circular E-C140; ISSN 0097-8515

[35] Read J., Whiteoak D.; 01.2003; *The Shell Bitumen Handbook*; Thomas Telford Ltd, 5th Revised edition; ISBN-13: 978-0727732200

[36] Sengoz B., Topal A., Isikyakar G.; 05.2009; *Morphology and image analysis of polymer modified bitumens*; Construction and Building Materials, Volume 23, Issue 5, Pages 1986-1992

[37] Smesnik M., Wien 2014; *Oberfächendichtungen aus Asphaltbeton - Dauerhaftigkeit und Langzeitverhalten von Asphaltbeton im Wasserbau*; TU Wien

[38] The Asphalt Institute Eurobitume; 03.2011 *The Bitumen Industry - A Global Perspektive, Production, chemistry, use, specification and accupational exposure*; Asphalt Institute Inc. and European Bitumen Association - Eurobitumen, ISBN 978-1-934154-61-8

[39] Vonk W. C.; 1989; *Improvement of paving grade bitumens with SBS polymers.*; Proc 4th Eurobitumen Symp., page 298-303

[40] Wen G., Zhang Y., Zhang Y., Sun K., Fan Y.; 01.2002; *Rheological characterization of storage-stable SBS-modified asphalts*; Polymer Testing, Volume 21, Issue 3, Pages 295-302

[41] Xiaohu L., lsacsson U.; 07.1998; *Chemical and rheological evaluation of ageing properties of SBS polymer modified bitumens*; Fuel, Volume 77, Issues 910, Pages 961-972

[42] Zhu J., Birgisson B., Kringos N.; 05.2014; *Polymer modification of bitumen: Advances and challenges*; European Polymer Journal, Volume 54, Pages 18-38

[43] Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH; 2012; *Chemisch - physikalische Grundlagen von Bitumenalterung für ökonomisches Recycling von Asphaltmischgut*; OEKOPHALT

[44] Österreichs Energie; 2013; *Richtlinien für Arbeiten im Asphaltwasserbau*

[45] ÖNORM EN 933-1 2012-03-01 *Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Bestimmung der Konrgrößenverteilung - Siebverfahren*

[46] ÖNORM EN 1426 2007-06-01 *Bitumen und bitumenhaltige Bidemittel - Bestimmung der Nadelpenetration*

[47] ÖNORM EN 1427 2007-06-01 *Bitumen und bitumenhaltige Bidemittel: Bestimmung des Erweichungspunktes - Ring- und Kugelverfahren*

[48] ÖNORM EN 12607 - 1 2014-12-15 *Bitumen und bitumenhaltige Bidemittel - Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft*

[49] ÖNORM EN 12697 - 11 2012-11-01 *Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 11: Bestimmung der Affinität von Gesteinskörnungen*

[50] ÖNORM EN 12697 - 13 2015-05-01 *Asphalt - Prüfverfahren - Teil 13: Temperaturmessung*

[51] ÖNORM EN 12697 - 26 2012-11-01 *Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 26: Steifigkeit*

[52] ÖNORM EN 12697 - 30 2012-06-15 *Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 30: Probenvorbereitung, Marshall-Verdichtungsgerät*

[53] ÖNORM EN 12697 - 33 2007-12-01 *Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 33: Probestückvorbereitung mit einem Walzenverdichtungsgerät*

[54] ÖNORM EN 13304 2009-06-01 *Bitumen und bitumenhaltige Bidemittel - Spezifikationsrahmen für oxidiertes Bitumen*

[55] ÖNORM EN 13398 2010-07-01 *Bitumen und bitumenhaltige Bidemittel: Bestimmung der elastischen Rückstellung von modifizierten Bitumen*

[56] ÖNORM EN 13632 2010-07-15 *Bitumen und bitumenhaltige Bidemittel - Visualisierung der Polymerverteilung in polymermodifizierten Bitumen*

[57] ÖNORM EN 14023 2013-06-01 *Bitumen und bitumenhaltige Bidemittel - Rahmenwerk für die Spezifikation von polymermodifizierten Bitumen*

[58] ÖNORM EN 14770 2012-07-15 *Bitumen und bitumenhaltige Bidemittel - Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels - Dynamisches Scherrheometer (DSR)*

[59] Österreichische Zeitschrift für Elektrizitätswirtschaft; 06.1965 *EKW - Das Ennskraftwerk St. P.*; Verband der Elektrizitätswerke Österreichs, Wien

Abbildungsverzeichnis

1.1. Bitumenalterungsstufen, Kurzzeitalterung rot markiert 14
1.2. links: Zusammensetzung Bitumen nach [20], rechts: Asphaltbetonmatrix . . 15
1.3. Micellen Modell: links.) Sol-Typ Bitumen; rechts.) Gel-Typ Bitumen [35] . 15
1.4. Bitumenfraktionen nach [15] 16
1.5. Mögliche Molekularstruktur eines Asphaltenmoleküls ($C_{61}H_{79}NOS$), a.) Strukturformel b.) Kugel-Stab-Modell 17
1.6. Mögliche Molekularstruktur eines Harzes ($C_{35}H_{48}OS$), a.) Strukturformel b.) Kugel-Stab-Modell 17
1.7. Mögliche Molekularstruktur eines Aromaten ($C_{25}H_{30}S$), a.) Strukturformel b.) Kugel-Stab-Modell 18
1.8. Mögliche Struktur eines Paraffinmoleküls ($C_{31}H_{64}$), a.) Strukturformel b.) Kugel-Stab-Modell 18
1.9. Veränderung der Bitumenzusammensetzung während des Herstellungsprozesses und der Liegedauer [20] 19
1.10. ROS und Micelle [16] 20
1.11. links: SBS Copolymer, rechts: SBS Granulat 22
1.12. Schematische Struktur eines thermoplastischen Elastomers bei Raumtemperatur [35] 22
1.13. Struktur von Styren-Butadien-Styren (SBS) und schematische Darstellung von reversiblen Querverbindungen [42] 23
1.14. UV Fluoreszenzmikorskopie, links: 3 m% SBS rechts: 4,5 m% SBS [20] . . . 23
1.15. Morpholgoie von SBS PmBs 24
1.16. Veränderung Erweichungspunkt R&K in Abhängigkeit des SBS Gehaltes [20] 25

2.1. Schema Versuchsabläufe 31
2.2. Abkühlkurven Bitumen 70/100 Stufe 1 (V4), mit Manipulationspunkten Mischanalge-LKW, LKW-Fertiger und Fertiger-Einbau 31
2.3. Abkühlkurven Bitumen 70/100 Stufe 2 (V5), mit Manipulationspunkten Mischanalge-LKW, LKW-Fertiger und Fertiger-Einbau 32
2.4. Abkühlkurven Bitumen 70/100 Stufe 3 (V6), mit Manipulationspunkten Mischanalge-LKW, LKW-Fertiger und Fertiger-Einbau 32
2.5. Abkühlkurven PmB 45/80-65 Stufe 1 (V4), mit Manipulationspunkten Mischanalge-LKW, LKW-Fertiger und Fertiger-Einbau 33
2.6. Abkühlkurven PmB 45/80-65 Stufe 2 (V5), mit Manipulationspunkten Mischanalge-LKW, LKW-Fertiger und Fertiger-Einbau 33

2.7. Abkühlkurven PmB 45/80-65 Stufe 3 (V6), mit Manipulationspunkten Mischanalge-LKW, LKW-Fertiger und Fertiger-Einbau 34
2.8. Versuchsstand und Bauteile (STA Mischgutalterungsversuch) 35
2.9. Plan Versuchsstand (STA Mischgutalterungsversuch) 36
2.10. Versuchsreproduzierbarkeit, B533, Penetrationsmessungen nach Oxidationsversuchen (V1 - V3) 37

3.1. Sieblinie Asphaltbeton 0/11 mit Brechsand ohne Natursand 45
3.2. Sieblinie Asphaltbeton 0/11 mit Brech- und Natursand 46
3.3. Lagerung der Asphaltbetonplatten auf 29° schrägen Ebene, links: Draufsicht mit drei Messhorizonten, rechts: Seitenansicht 53
3.4. Verformungsverlauf Lagerung schiefe Ebene, B520 53
3.5. Versuchsaufbau Van Asbeck nach Hans Haas, Bitumenheft Nr.4 1992 . . . 54
3.6. Numerische Simulation der Verformung des Probekörpers im Versuchsaufbau nach Abbildung 3.5 54
3.7. Verformter Probekörper Bitumen 70/100 nach Versuch, Maße in [mm] . . . 55
3.8. Verformter Probekörper (B520) nach Versuch, Maße in [mm] 57
3.9. Lieferschein BP Gelsenkierchen 70/100 63

4.1. FTIR-ATR, B520 (A), Charge 13:30 und 17:10 68
4.2. FTIR-ATR Spektroskopie B533: (A), V1-V6, RTFOT 69
4.3. Dendrogramm Probe A, V3 und V6 71
4.4. Vergrößerung Cluster A 72
4.5. Vergrößerung Cluster 3 72
4.6. Vergrößerung Cluster 6 73
4.7. IR-Spektrum Analysebereiche 74
4.8. IR-Spektrum Probe A (grün) Probe V3 (rot) Probe V6 (blau) 74
4.9. Vergleich der Integralflächen der Bande (Peak) bei 880 cm^{-1} 75
4.10. Curve Fit Bereich von 775-710 cm^{-1} 76
4.11. Integralflächen δCH_3, CH_2 und ρCH_2/ δCH_3 77
4.12. Curve Fit Bereich von 1045-985 cm^{-1} 77
4.13. Integralflächen der Sulphoxid Bande, Sulphoxid 1031 cm^{-1} 78
4.14. Integralflächen von A und V1-V6, Sulphoxid 1031 cm^{-1} 78
4.15. Carbonyl - Peak vor H_2O Subtraktion 79
4.16. Carbonyl - Peak nach H_2O Subtraktion 80
4.17. Integralfläche C=O, Probe A und V1-V6 80
4.18. Fluoreszenzmikroskopie B520 (A) Charge 13:30 Uhr 84
4.19. Fluoreszenzmikroskopie B520 (A) Charge 17:10 Uhr 85
4.20. Fluoreszenzmikroskopie B520 (A) Charge 18:35 Uhr 86
4.21. Vergleichsprobe Shell PmB 25/55-55 (SBS) 87

5.1. Veränderung der Ring- und Kugelwerte Bitumen (70/100), Fehlerindikatoren zeigen maximale/minimale Messwerte [°C] 90

5.2. Veränderung der Ring- und Kugelwerte durch die STA Mischgutalterungsversuche, Bitumen 70/100 . . . 92
5.3. Veränderung der Nadelpenetration Bitumen (70/100), Fehlerindikatoren zeigen maximale/minimale Messwerte [1/10 mm] . . . 93
5.4. Veränderung der Nadelpenetration durch die STA Mischgutalterungsversuche, Bitumen 70/100 . . . 94
5.5. Veränderung der Ring- und Kugelwerte B520, Fehlerindikatoren zeigen maximale/minimale Messwerte [°C] . . . 96
5.6. Veränderung der Ring- und Kugelwerte durch die STA Mischgutalterungsversuche, B520 . . . 98
5.7. Veränderung der Nadelpenetration B520, Fehlerindikatoren zeigen maximale/minimale Messwerte [1/10 mm] . . . 99
5.8. Veränderung der Nadelpenetration durch die STA Mischgutalterungsversuche, B520 . . . 100
5.9. Veränderung der elastischen Rückstellung B520, Fehlerindikatoren zeigen maximale/minimale Messwerte [%] . . . 101
5.10. Veränderung der elastischen Rückstellung durch die STA Mischgutalterungsversuche, B520 . . . 102
5.11. Visko-elastisches Verhalten [25] . . . 106
5.12. Phasenverschiebungswinkel δ (Phasenwinkel) [26] . . . 107
5.13. Steifigkeiten und zugehörige Phasenwinkel nach Oxidationsversuchen, Bitumen 70/100 . . . 109
5.14. Steifigkeiten und zugehörige Phasenwinkel nach Kombinationsversuchen, Bitumen 70/100 . . . 111
5.15. Steifigkeiten und zugehörige Phasenwinkel nach Oxidationsversuchen, B520 113
5.16. Steifigkeiten und zugehörige Phasenwinkel nach Kombinationsversuchen, B520 . . . 116

6.1. Veränderung der Ring- und Kugelwerte B533 . . . 119
6.2. Veränderung der Nadelpenetration B533 . . . 121
6.3. Veränderung der elastischen Rückstellung B533 . . . 122
6.4. DSR Versuchsanordnung und Ablauf nach [26] . . . 123
6.5. links.) Einfluss des steigenden SBS Gehalts auf die rheologischen Eigenschaften des Bitumens, rechts.) viskose und elastische Anteile für modifizierte und unmodifizierte Bitumen [20] . . . 125
6.6. DSR -10 bis +80°C - Vergleich 1 Hz - 70/100 versus PmB [19] . . . 126
6.7. DSR -10 bis +80°C bei 1 Hz - Veränderung Steifigkeit und Phasenwinkel nach Laboralterung [19] . . . 127
6.8. DSR 1 Hz in den Laboralterungsstufen V1 - V6, B533; . . . 128
6.9. DSR -10 bis +80°C - Frequenzsweep 0,1 Hz, 1 Hz, 10 Hz, PmB 45/80-65 mit 4,3 m% SBS, links: Frischbitumen (A), rechts: (B) RTFOT [19] . . . 129
6.10. DSR 1,59 Hz in den Laboralterungsstufen V1 - V6, B533 . . . 130
6.11. DSR 10 Hz in den Laboralterungsstufen V1 - V6, B533 . . . 130

6.12. DSR 1/ 1,6/ 10 Hz in den Laboralterungsstufen V1 - V6, 10 - 30 °C, B533 132
6.13. Cole-Cole Diagramm, DSR, B533 134

8.1. Bindemittelprüfung 2008 an 8 Bohrkernen 153
8.2. Bohrkerne DN 100 2016, links: A1, rechts: A2 169
8.3. DSR Temperature-Sweep -10 bis 80 °C bei 1,592 Hz, Bohrkerne 2016 . . . 170
8.4. DSR Black-Space -10 bis 80 °C bei 0.1,0.3,1,1.592.3,5.10 Hz, Bohrkerne 2016 170
8.5. DSR Cole-Cole -10 bis 80 °C bei 0.1,0.3,1,1.592.3,5.10 Hz, Bohrkerne 2016 171
8.6. Bohrkerne DN 100 2016, links: B1, B2; rechts: C1, C2 174

9.1. Erweichungspunkt Ring und Kugel, linke Kanalseite, Kontrollprüfungen 1982 und 2002 184
9.2. Erweichungspunkt Ring und Kugel, rechte Kanalseite, Kontrollprüfungen 1982 und 2002 184
9.3. Nadelpenetration, linke Kanalseite, Kontrollprüfungen 1982 und 2002 . . . 185
9.4. Nadelpenetration, Rechte Kanalseite, Kontrollprüfungen 1982 und 2002 . . 185

10.1. Kurzzeitalterung (STA) Bestandsdaten versus Laborversuche (70/100), Erweichungspunkt Ring und Kugel 191
10.2. Kurzzeitalterung (STA) Bestandsdaten versus Laborversuche (70/100), Nadelpenetration 191
10.3. Veränderung der Nadelpenetrationswerte während des Herstellungsprozesses und der Liegedauer (*Messfehler) 192
10.4. Veränderung der Ring- und Kugelwerte während des Herstellungsprozesses und der Liegedauer (*Messfehler) 193
10.5. Viskosität, Vergleich Bitumen 70/100 (B287) versus PmB 45/80-65 (B288), ungealtert (A) sowie RTFOT (LRTF) 196
10.6. Wärmebild TA-LKW versus KK-LKW [22] 197
10.7. Abkühlverlauf während Transport TA-LKW versus KK-LKW [22] 197
10.8. Baustellengeräte Asphaltwasserbau 199

A.1. Steifigkeiten und zugehöriger Phasenwinkel nach Oxidationsversuchen, Bitumen 70/100 243
A.2. Steifigkeiten und zugehöriger Phasenwinkel nach Kombinationsversuchen, Bitumen 70/100 244
A.3. Steifigkeiten und zugehöriger Phasenwinkel nach Oxidationsversuchen, B520 245
A.4. Steifigkeiten und zugehöriger Phasenwinkel nach Kombinationsversuchen, B520 246
A.5. Abkühlverläufe Oxidationsversuche Bitumen 70/100, Stufe 1, Versuch 1 und 2 247
A.6. Abkühlverläufe Oxidationsversuche Bitumen 70/100, Stufe 2, Versuch 1 und 2 248
A.7. Abkühlverläufe Oxidationsversuche Bitumen 70/100, Stufe 3, Versuch 1 und 2 249

A.8. Abkühlverläufe Oxidationsversuche PmB 45/80-65, Stufe 1, Versuch 1 und 2250
A.9. Abkühlverläufe Oxidationsversuche PmB 45/80-65, Stufe 2, Versuch 1 und 2251
A.10. Abkühlverläufe Oxidationsversuche PmB 45/80-65, Stufe 3, Versuch 1 und 2252
A.11. DSR-B533 253
A.12. DSR-B533 254
A.13. DSR-B533 255
A.14. DSR-B533 256
A.15. DSR Black-Space Diagramm, B533, -10°C bis 80°C (PP08, PP25) bei 0.1, 0.3, 1, 1.592, 3, 5, 10 Hz 257
A.16. DSR Cole-Cole Diagramm, B533, -10°C bis 80°C (PP08, PP25) bei 0.1, 0.3, 1, 1.592, 3, 5, 10 Hz 258
A.17. Fluorescent images of SBS modified bitumen with various contents (by weight) of SBS [36] 282
A.18. Morphology development with the storage time of a SBS modified bitumen at 160 °C [40] 283

Tabellenverzeichnis

1.1. Reale Alterungsbelastungen während des Lebenszyklusses von Asphaltbetonaufbauten [21] 20
1.2. Veränderung R&K und PEN mit variierenden Polymeranteilen, Frischbitumen - Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) [2] 26
1.3. Anforderungen an Bitumen für den Wasserbau [44] 27
1.4. Anforderungen an polymermodifiziertes Bitumen für den Wasserbau [44] . 28

2.1. Verarbeitungstemperaturen Asphaltmischgut laut Richtlinien für Arbeiten im Asphaltwasserbau [44] 30

3.1. Ergebnis der Nass- und Trockensiebung 43
3.2. Marshallkörper 7,2 m% Bitumen 70/100 48
3.3. Hohlraumgehalt 7,2 m% Bitumen 70/100 48
3.4. Marshallkörper 6,7 m% Bitumen 70/100 49
3.5. Hohlraumgehalt 6,7 m% Bitumen 70/100 49
3.6. Marshallkörper 6,2 m% Bitumen 70/100 50
3.7. Hohlraumgehalt 6,2 m% Bitumen 70/100 50
3.8. Marshallkörper 6,7 m% B520 51
3.9. Hohlraumgehalt 6,7 m% B520 51
3.10. Bestimmung der Dammneigung für die Prüfung der Standsicherheit 52
3.11. Van Asbeck, Asphaltmischgut mit Bitumen 70/100 56
3.12. Van Asbeck, Asphaltmischgut mit B520 58
3.13. Van Asbeck B520 Belastung bis Dichtungsversagen 59
3.14. Versprödungstendenzen durch erwärmen 61
3.15. Fortsetzung Tabelle Versprödungstendenzen durch erwärmen 62
3.16. Versprödungstendenzen durch erwärmen (Vergleichswerte), B520 64
3.17. Fortsetzung Tabelle Versprödungstendenzen durch erwärmen, B520 65
3.18. Fortsetzung Tabelle Versprödungstendenzen durch erwärmen, B520 und B533 66

4.1. Cluster-Test eigene Messung 73
4.2. Integralflächen der Bande bei 880 cm^{-1} 75
4.3. Integralflächen von δCH_3, ρCH_2 und $\rho CH_2/\ \delta CH_3$ 77
4.4. Integralflächen Sulphoxid Bande Probe A und V1-V6 79
4.5. Integralflächen C=O Bande Probe A und V1-V6 81
4.6. Gemittelte Eigenschaften B520 (A) der drei unterschiedlichen Chargen . . 88

5.1. Absolute und relative Veränderung der Ring- und Kugelwerte nach den Oxidationsversuchen 92

5.2. Absolute und relative Veränderung der Penetrationswerte nach den Oxidationsversuchen . . . 95
5.3. Absolute und relative Veränderung der Ring- und Kugelwerte nach den Oxidationsversuchen . . . 99
5.4. Absolute und relative Veränderung der Penetrationswerte nach den Oxidationsversuchen . . . 101
5.5. Absolute und relative Veränderung der Elastischen Rückstellung nach den Oxidationsversuchen . . . 103
5.6. Prozentualer Anteil Kornfraktionen der Designsieblinie . . . 107
5.7. Relative und absolute Veränderung der Steifigkeit und des Phasenwinkels durch Oxidationsversuche, Bitumen 70/100 . . . 110
5.8. Relative und absolute Veränderung der Steifigkeit und des Phasenwinkels durch die Kombinationsversuche, Bitumen 70/100 . . . 112
5.9. Relative und absolute Veränderung der Steifigkeit und des Phasenwinkels durch die Oxidationsversuche, B520 . . . 115
5.10. Relative und absolute Veränderung der Steifigkeit und des Phasenwinkels durch die Kombinationsversuche, B520 . . . 117

6.1. Absolute Veränderung der Ring- und Kugelwerte nach den Oxidationsversuchen . . . 120
6.2. Absolute Veränderung der Nadelpenetration nach den Oxidationsversuchen 122
6.3. Absolute Veränderung der elastischen Rückstellung nach den Oxidationsversuchen . . . 123

7.1. Präzisionen des RTFOT Verfahrens nach [48] . . . 135
7.2. Vergleich Bitumenkennwerte, STA Mischgutalterungsversuch - RTFOT Versuch . . . 136
7.3. Vergleich Auswirkungen RTFOT Alterung . . . 137

8.1. Zusammensetzung Asphaltdichtschicht, 1958 . . . 145
8.2. Kontrollprüfungen während Herstellung 1958, AF auf Böschung und Sohle 146
8.3. Kontrollprüfung 2008, AF auf Böschung und Sohle . . . 146
8.4. Zusammensetzung Asphaltdichtschicht, 1975 . . . 147
8.5. Zusammensetzung Asphaltdichtschicht, 2006 . . . 148
8.6. Kontrollprüfung 2008, Asphaltbetondichtung auf Böschung, . . . 148
8.7. Frischbitumenprüfung 1973 (Bitumenlieferant Firma Geißler & Peer) . . . 149
8.8. Zusammensetzung Asphaltdichtschicht 1973 . . . 149
8.9. Kontrollprüfung 2008, Asphaltbetondichtung auf Böschung . . . 150
8.10. Bitumenprüfung 1989, BK 2 und 3 . . . 152
8.11. Kontrollprüfung 1989, Asphaltbetondichtung auf Böschung . . . 152
8.12. Zusammensetzung Asphaltdichtschicht BK 2 und 3 . . . 152
8.13. Zusammensetzung Asphaltdichtschicht BK 4 und 5 . . . 152
8.14. Bitumenprüfung 1980, Dichtasphalt Mischanlage (nach Mischvorgang) . . . 154
8.15. Zusammensetzung Dichtasphalt Mischanlage, 1980 . . . 154

8.16. Mischgutprüfung 1980, Proben aus LKW . . . 155
8.17. Kontrollprüfung Bohrkerne 1989, Asphaltbetondichtung auf Böschung . . . 155
8.18. Kontrollprüfung Bohrkerne 2011, Asphaltbetondichtung auf Böschung . . . 155
8.19. Temperaturkontrolle während Herstellung 1963, Sohldichtung (Messung in LKW oder Fertiger), . . . 157
8.20. Temperaturkontrolle während Herstellung 1963, Dichtung an Böschung (Messung in LKW oder Fertiger) . . . 158
8.21. Kontrollprüfung 2005, Bitumenprüfung 70/100, Platten (Sohle) . . . 159
8.22. Frischbitumenprüfung 2011, 70/100 OMV . . . 159
8.23. Bitumenprüfung 2011, 70/100, LKW . . . 159
8.24. Bitumenprüfung nach Mischvorgang 1987, B 100 Elan-OMV, Mischanlage Mayreder . . . 160
8.25. Zusammensetzung Asphaltdichtschicht . . . 161
8.26. Kontrollprüfung 2010, AF auf Böschung und Sohle, (Teilsanierung 1968, lokale Leckagen) . . . 161
8.27. Kontrollprüfungen 2012, Bereich 1 . . . 163
8.28. Kontrollprüfungen 2012, Bereich 2 . . . 164
8.29. Kontrollprüfungen 2012, Bereich 3 . . . 164
8.30. Kontrollprüfungen 2012, Bereich 4 . . . 165
8.31. Bitumenuntersuchungen (A) 60/70 (Shell), 1972 . . . 166
8.32. Bitumenuntersuchungen (A) 60/70 (OMV), 1972 . . . 166
8.33. Untersuchung Aushackstücke, 1973 . . . 166
8.34. Zusammensetzung Asphaltdichtschicht aus Aushackstücken 1973 . . . 167
8.35. Bitumenuntersuchungen (A) 70/100, 2010 . . . 167
8.36. Zusammensetzung Asphaltdichtschicht . . . 167
8.37. Qualitätskontrolle während Einbau . . . 168
8.38. Bohrkernentnahme, 2016 . . . 169
8.39. Beschreibung der entnommenen Bohrkerne . . . 169
8.40. Bitumenuntersuchungen (A) 60/70 (Shell), 1972 . . . 172
8.41. Bitumenuntersuchungen (A) 60/70 (OMV), 1972 . . . 172
8.42. Untersuchung Aushackstücke, 1973 . . . 172
8.43. Zusammensetzung Asphaltdichtschicht aus Aushackstücken 1973 . . . 173
8.44. Bohrkernentnahme 2016 . . . 173
8.45. Beschreibung der entnommenen Bohrkerne . . . 173
8.46. Bitumenuntersuchungen (A) B80 Villbit, 1982 . . . 175
8.47. Bitumenuntersuchungen (A) B80 Spezial, 1983 . . . 175
8.48. Untersuchung Asphaltproben (Bohrkerne und Aushackstücke), 1982 und 1983 . . . 176
8.49. Bitumenuntersuchungen (A) B80, 1973 . . . 177
8.50. Bitumenkennwerte B 70 laut Richtlinie (1980) . . . 177
8.51. Zusammensetzung Asphaltdichtschicht, 1980 (Siebdurchgang) . . . 178
8.52. Kontrollprüfung 1980, Bohrkernentnahme . . . 178
8.53. Kontrollprüfung 1979, Untersuchung Aushackstücke . . . 179

8.54. Bitumenuntersuchungen (A) B80 Spezial, 1983 179
8.55. Untersuchung Asphaltbetonkernen, Alte Decke (1982) und Neue Decke (1983) 180
8.56. Bitumenkennwerte B 80 Spezial (1984) 181
8.57. Kontrollprüfung Bohrkerne, 1985 181

9.1. Zusammensetzung Asphaltbetondichtschicht 183
9.2. Oberwasserkanal, Kontrollprüfung 2008 186
9.3. Zusammensetzung Asphaltdichtschicht aus Kontrollprüfung 2008 186

10.1. Anteile STA und LTA an A_{Gesamt} 193
10.2. Bitumenprüfungen für den Asphaltwasserbau 204

A. Anhang

A.1. Daten Laborversuche

	Wert [°C]	Mittelwert	Norm Wert
B 70/100 A 0 R&K 1	48,2	48,3	48,4
B 70/100 A 0 R&K 2	48		
B 70/100 A 0 R&K 3	48,8		

	[1/10 mm]	Mittelwert
B 70/100 A 0 PEN 1	81,0	81,0
B 70/100 A 0 PEN 2	81,0	
B 70/100 A 0 PEN 3	81,0	

	Wert [°C]		Mittelwert	MW Norm
PmB 45/80 - 65 A 0 R&K 1	73	73	73	73
PmB 45/80 - 65 A 0 R&K 2	67,5	66,7	67,1	67,2
PmB 45/80 - 65 A 0 R&K 3	63,9	63,9	63,9	64
PmB 45/80 - 65 A 0 R&K 4	71,3	71,4	71,35	71,4
PmB 45/80 - 65 A 0 R&K 5	70,4	70,7	70,55	70
PmB 45/80 - 65 A 0 R&K 6	73,4	73,3	73,35	73,4

	[1/10 mm]			Mittelwert
PmB 45/80 - 65 A 0 PEN 1	66	65	65	65,33
PmB 45/80 - 65 A 0 PEN 2	66	65	65	65,33
PmB 45/80 - 65 A 0 PEN 3	66	66	66	66,00

	Probe 1	Probe 2	Mittelwert
PmB 45/80 - 65 A 0 EL 1	89,00	87,00	88,00
PmB 45/80 - 65 A 0 EL 2	91,00	89,00	90,00
PmB 45/80 - 65 A 0 EL 3	89,00	90,00	89,50
PmB 45/80 - 65 A 0 EL 4	91,00	90,00	90,50

Bitumen 70/100

Veränderung physikalischer Werte durch Rückgewinnung (Mischen bei 160°C)	Link	Rechts	Mittelwert	Normwert	Gesamtmittelwert [°C]	Ausgangswert A [°C]	Absolute Veränderung [°C]	Prozentuelle Veränderung [%]
B 70/100 O 1 R&K 1	51,7	51,7	51,7	51,8	51,5	0,0	51,5	
B 70/100 O 1 R&K 2	51,3	51,1	51,2	51,2				
B 70/100 O 1 R&K 3	57,1	56,8	57,0					
B 70/100 O 1 R&K 4			0,0					

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Mittelwert	Gesamtmittelwert [1/10mm]	Ausgangswert A [1/10mm]	Absolute Veränderung	Prozentuelle Veränderung [%]
B 70/100 O 1 PEN 1	57	57	58	57,33	59,2	81,0	-21,8	-27,0
B 70/100 O 1 PEN 2	61	60	62	61,00				
B 70/100 O 1 PEN 3								
B 70/100 O 1 PEN 4								
B 70/100 O 1 PEN 5								
B 70/100 O 1 PEN 6								

Veränderung p.Werte durch Rückgewinnung (Mischen bei 190°C)	Link	Rechts	Mittelwert	Normwert	Gesamtmittelwert [°C]	Ausgangswert A [°C]	Absolute Veränderung [°C]	Prozentuelle Veränderung [%]
B 70/100 O 1 R&K 1	57,1	56,8	57,0	57,0	56,6			
B 70/100 O 1 R&K 2	56,2	56,2	56,2	56,2				
B 70/100 O 1 R&K 3			0,0					
B 70/100 O 1 R&K 4			0,0					

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Mittelwert	Gesamtmittelwert [1/10mm]	Ausgangswert A [1/10mm]	Absolute Veränderung	Prozentuelle Veränderung [%]
B 70/100 O 1 PEN 1	38	40	39	39,00	40,8	81,0	-40,2	-49,6
B 70/100 O 1 PEN 2	43	43	42	42,67				
B 70/100 O 1 PEN 3								
B 70/100 O 1 PEN 4								
B 70/100 O 1 PEN 5								
B 70/100 O 1 PEN 6								

PMB 45/80-65

Veränderung physikalischer Werte durch Rückgewinnung (Mischen bei 170-190°C)	Link	Rechts	Mittelwert	Normwert	Gesamtmittelwert [°C]	Ausgangswert A [°C]	Absolute Veränderung [°C]	Prozentuelle Veränderung [%]
PmB 45/80-65 R&K 1	74,4	74,6	74,5	74,6	68,2	69,8	-29,8	-36,8
PmB 45/80-65 R&K 2	66,0	66,5	66,3	66,4				
PmB 45/80-65 R&K 3	67,2	66,8	67,0	67,0				
PmB 45/80-65 R&K 4	67,5	67,3	67,4	67,4				
PmB 45/80-65 R&K 4	64,5	64,4	64,5	64,6				
PmB 45/80-65 R&K 1	71,0	71,0	71,0	71,0				
PmB 45/80-65 R&K 2	66,2	66,9	66,6	66,6				

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Mittelwert	Gesamtmittelwert [1/10mm]	Ausgangswert A [1/10mm]	Absolute Veränderung	Prozentuelle Veränderung [%]
PmB 45/80-65 PEN 1	51	50	49	50,00	51,2	81,0	-29,8	-36,8
PmB 45/80-65 PEN 2	49	48	48	48,33				
PmB 45/80-65 PEN 3	53	55	54	54,00				
PmB 45/80-65 PEN 4	53,0	54,0	53,0	53,33				
PmB 45/80-65 PEN 5	52,0	50,0	52,0	51,33				
PmB 45/80-65 PEN 6	50,0	50,0	50,0	50,00				

	Probe 1	Probe 2	Mittelwert	Gesamtmittelwert	Ausgangswert A [1/10mm]	Absolute Veränderung	Prozentuelle Veränderung [%]
PmB 45/80-65 EL 1	86	84	85	81,2	81,0	0,2	0,2
PmB 45/80-65 EL 2	88	89	88,5				
PmB 45/80-65 EL 3	70	70	70				
PmB 45/80-65 EL 4							
PmB 45/80-65 EL 5							
PmB 45/80-65 EL 6							

Bestimmung Steifemodul 70/100 ungealtert

Probekörper		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	Einheit
Gewicht an der Luft		1125,5	1117,3	1122,8	1112,4	1122,9	1114,5	1112,2	1111,6	1116,6	[g]
Gewicht nach Wasserlagerung		1125,8	1117,7	1123,4	1112,8	1123,3	1114,6	1112,6	1112,5	1117,2	[g]
Gewicht unter Wasser		661,1	656	658,6	650,8	659,2	654	652,6	650	655	[g]
Volumen		464,7	461,7	464,8	462	464,1	460,6	460	462,5	462,2	[cm³]
Raumdichten		2,422	2,420	2,416	2,408	2,420	2,420	2,418	2,403	2,416	[g/cm³]
Raumdichte im Mittel		2,416									[g/cm³]
Höhen der Probe-körper	Höhe 1	61,1	60,7	61,8	60,9	61,6	60,8	60,9	61,1	61,5	mm
	Höhe 2	61,2	60,6	61,5	61,7	61,8	60,4	61,4	61,1	60,8	mm
	Höhe 3	61,2	60,7	61,6	61,3	61,5	60,7	60,7	61,5	60,7	mm
	Höhe 4	61,2	60,7	61,4	60,9	61,2	61,1	61,1	61,3	61,3	mm
Höhe im Mittel		61,2	60,7	61,6	61,2	61,5	60,8	61,0	61,3	61,1	mm

Bestimmung Steifemodul, PmB 45/80-65 ungealtert

Probekörper		I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	Einheit
Gewicht an der Luft		1125,2	1111,6	1139,2	1128,5	1117,1	1111,8	1119,3	1127,3	1134,4	1113,6	[g]
Gewicht nach Wasserlagerung		1126,5	1113,1	1140,5	1129,7	1118,5	1113,3	1120,5	1128,6	1135,6	1114,9	[g]
Gewicht unter Wasser		658,6	650,2	666,3	660,1	654	652,4	657,3	660,8	663,5	649,7	[g]
Volumen		467,9	462,9	474,2	469,6	464,5	460,9	463,2	467,8	472,1	465,2	[cm³]
Raumdichten		2,405	2,401	2,402	2,403	2,405	2,412	2,416	2,410	2,403	2,394	[g/cm³]
Raumdichte im Mittel		2,405										[g/cm³]
Höhen der Probe-körper	Höhe 1	61,5	61,4	62,8	62,4	61,1	61,5	60,9	61,7	62,7	62,1	mm
	Höhe 2	61,9	60,8	62,9	62,2	61,4	61,2	61,2	61,8	62,3	61,6	mm
	Höhe 3	62,2	61,7	62,8	62,1	61,5	60,8	61,7	62,0	62,5	61,0	mm
	Höhe 4	62,1	62,2	62,9	61,6	61,5	61,0	61,4	62,1	63,3	61,1	mm
Höhe im Mittel		61,9	61,5	62,8	62,1	61,4	61,1	61,3	61,9	62,7	61,4	mm

Proben Oxidation Stufe 1 (T=60 min, Temp=160°C) , 400l/min (Bitumen Prüfung)	Link	Rechts	Mittelwert	Normwert	Gesamtmittelwert [°C]	Ausgangswert A [°C]	Absolute Veränderung [°C]	Prozentuelle Veränderung [%]
B 70/100 O 1 R&K 1	53,8	53,4	53,6	53,6	53,6	48,4	5,2	10,6
B 70/100 O 1 R&K 2	53,2	53,1	53,2	53,2				
B 70/100 O 1 R&K 3	53,2	53,3	53,3	53,4				
B 70/100 O 1 R&K 4	53,8	53,9	53,9	54,0				
B 70/100 O 1 R&K 5								

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Mittelwert	Gesamtmittelwert [1/10mm]	Ausgangswert A [1/10mm]	Absolute Veränderung [1/10mm]	Prozentuelle Veränderung [%]
B 70/100 O 1 PEN 1	56	56	56	56	57,2	81,0	-23,8	-29,4
B 70/100 O 1 PEN 2	58	58	59	58,3				
B 70/100 O 1 PEN 3								
B 70/100 O 1 PEN 4								
B 70/100 O 1 PEN 5								
B 70/100 O 1 PEN 6								

Proben Oxidation Stufe 1 (T=60 min, Temp=160°C) , 400l/min (Bitumen Prüfung)	Link	Rechts	Mittelwert	Normwert	Gesamtmittelwert [°C]	Ausgangswert A [°C]	Absolute Veränderung [°C]	Prozentuelle Veränderung [%]
PmB 45/80-65 O 1 R&K Versuch 1	64,8	64,9	64,9	65,0	65,7	69,8	-4,1	-5,9
PmB 45/80-65 O 1 R&K Versuch 2	66,2	66,5	66,4	66,4				
PmB 45/80-65 O 1 R&K Versuch 3			0,0					
PmB 45/80-65 O 1 R&K Versuch 4			0,0					

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Mittelwert	Gesamtmittelwert [1/10mm]	Ausgangswert A [1/10mm]	Absolute Veränderung [1/10mm]	Prozentuelle Veränderung [%]
PmB 45/80-65 O 1 PEN Versuch 1	46	46	45	45,67	43,8	65,6	-21,7	-33,1
PmB 45/80-65 O 1 PEN Versuch 2	42	43	41	42,00				
PmB 45/80-65 O 1 PEN Versuch 3								
PmB 45/80-65 O 1 PEN Versuch 4								
PmB 45/80-65 O 1 PEN Versuch 5								
PmB 45/80-65 O 1 PEN Versuch 6								

	[mm]	[mm]	Mittelwert			
PmB 45/80-65 O 1 ELR Versuch 1	80	80	80,0	81,0	-1,0	-1,2
PmB 45/80-65 O 1 ELR Versuch 2	82	82	82,0			
PmB 45/80-65 O 1 ELR Versuch 3						
PmB 45/80-65 O 1 ELR Versuch 4						
PmB 45/80-65 O 1 ELR Versuch 5						
PmB 45/80-65 O 1 ELR Versuch 6						

Bestimmung Steifemodul Oxidation, 70/100 T=60min, Temp=160°C

Probekörper		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	Einheit
Gewicht an der Luft		1102,3	1109,2	1098,5	1110	1092,2	1108,5	1133,5	1109,3	1118	1113,2	[g]
Gewicht nach Wasserlagerung		1103,2	1110	1099,2	1110,8	1092,8	1109,4	1134,4	1110,4	1119,1	1114,1	[g]
Gewicht unter Wasser		646,2	651,8	645,1	653,2	641,1	646,1	661,4	651,3	657,6	651,3	[g]
Volumen		457	458,2	454,1	457,6	451,7	463,3	473	459,1	461,5	462,8	[cm³]
Raumdichten		2,412	2,421	2,419	2,426	2,418	2,393	2,396	2,416	2,423	2,405	[g/cm³]
Raumdichte im Mittel		2,413										[g/cm³]
Höhen der Probe-körper	Höhe 1	6,06	5,98	5,97	6,07	6	6,03	6,25	6,04	6,06	6,11	mm
	Höhe 2	6,04	6,02	5,96	6,02	5,92	6,01	6,21	6,06	6,11	6,17	mm
	Höhe 3	6	6,03	6,02	6	5,94	6,13	6,22	6,06	6,06	6,08	mm
	Höhe 4	6,01	6,04	6,03	6,06	5,93	6,06	6,24	5,99	6,07	6,1	mm
Höhe im Mittel		6,0	6,0	6,0	6,0	5,9	6,1	6,2	6,0	6,1	6,1	mm

Bestimmung Steifemodul, PmB 45/80-65 Oxidation T=160+/-3°C, t=60min

Probekörper		H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	Einheit
Gewicht an der Luft		1121,7	1116,6	1124,8		1140,5	1123,7	1130,1	1116,8	1110,4	1144	[g]
Gewicht nach Wasserlagerung		1122,8	1117,7	1126,1		1141,9	1124,8	1131,7	1118,3	1111,6	1145,6	[g]
Gewicht unter Wasser		656,7	649,1	660,5	beschädigt	670	658,5	663	655,5	653,2	672	[g]
Volumen		466,1	468,6	465,6		471,9	466,3	468,7	462,8	458,4	473,6	[cm³]
Raumdichten		2,407	2,383	2,416		2,417	2,410	2,411	2,413	2,422	2,416	[g/cm³]
Raumdichte im Mittel		2,410										[g/cm³]
Höhen der Probe-körper	Höhe 1	61,7	62,1	61,4		62,7	61,5	62,4	61,4	61,1	62,4	mm
	Höhe 2	61,7	61,5	61,1	beschädigt	62,9	62,5	62,1	61,4	61,4	62,6	mm
	Höhe 3	61,4	62,6	62,1	beschädigt	62,9	62,2	62,3	61,5	60,9	62,9	mm
	Höhe 4	61,7	62,8	62,6		62,4	61,1	62,5	61,6	60,8	62,8	mm
Höhe im Mittel		61,6	62,3	61,8		62,7	61,8	62,3	61,5	61,0	62,7	mm

Proben Oxidation Stufe 2 (T=120 min, Temp=160°C) , 400l/min (Bitumen Prüfung)	Link	Rechts	Mittelwert	Normwert	Gesamtmittelwert [°C]	Ausgangswert A [°C]	Absolute Veränderung [°C]	Prozentuelle Veränderung [%]
B 70/100 O 2 R&K Versuch 1	55,5	55,5	55,5	55,6	54,6	48,4	6,2	12,8
B 70/100 O 2 R&K Versuch 2	55,1	55,0	55,1	55,2				
B 70/100 O 2 R&K Versuch 3	52,8	53,1	53,0	53,0				
B 70/100 O 2 R&K Versuch 4			0,0					

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Mittelwert	Gesamtmittelwert [1/10mm]	Ausgangswert A [1/10mm]	Absolute Veränderung	Prozentuelle Veränderung [%]
B 70/100 O 2 PEN Versuch 1	55	54	53	54,00	52,9	81,0	-28,1	-34,7
B 70/100 O 2 PEN Versuch 2	52	53	52	52,33				
B 70/100 O 2 PEN Versuch 3	52	53	52	52,33				
B 70/100 O 2 PEN Versuch 4								
B 70/100 O 2 PEN Versuch 5								
B 70/100 O 2 PEN Versuch 6								

Proben Oxidation Stufe 2 (T=120 min, Temp=160°C) , 400l/min (Bitumen Prüfung)	Link	Rechts	Mittelwert	Normwert	Gesamtmittelwert [°C]	Ausgangswert A [°C]	Absolute Veränderung [°C]	Prozentuelle Veränderung [%]
PmB 45/80-65 O 3 R&K Versuch 1	66,4	66,6	66,5	66,6	66,5	69,8	-3,3	-4,8
PmB 45/80-65 O 3 R&K Versuch 2	66,5	66,1	66,3	66,4				
PmB 45/80-65 O 3 R&K Versuch 3			0,0					
PmB 45/80-65 O 3 R&K Versuch 4			0,0					

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Mittelwert	Gesamtmittelwert [1/10mm]	Ausgangswert A [1/10mm]	Absolute Veränderung	Prozentuelle Veränderung [%]
PmB 45/80-65 O 3 PEN Versuch 1	42	43	42	42,33	41,7	65,6	-23,9	-36,4
PmB 45/80-65 O 3 PEN Versuch 2	41	40	42	41,00				
PmB 45/80-65 O 3 PEN Versuch 3								
PmB 45/80-65 O 3 PEN Versuch 4								
PmB 45/80-65 O 3 PEN Versuch 5								
PmB 45/80-65 O 3 PEN Versuch 6								

	[mm]	[mm]	Mittelwert			
PmB 45/80-65 O 3 ELR Versuch 1	78	78	78,0	89,5	-11,5	-12,8
PmB 45/80-65 O 3 ELR Versuch 2	80	80	80,0			
PmB 45/80-65 O 3 ELR Versuch 3	79	81	80,0			
PmB 45/80-65 O 3 ELR Versuch 4	80,0	80,0	80,0			
PmB 45/80-65 O 3 ELR Versuch 5						
PmB 45/80-65 O 3 ELR Versuch 6						

Bestimmung Steifemodul, 70/100 Oxidation T=120min, Temp=160°C

Probekörper		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	Einheit
Gewicht an der Luft		1131,9	1114,1	1133,3	1128,1	1131,6	1110,2	1115,5	1134,9	1123	1134,5	[g]
Gewicht nach Wasserlagerung		1132,9	1115,1	1134,5	1129,1	1132,8	1111,5	1116,6	1136,3	1135,8	1125	[g]
Gewicht unter Wasser		665,5	654,6	661,2	659,7	665,7	654,7	656,8	661,2	653,6	661,5	[g]
Volumen		467,4	460,5	473,3	469,4	467,1	456,8	459,8	475,1	482,2	463,5	[cm³]
Raumdichten		2,422	2,419	2,394	2,403	2,423	2,430	2,426	2,389	2,329	2,448	[g/cm³]
Raumdichte im Mittel		2,408										[g/cm³]
Höhen der Probe-körper	Höhe 1	62,3	60,9	62,9	62,8	62,2	59,8	61	63,5	62,6	63,2	mm
	Höhe 2	61,6	60,8	62,7	62,7	61,9	60	61,4	63,2	63	62,6	mm
	Höhe 3	61,8	60,2	62,6	63,2	61,6	60,7	60,9	62,8	62,3	62,4	mm
	Höhe 4	61,9	61,1	62,6	62,4	61,8	61,3	60,6	63,1	62,9	63	mm
Höhe im Mittel		61,9	60,8	62,7	62,8	61,9	60,5	61,0	63,2	62,7	62,8	mm

Bestimmung Steifemodul, PmB 45/80-65 Oxidation T=160+/-3°C, t=120min

Probekörper		G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	Einheit
Gewicht an der Luft		1114,5	1115	1123,6	1145,3	1121,7	1118,1	1125,8	1119,8	1135,6	1137,7	[g]
Gewicht nach Wasserlagerung		1116,1	1116,4	1125,1	1146,9	1123,4	1119,6	1127,6	1121,8	1137,1	1139,2	[g]
Gewicht unter Wasser		651,8	654,9	658,8	670,4	657,4	656,8	659,8	657,1	666,5	666,6	[g]
Volumen		464,3	461,5	466,3	476,5	466	462,8	467,8	464,7	470,6	472,6	[cm³]
Raumdichten		2,400	2,416	2,410	2,404	2,407	2,416	2,407	2,410	2,413	2,407	[g/cm³]
Raumdichte im Mittel		2,409										[g/cm³]
Höhen der Probe-körper	Höhe 1	61,5	61,4	62,0	63,2	62,5	61,4	62,5	62,0	63,1	63,0	mm
	Höhe 2	61,9	60,8	61,4	62,9	62,3	61,2	61,9	61,3	62,4	62,3	mm
	Höhe 3	61,4	61,2	61,7	62,9	61,7	61,2	61,7	61,3	62,2	62,7	mm
	Höhe 4	61,5	61,8	61,5	63,4	62,3	61,5	62,2	61,5	61,9	63,0	mm
Höhe im Mittel		61,6	61,3	61,6	63,1	62,2	61,3	62,1	61,5	62,4	62,7	mm

Proben Oxidation Stufe 3 (T=210 min, Temp=160°C) , 400l/min (Bitumen Prüfung)	Link	Rechts	Mittelwert	Normwert	Gesamtmittelwert [°C]	Ausgangswert A [°C]	Absolute Veränderung [°C]	Prozentuelle Veränderung [%]
B 70/100 O 3 R&K Versuch 1	56,0	56,1	56,1	56,2	56,1	48,4	7,7	15,8
B 70/100 O 3 R&K Versuch 2	55,6	56,1	55,9	56,0				
B 70/100 O 3 R&K Versuch 3	56,0	55,9	56,0	56,0				
B 70/100 O 3 R&K Versuch 4								

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Mittelwert	Gesamtmittelwert	Ausgangswert A [1/10mm]	Absolute Veränderung	Prozentuelle Veränderung [%]
B 70/100 O 3 PEN Versuch 1	45	45	45	45,00	43,8	81,0	-37,2	-45,9
B 70/100 O 3 PEN Versuch 2	43	43	42	42,67				
B 70/100 O 3 PEN Versuch 3								
B 70/100 O 3 PEN Versuch 4								
B 70/100 O 3 PEN Versuch 5								
B 70/100 O 3 PEN Versuch 6								

Proben Oxidation Stufe 3 (T=210 min, Temp=160°C) , 400l/min (Bitumen Prüfung)	Link	Rechts	Mittelwert	Normwert	Gesamtmittelwert [°C]	Ausgangswert A [°C]	Absolute Veränderung [°C]	Prozentuelle Veränderung [%]
PmB 45/80-65 O 3 R&K Versuch 1	63,5	63,8	63,7	63,8	64,6	69,8	-5,2	-7,5
PmB 45/80-65 O 3 R&K Versuch 2	65,5	65,2	65,4	65,4				
PmB 45/80-65 O 3 R&K Versuch 3			0,0					
PmB 45/80-65 O 3 R&K Versuch 4			0,0					

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Mittelwert	Gesamtmittelwert	Ausgangswert A [1/10mm]	Absolute Veränderung	Prozentuelle Veränderung [%]
PmB 45/80-65 O 3 PEN Versuch 1	41	39	41	40,33	43,2	65,6	-22,4	-34,2
PmB 45/80-65 O 3 PEN Versuch 2	47	45	46	46,00				
PmB 45/80-65 O 3 PEN Versuch 3								
PmB 45/80-65 O 3 PEN Versuch 4								
PmB 45/80-65 O 3 PEN Versuch 5								
PmB 45/80-65 O 3 PEN Versuch 6								

	[mm]	[mm]	Mittelwert			
PmB 45/80-65 O 3 ELR Versuch 1	81	81	81,0	89,5	-8,5	-9,5
PmB 45/80-65 O 3 ELR Versuch 2	80	80	80,0			
PmB 45/80-65 O 3 ELR Versuch 3						
PmB 45/80-65 O 3 ELR Versuch 4						
PmB 45/80-65 O 3 ELR Versuch 5						
PmB 45/80-65 O 3 ELR Versuch 6						

Bestimmung Steifemodul, 70/100 Oxidation T=210min, Temp=160°C

Probekörper		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	Einheit
Gewicht an der Luft		1115,7	1137,8	1116,3	1107,5	1131,4	1107,6	1106	1119,6	1123,3	1126,1	[g]
Gewicht nach Wasserlagerung		1116,5	1138,6	1116,9	1108,2	1132,1	1108,5	1106,6	1120,5	1124,1	1126,7	[g]
Gewicht unter Wasser		656,1	668,8	656,4	648,8	665,4	651,9	650,4	658,7	659,2	661,4	[g]
Volumen		460,4	469,8	460,5	459,4	466,7	456,6	456,2	461,8	464,9	465,3	[cm³]
Raumdichten		2,423	2,422	2,424	2,411	2,424	2,426	2,424	2,424	2,416	2,420	[g/cm³]
Raumdichte im Mittel		2,422										[g/cm³]
Höhen der Probe-körper	Höhe 1	60,2	61,7	60,9	60,4	61,7	60,9	60,6	61,4	61,8	61,5	mm
	Höhe 2	60,6	61,5	61,1	60,7	61,6	60,1	60	60,7	61,2	61,3	mm
	Höhe 3	61,5	62	61	60,9	62,3	60,6	60,3	60,6	61,7	61,6	mm
	Höhe 4	60,9	62,5	60,6	60,6	61,7	60,7	60,4	61,8	61,4	62	mm
Höhe im Mittel		60,8	61,9	60,9	60,7	61,8	60,6	60,3	61,1	61,5	61,6	mm

Bestimmung Steifemodul, PmB 45/80-65 Oxidation T=160+/-3°C, t=210min

Probekörper		F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	Einheit
Gewicht an der Luft		1109	1135,4	1120	1111,5	1145	1116,6	1143,5	1137,7	1107,4	1121	[g]
Gewicht nach Wasserlagerung		1110,2	1137,2	1121,4	1113,4	1146,6	1118,1	1144,7	1139,1	1108,8	1122,6	[g]
Gewicht unter Wasser		650,7	662,6	652,9	647,5	672,5	655,6	666,3	667,7	649,8	653,5	[g]
Volumen		459,5	474,6	468,5	465,9	474,1	462,5	478,4	471,4	459	469,1	[cm³]
Raumdichten		2,413	2,392	2,391	2,386	2,415	2,414	2,390	2,413	2,413	2,390	[g/cm³]
Raumdichte im Mittel		2,402										[g/cm³]
Höhen der Probe-körper	Höhe 1	61,1	62,7	63,0	61,3	63,0	61,6	63,0	61,7	60,7	62,7	mm
	Höhe 2	60,5	62,7	62,1	61,4	62,9	61,1	62,9	63,3	60,4	61,7	mm
	Höhe 3	60,4	63,1	61,5	61,1	62,9	61,5	63,7	62,9	61,0	61,9	mm
	Höhe 4	60,8	63,5	62,6	61,4	63,1	61,3	64,1	63,4	61,4	62,0	mm
Höhe im Mittel		60,7	63,0	62,3	61,3	62,9	61,4	63,4	62,8	60,9	62,1	mm

Proben Oxidation + Temperatur Stufe 1 (t=60 min, T=variabel) , 400l/min (Bitumen Prüfung)	Link	Rechts	Mittelwert	Normwert	Gesamtmittelwert [°C]	Ausgangswert A [°C]	Absolute Veränderung [°C]	Prozentuelle Veränderung [%]
B 70/100 O 3 R&K Versuch 1	53,0	52,9	53,0	53,0	52,4	48,4	4,0	8,3
B 70/100 O 3 R&K Versuch 2	51,7	51,7	51,7	51,8				
B 70/100 O 3 R&K Versuch 3								
B 70/100 O 3 R&K Versuch 4								

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Mittelwert	Gesamtmittelwert [1/10mm]	Ausgangswert A [1/10mm]	Absolute Veränderung	Prozentuelle Veränderung [%]
B 70/100 O 3 PEN Versuch 1	36	36	35	35,67	43,3	81,0	-37,7	-46,5
B 70/100 O 3 PEN Versuch 2	33	34	33	33,33				
B 70/100 O 3 PEN Versuch 3	52	52	52	52,00				
B 70/100 O 3 PEN Versuch 4	52,0	52,0	53,0	52,33				
B 70/100 O 3 PEN Versuch 5								
B 70/100 O 3 PEN Versuch 6								

Proben Oxidation + Temperatur Stufe 1 (t=60min, T=variabel) , 400l/min (Bitumen Prüfung)	Link	Rechts	Mittelwert	Normwert	Gesamtmittelwert [°C]	Ausgangswert A [°C]	Absolute Veränderung [°C]	Prozentuelle Veränderung [%]
PmB 45/80-65 O+T 3 R&K Versuch 1	67,9	68,2	68,1	68,2	68,1	69,8	-1,7	-2,5
PmB 45/80-65 O+T 3 R&K Versuch 2	67,6	68,4	68,0	68,0				
PmB 45/80-65 O+T 3 R&K Versuch 3								
PmB 45/80-65 O+T 3 R&K Versuch 4								

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Mittelwert	Gesamtmittelwert [1/10mm]	Ausgangswert A [1/10mm]	Absolute Veränderung	Prozentuelle Veränderung [%]
PmB 45/80-65 O+T 3 PEN Versuch 1	42	42	42	42,00	41,7	65,6	-23,9	-36,4
PmB 45/80-65 O+T 3 PEN Versuch 2	41	41	42	41,33				
PmB 45/80-65 O+T 3 PEN Versuch 3								
PmB 45/80-65 O+T 3 PEN Versuch 4								
PmB 45/80-65 O+T 3 PEN Versuch 5								
PmB 45/80-65 O+T 3 PEN Versuch 6								

	[mm]	[mm]	Mittelwert			
PmB 45/80-65 O+T 3 ELR Versuch 1	84	84	84,0	84,0	89,5	-6,1
PmB 45/80-65 O+T 3 ELR Versuch 2	83	85	84,0			
PmB 45/80-65 O+T 3 ELR Versuch 3						
PmB 45/80-65 O+T 3 ELR Versuch 4						
PmB 45/80-65 O+T 3 ELR Versuch 5						
PmB 45/80-65 O+T 3 ELR Versuch 6						

Bestimmung Steifemodul, 70/100 Oxidation + Temperatur T=variabel , t=60 min

Probekörper		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8			Einheit
Gewicht an der Luft		1118,1	1128,4	1123,9	1125	1131,9	1112,9	1120,5	1109,6			[g]
Gewicht nach Wasserlagerung		1119,2	1129,6	1125,1	1126	1133	1114	1121,5	1110,7			[g]
Gewicht unter Wasser		656	662,3	658,5	660,6	663	653,2	656,4	647,7			[g]
Volumen		463,2	467,3	466,6	465,4	470	460,8	465,1	463			[cm³]
Raumdichten		2,414	2,415	2,409	2,417	2,408	2,415	2,409	2,397			[g/cm³]
Raumdichte im Mittel		2,410										[g/cm³]
Höhen der Probe-körper	Höhe 1	61,3	61,41	61,94	61,63	62,08	61,22	61,08	61,06			mm
	Höhe 2	61,11	61,81	61,43	61,86	61,81	60,75	61,18	61,3			mm
	Höhe 3	61,35	61,79	61,31	61,48	61,84	60,66	61,49	61,43			mm
	Höhe 4	61,26	61,81	62,01	61,9	62,27	61,03	61,38	61,34			mm
Höhe im Mittel		61,3	61,7	61,7	61,7	62,0	60,9	61,3	61,3			mm

Bestimmung Steifemodul, PmB 45/80-65 Oxidation + Temperatur T=variabel, t=60min

Probekörper		L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8			Einheit
Gewicht an der Luft		1124,3	1153,3	1129,8	1125,3	1115	1118,6	1132,5	1143,5			[g]
Gewicht nach Wasserlagerung		1125,3	1154,7	1131,2	1126,3	1116,2	1119,6	1133,6	1145			[g]
Gewicht unter Wasser		656,5	668,6	662,3	656,2	647,4	654,1	670,3	667,8			[g]
Volumen		468,8	486,1	468,9	470,1	468,8	465,5	463,3	477,2			[cm³]
Raumdichten		2,398	2,373	2,409	2,394	2,378	2,403	2,444	2,396			[g/cm³]
Raumdichte im Mittel		2,400										[g/cm³]
Höhen der Probe-körper	Höhe 1	61,4	63,0	61,9	61,8	61,8	62,0	61,9	62,8			mm
	Höhe 2	62,3	62,6	62,5	62,8	61,3	61,2	62,3	63,0			mm
	Höhe 3	62,0	63,7	61,7	61,3	62,2	61,0	63,5	63,1			mm
	Höhe 4	61,4	62,9	61,4	61,6	61,6	61,2	61,2	62,5			mm
Höhe im Mittel		61,7	63,0	61,9	61,9	61,7	61,4	62,2	62,8			mm

Proben Oxidation + Temperatur Stufe 2 (t=120 min, T=variabel) , 400l/min (Bitumen Prüfung)	Link	Rechts	Mittelwert	Normwert	Gesamtmittelwert [°C]	Ausgangswert A [°C]	Absolute Veränderung [°C]	Prozentuelle Veränderung [%]
B 70/100 O 3 R&K Versuch 1	54,6	54,6	54,6	54,6	55,3	48,4	6,9	14,3
B 70/100 O 3 R&K Versuch 2	55,9	55,8	55,9	56,0				
B 70/100 O 3 R&K Versuch 3								
B 70/100 O 3 R&K Versuch 4								

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Mittelwert	Gesamtmittelwert	Ausgangswert A [1/10mm]	Absolute Veränderung	Prozentuelle Veränderung [%]
B 70/100 O 3 PEN Versuch 1	36	36	35	35,67	41,8	81,0	-39,3	-48,5
B 70/100 O 3 PEN Versuch 2	33	34	33	33,33				
B 70/100 O 3 PEN Versuch 3	48	49	48	48,33				
B 70/100 O 3 PEN Versuch 4	50,0	49,0	50,0	49,67				
B 70/100 O 3 PEN Versuch 5								
B 70/100 O 3 PEN Versuch 6								

Proben Oxidation + Temperatur Stufe 2 (T=120 min, Temp=variabel) , 400l/min (Bitumen Prüfu	Link	Rechts	Mittelwert	Normwert	Gesamtmittelwert [°C]	Ausgangswert A [°C]	Absolute Veränderung [°C]	Prozentuelle Veränderung [%]
PmB 45/80-65 O+T 3 R&K Versuch 1	68,3	68,7	68,5	68,6	68,4	69,8	-1,4	-2,1
PmB 45/80-65 O+T 3 R&K Versuch 2	68,0	68,4	68,2	68,2				
PmB 45/80-65 O+T 3 R&K Versuch 3			0,0					
PmB 45/80-65 O+T 3 R&K Versuch 4			0,0					

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Mittelwert	Gesamtmittelwert	Ausgangswert A [1/10mm]	Absolute Veränderung	Prozentuelle Veränderung [%]
PmB 45/80-65 O+T 3 PEN Versuch 1	44	42	44	43,33	41,0	65,6	-24,6	-37,5
PmB 45/80-65 O+T 3 PEN Versuch 2	39	39	38	38,67				
PmB 45/80-65 O+T 3 PEN Versuch 3								
PmB 45/80-65 O+T 3 PEN Versuch 4								
PmB 45/80-65 O+T 3 PEN Versuch 5								
PmB 45/80-65 O+T 3 PEN Versuch 6								

	[mm]	[mm]	Mittelwert			
PmB 45/80-65 O+T 3 ELR Versuch 1	80	80	80,0	79,3	89,5	-11,5
PmB 45/80-65 O+T 3 ELR Versuch 2	79	78	78,5			
PmB 45/80-65 O+T 3 ELR Versuch 3						
PmB 45/80-65 O+T 3 ELR Versuch 4						
PmB 45/80-65 O+T 3 ELR Versuch 5						
PmB 45/80-65 O+T 3 ELR Versuch 6						

Bestimmung Steifemodul, 70/100 Oxidation + Temperatur T=variabel, t=120 min

Probekörper		O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8			Einheit
Gewicht an der Luft		1144,1	1134	1136,4	1142	1118,2	1121,9	1127,6	1133,1			[g]
Gewicht nach Wasserlagerung		1145,1	1135,1	1137,2	1143,4	1119,2	1122,9	1129	1134,1			[g]
Gewicht unter Wasser		671,8	665,4	666,7	669,6	656,9	657,5	662,7	666,3			[g]
Volumen		473,3	469,7	470,5	473,8	462,3	465,4	466,3	467,8			[cm³]
Raumdichten		2,417	2,414	2,415	2,410	2,419	2,411	2,418	2,422			[g/cm³]
Raumdichte im Mittel		2,416										[g/cm³]
Höhen der Probe-körper	Höhe 1	62,54	61,95	61,39	62,07	60,92	60,74	60,39	60,99			mm
	Höhe 2	61,63	61,46	61,52	61,61	60,8	61,35	61,04	61,25			mm
	Höhe 3	62,09	60,99	61,75	61,91	60,12	61,26	61,27	61,41			mm
	Höhe 4	62,29	61,77	61,29	61,86	60,62	60,78	60,56	60,82			mm
Höhe im Mittel		62,1	61,5	61,5	61,9	60,6	61,0	60,8	61,1			mm

Bestimmung Steifemodul, PmB 45/80-65 Oxidation + Temperatur T=variabel, t=120min

Probekörper		N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8			Einheit
Gewicht an der Luft		1136,7	1105,4	1120,8	1119,6	1145,4	1127,6	1148,1	1117,3			[g]
Gewicht nach Wasserlagerung		1138,3	1106,9	1122,6	1121,1	1146,8	1129	1150	1119,1			[g]
Gewicht unter Wasser		666,8	647,4	658,1	656,3	672,1	661,9	673,7	656,5			[g]
Volumen		471,5	459,5	464,5	464,8	474,7	467,1	476,3	462,6			[cm³]
Raumdichten		2,411	2,406	2,413	2,409	2,413	2,414	2,410	2,415			[g/cm³]
Raumdichte im Mittel		2,411										[g/cm³]
Höhen der Probe-körper	Höhe 1	62,7	60,7	61,6	61,4	62,4	61,6	62,8	61,3			mm
	Höhe 2	63,4	60,8	61,4	61,7	62,6	61,7	62,2	60,8			mm
	Höhe 3	62,0	60,9	61,3	61,6	62,5	61,8	63,6	61,4			mm
	Höhe 4	62,3	60,7	61,7	61,3	63,0	62,1	63,1	61,1			mm
Höhe im Mittel		62,6	60,8	61,5	61,5	62,6	61,8	62,9	61,2			mm

Proben Oxidation Stufe 3 (T=210 min, Temp=variabel) , 400l/min (Bitumen Prüfung)	Link	Rechts	Mittelwert	Normwert	Gesamtmittelwert [°C]	Ausgangswert A [°C]	Absolute Veränderung [°C]	Prozentuelle Veränderung [%]
B 70/100 O 3 R&K Versuch 1	60,8	60,8	60,8	60,8	60,6	48,4	12,2	25,2
B 70/100 O 3 R&K Versuch 2	60,3	60,5	60,4	60,4				
B 70/100 O 3 R&K Versuch 3								
B 70/100 O 3 R&K Versuch 4								

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Mittelwert	Gesamtmittelwert	Ausgangswert A [1/10mm]	Absolute Veränderung	Prozentuelle Veränderung [%]
B 70/100 O 3 PEN Versuch 1	36	36	35	35,67	34,5	81,0	-46,5	-57,4
B 70/100 O 3 PEN Versuch 2	33	34	33	33,33				
B 70/100 O 3 PEN Versuch 3								
B 70/100 O 3 PEN Versuch 4								
B 70/100 O 3 PEN Versuch 5								
B 70/100 O 3 PEN Versuch 6								

Proben Oxidation + Temperatur Stufe 3 (T=210 min, Temp=variabel) , 400l/min	Link	Rechts	Mittelwert	Normwert	Gesamtmittelwert [°C]	Ausgangswert A [°C]	Absolute Veränderung [°C]	Prozentuelle Veränderung [%]
PmB 45/80-65 O+T 3 R&K Versuch 1	71,1	71,7	71,4	71,4	72,3	69,8	2,5	3,5
PmB 45/80-65 O+T 3 R&K Versuch 2	73,1	73,0	73,1	73,2				
PmB 45/80-65 O+T 3 R&K Versuch 3			0,0					
PmB 45/80-65 O+T 3 R&K Versuch 4			0,0					

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Mittelwert	Gesamtmittelwert	Ausgangswert A [1/10mm]	Absolute Veränderung	Prozentuelle Veränderung [%]
PmB 45/80-65 O+T 3 PEN Versuch 1	38	40	38	38,67	36,3	65,6	-29,2	-44,6
PmB 45/80-65 O+T 3 PEN Versuch 2	34	34	34	34,00				
PmB 45/80-65 O+T 3 PEN Versuch 3								
PmB 45/80-65 O+T 3 PEN Versuch 4								
PmB 45/80-65 O+T 3 PEN Versuch 5								
PmB 45/80-65 O+T 3 PEN Versuch 6								

	[mm]	[mm]	Mittelwert			
PmB 45/80-65 O+T 3 ELR Versuch 1	79	80	79,5	76,3	89,5	-14,8
PmB 45/80-65 O+T 3 ELR Versuch 2	73	73	73,0			
PmB 45/80-65 O+T 3 ELR Versuch 3						
PmB 45/80-65 O+T 3 ELR Versuch 4						
PmB 45/80-65 O+T 3 ELR Versuch 5						
PmB 45/80-65 O+T 3 ELR Versuch 6						

Bestimmung Steifemodul, 70/100 Oxidation + Temperatur T=variabel, t=210 min

Probekörper		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	Einheit
Gewicht an der Luft		1125,2	1122,6	1127,1	1116,9	1116,9	1132,4	1124	1115	1108,9	1126,1	[g]
Gewicht nach Wasserlagerung		1125,7	1123,2	1127,5	1117,5	1117,5	1133	1124,8	1115,5	1109,5	1126,8	[g]
Gewicht unter Wasser		661,9	658,3	661,5	656,9	655,3	664,2	659,7	656	650,5	662,3	[g]
Volumen		463,8	464,9	466	460,6	462,2	468,8	465,1	459,5	459	464,5	[cm³]
Raumdichten		2,426	2,415	2,419	2,425	2,416	2,416	2,417	2,427	2,416	2,424	[g/cm³]
Raumdichte im Mittel		2,420										[g/cm³]
Höhen der Probe-körper	Höhe 1	61,4	60,9	61,5	60,8	60,8	62	61,7	61,2	61,7	61,4	mm
	Höhe 2	62	60,9	61,4	60,9	61,2	62,1	62,4	61,3	60,7	61,5	mm
	Höhe 3	61,2	62	61,9	61,3	61,2	62	61,7	60,6	60,6	61,7	mm
	Höhe 4	61,3	61,7	61,6	61	61,2	62,3	62,1	60,4	60,7	61,7	mm
Höhe im Mittel		61,5	61,4	61,6	61,0	61,1	62,1	62,0	60,9	60,9	61,6	mm

Bestimmung Steifemodul, PmB 45/80-65 Oxidation + Temperatur T=variabel, t=210min

Probekörper		K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8			Einheit
Gewicht an der Luft		1126,9	1137,7	1126,2	1135,4	1121,2	1109,9	1139,5	1150,7			[g]
Gewicht nach Wasserlagerung		1128,2	1139,1	1127,7	1136,7	1122,5	1111	1141	1151,8			[g]
Gewicht unter Wasser		660,8	666,9	661,5	667,3	656,5	648,7	669	674,9			[g]
Volumen		467,4	472,2	466,2	469,4	466	462,3	472	476,9			[cm³]
Raumdichten		2,411	2,409	2,416	2,419	2,406	2,401	2,414	2,413			[g/cm³]
Raumdichte im Mittel		2,411										[g/cm³]
Höhen der Probe-körper	Höhe 1	62,1	62,7	61,8	62,1	61,4	60,8	62,4	62,7			mm
	Höhe 2	61,0	62,3	61,5	61,6	60,9	61,0	62,3	63,1			mm
	Höhe 3	61,6	62,2	61,5	61,9	61,4	61,0	62,4	63,3			mm
	Höhe 4	61,9	61,8	62,0	62,3	61,5	61,3	62,7	62,7			mm
Höhe im Mittel		61,7	62,2	61,7	62,0	61,3	61,0	62,4	62,9			mm

Bericht zur Rückgewinnung: Oxidation T=60min,Temp=160 +/- 3°C, MG SL 11 70/100 Versuch 1

Gefäß Voll	4289,6						
Gefäß leer	2640,6	Gefäß + Mineral	1394,2	Hülse voll	731		
Einwaage	1649	Gefäß leer	38,6	Hülse leer	544,2		
Mineral	1542,4	ges. Mineral	1355,6		186,8		
Bindemittel [g]	106,6						
Bindemittel [%]	6,46		IST [%]	SOLL [%]			
Plus Zuschlag	0,2708	**Bindemittelgesamt**	6,74	6,7			
	Rückstand [g]	Rückstände [%]	Durchgang [%]				
			100				
11,2 - 16,0	35	2,27	97,73				
8,0 - 11,2	206	13,37	84,36				
5,6 - 8,0	205	13,30	71,06				
2,0 - 5,6	424	27,51	43,54	IST [%]			
1,0 - 2,0	129	8,37	35,17	**gGK**	56,46		
0,25 - 1,0	266	17,26	17,91	**fGk**	31,34		
0,125 - 0,25	59	3,83	14,08	**Füller**	12,20		
0,063 - 0,125	29	1,88	12,20		100,00		
<0,063	188	12,20	0,00				
	1541	100,00					

Bericht zur Rückgewinnung: Oxidation T=60min,Temp.=160 +/- 3°C, MG SL 11 70/100 Versuch 3

Gefäß Voll	4732						
Gefäß leer	3460	Gefäß (Schale) + Mineral	1073,54	Hülse voll	676,3		
Einwaage	1272	Gefäß leer	38,46	Hülse leer	521,4		
Mineral	1189,98	ges. Mineral	1035,08		154,9		
Bindemittel [g]	82,02						
Bindemittel [%]	6,45		IST [%]	SOLL [%]			
Plus Zuschlag	0,2708	**Bindemittelgesamt**	6,72	6,7			
	Rückstand [g]	Rückstände [%]	Durchgang [%]				
			100				
11,2 - 16,0	13,5	1,13	98,87				
8,0 - 11,2	146,3	12,30	86,57				
5,6 - 8,0	151	12,69	73,88				
2,0 - 5,6	364,2	30,61	43,27	IST [%]			
1,0 - 2,0	67,6	5,68	37,59	**gGK**	56,73		
0,25 - 1,0	209	17,57	20,02	**fGk**	30,20		
0,125 - 0,25	57,4	4,82	15,20	**Füller**	13,07		
0,063 - 0,125	25,3	2,13	13,07		100,00		
<0,063	155,5	13,07	0,00				
	1189,8	100,00					

Bericht zur Rückgewinnung: Oxidation T=160 +/- 3°C,t=60, MG SL 11 Pmb Versuch 1 09.06.2015

Gefäß Voll		5179,9					
Gefäß leer		3478	Gefäß (Schale) + Mineral	1428,6		Hülse voll	744
Einwaage		1701,9	Gefäß leer	38,8		Hülse leer	537,3
Mineral		1596,5	ges. Mineral	1389,8			206,7
Bindemittel [g]		105,4					
Bindemittel [%]		6,19		IST [%]	SOLL [%]		
Plus Zuschlag		0,28	**Bindemittelgesamt**	6,48	6,7		
	Rückstand [g]	Rückstände [%]	Durchgang [%]				
			100				
11,2 - 16,0	57,3	3,59	96,41				
8,0 - 11,2	178	11,16	85,25				
5,6 - 8,0	219,1	13,73	71,52				
2,0 - 5,6	427,1	26,77	44,75	IST [%]			
1,0 - 2,0	67,1	4,21	40,54	**gGK**	55,25		
0,25 - 1,0	295,6	18,53	22,01	**fGk**	31,67		
0,125 - 0,25	100,7	6,31	15,70	**Füller**	13,08		
0,063 - 0,125	41,8	2,62	13,08		100,00		
<0,063	208,7	13,08	0,00				
	1595,4	100,00					

Bericht zur Rückgewinnung: Oxidation T=160 +/- 3°C,t=60, MG SL 11 Pmb Versuch 2 09.06.2015

Gefäß Voll		5122,2					
Gefäß leer		3458,4	Gefäß (Schale) + Mineral	1395,9		Hülse voll	719,5
Einwaage		1663,8	Gefäß leer	38,6		Hülse leer	520,4
Mineral		1556,4	ges. Mineral	1357,3			199,1
Bindemittel [g]		107,4					
Bindemittel [%]		6,46		IST [%]	SOLL [%]		
Plus Zuschlag		0,28	**Bindemittelgesamt**	6,74	6,7		
	Rückstand [g]	Rückstände [%]	Durchgang [%]				
			100				
11,2 - 16,0	40,3	2,59	97,41				
8,0 - 11,2	182,8	11,75	85,66				
5,6 - 8,0	214,5	13,78	71,88				
2,0 - 5,6	417	26,80	45,08	IST [%]			
1,0 - 2,0	78,4	5,04	40,04	**gGK**	54,92		
0,25 - 1,0	292,9	18,82	21,22	**fGk**	32,16		
0,125 - 0,25	88,5	5,69	15,53	**Füller**	12,92		
0,063 - 0,125	40,7	2,62	12,92		100,00		
<0,063	201	12,92	0,00				
	1556,1	100,00					

Bericht zur Rückgewinnung: Oxidation T=120min,Temp.=160 +/- 3°C, MG SL 11 70/100 Versuch 1 12.05.2015

Gefäß Voll		4310,7						
Gefäß leer		2635,3	Gefäß (Schale) + Mineral		1398,8		Hülse voll	742,1
Einwaage		1675,4	Gefäß leer		39		Hülse leer	533,1
Mineral		1568,8	ges. Mineral		1359,8			209
Bindemittel [g]		106,6						
Bindemittel [%]		6,36			IST [%]	SOLL [%]		
Plus Zuschlag		0,29	**Bindemittelgesamt**		6,65	6,7		
	Rückstand [g]	Rückstände [%	Durchgang [%]					
			100					
11,2 - 16,0	48	3,06	96,94					
8,0 - 11,2	174	11,08	85,87					
5,6 - 8,0	177	11,27	74,60					
2,0 - 5,6	454	28,90	45,70		IST [%]			
1,0 - 2,0	78	4,96	40,74	**gGK**	54,30			
0,25 - 1,0	281	17,89	22,85	**fGk**	32,15			
0,125 - 0,25	98	6,24	16,61	**Füller**	13,56			
0,063 - 0,125	48	3,06	13,56		100,00			
<0,063	213	13,56	0,00					
	1571	100,00						

Bericht zur Rückgewinnung: Oxidation T=120min,Temp.=160 +/- 3°C, MG SL 11 70/100 Versuch 2 12.05.2015

Gefäß Voll		5149,5						
Gefäß leer		3445,1	Gefäß (Schale) + Mineral		1440,3		Hülse voll	728
Einwaage		1704,4	Gefäß leer		38,9		Hülse leer	527,8
Mineral		1601,6	ges. Mineral		1401,4			200,2
Bindemittel [g]		102,8						
Bindemittel [%]		6,03			IST [%]	SOLL [%]		
Plus Zuschlag		0,28	**Bindemittelgesamt**		6,31	6,7		
	Rückstand [g]	Rückstände [%	Durchgang [%]					
			100					
11,2 - 16,0	76,7	4,79	95,21					
8,0 - 11,2	201,5	12,59	82,62					
5,6 - 8,0	216	13,49	69,12					
2,0 - 5,6	421,9	26,36	42,77		IST [%]			
1,0 - 2,0	73,4	4,59	38,18	**gGK**	57,23			
0,25 - 1,0	282,5	17,65	20,53	**fGk**	30,19			
0,125 - 0,25	87,4	5,46	15,07	**Füller**	12,58			
0,063 - 0,125	39,9	2,49	12,58		100,00			
<0,063	201,3	12,58	0,00					
	1600,6	101,88						

Bericht zur Rückgewinnung: Oxidation T=120min,Temp.=160 +/- 3°C, MG SL 11 70/100 Versuch 3 20.05.2015

Gefäß Voll		5090,3						
Gefäß leer		3458	Gefäß (Schale) + Mineral		1355,3		Hülse voll	754,2
Einwaage		1632,3	Gefäß leer		38,5		Hülse leer	541
Mineral		1530	ges. Mineral		1316,8			213,2
Bindemittel [g]		102,3						
Bindemittel [%]		6,27			IST [%]	SOLL [%]		
Plus Zuschlag		0,30	**Bindemittelgesamt**		6,56	6,7		
	Rückstand [g]	Rückstände [%	Durchgang [%]					
			100					
11,2 - 16,0	33,6	2,19	97,81					
8,0 - 11,2	150,5	9,79	88,02					
5,6 - 8,0	153,1	9,96	78,06					
2,0 - 5,6	479,6	31,21	46,84		IST [%]			
1,0 - 2,0	101	6,57	40,27	**gGK**	53,16			
0,25 - 1,0	293,7	19,11	21,16	**fGk**	32,87			
0,125 - 0,25	75	4,88	16,28	**Füller**	13,97			
0,063 - 0,125	35,4	2,30	13,97		100,00			
<0,063	214,7	13,97	0,00					
	1536,6	100,00						

Bericht zur Rückgewinnung: Oxidation T=120min,Temp.=160 +/- 3°C, MG SL 11 Pmb Versuch 1 08.06.2015

Gefäß Voll		6283,8						
Gefäß leer		3445,9		Gefäß (Schale) + Mineral	2363,2		Hülse voll	873,8
Einwaage		2837,9		Gefäß leer	38,5		Hülse leer	553,5
Mineral		2645		ges. Mineral	2324,7			320,3
Bindemittel [g]		192,9						
Bindemittel [%]		6,80			**IST [%]**	**SOLL [%]**		
Plus Zuschlag		0,27		**Bindemittelgesamt**	7,07	6,7		
	Rückstand [g]	Rückstände [%	Durchgang [%]					
			100					
11,2 - 16,0	99,2	3,75	96,25					
8,0 - 11,2	342,4	12,96	83,29					
5,6 - 8,0	318,6	12,06	71,23					
2,0 - 5,6	706,6	26,74	44,48		**IST [%]**			
1,0 - 2,0	116,2	4,40	40,09	**gGK**	55,52			
0,25 - 1,0	506,2	19,16	20,93	**fGk**	32,12			
0,125 - 0,25	150	5,68	15,25	**Füller**	12,37			
0,063 - 0,125	76,2	2,88	12,37		100,00			
<0,063	326,7	12,37	0,00					
	2642,1	100,00						

Bericht zur Rückgewinnung: Oxidation T=120min,Temp.=160 +/- 3°C, MG SL 11 Pmb Versuch 2 08.06.2015

Gefäß Voll		5463,3						
Gefäß leer		3446,9		Gefäß (Schale) + Mineral	1686,5		Hülse voll	763,6
Einwaage		2016,4		Gefäß leer	38,5		Hülse leer	531,4
Mineral		1880,2		ges. Mineral	1648			232,2
Bindemittel [g]		136,2						
Bindemittel [%]		6,75			**IST [%]**	**SOLL [%]**		
Plus Zuschlag		0,27		**Bindemittelgesamt**	7,03	6,7		
	Rückstand [g]	Rückstände [%	Durchgang [%]					
			100					
11,2 - 16,0	69,1	3,68	96,32					
8,0 - 11,2	234,1	12,45	83,87					
5,6 - 8,0	242,2	12,88	70,99					
2,0 - 5,6	474,4	25,23	45,76		**IST [%]**			
1,0 - 2,0	112,6	5,99	39,77	**gGK**	54,24			
0,25 - 1,0	371,4	19,75	20,02	**fGk**	33,32			
0,125 - 0,25	97,6	5,19	14,83	**Füller**	12,45			
0,063 - 0,125	44,8	2,38	12,45		100,00			
<0,063	234	12,45	0,00					
	1880,2	100,00						

Bericht zur Rückgewinnung: Oxidation T=210min,Temp.=160 +/- 3°C, MG SL 11 70/100 Versuch 1 19.05.2015

Gefäß Voll		4266,1					
Gefäß leer		3444,1	Gefäß (Schale) + Mineral	701,6		Hülse voll	635,6
Einwaage		822	Gefäß leer	38,9		Hülse leer	528,2
Mineral		770,1	ges. Mineral	662,7			107,4
Bindemittel [g]		51,9					
Bindemittel [%]		6,31		IST [%]	SOLL [%]		
Plus Zuschlag		0,30	**Bindemittelgesamt**	6,61	6,7		
	Rückstand [g]	Rückstände [%	Durchgang [%]				
			100				
11,2 - 16,0	24,7	3,21	96,79				
8,0 - 11,2	99,3	12,90	83,89				
5,6 - 8,0	90,4	11,74	72,14				
2,0 - 5,6	210,5	27,35	44,80	IST [%]			
1,0 - 2,0	43,7	5,68	39,12	**gGK**	55,20		
0,25 - 1,0	137,7	17,89	21,23	**fGk**	30,80		
0,125 - 0,25	39,5	5,13	16,10	**Füller**	13,99		
0,063 - 0,125	16,2	2,10	13,99		100,00		
<0,063	107,7	13,99	0,00				
	769,7	100,00					

Bericht zur Rückgewinnung: Oxidation T=210min,Temp.=160 +/- 3°C, MG SL 11 70/100 Versuch 2 19.05.2015

Gefäß Voll		5414					
Gefäß leer		3457,9	Gefäß (Schale) + Mineral	1633,5		Hülse voll	783,5
Einwaage		1956,1	Gefäß leer	38,5		Hülse leer	544,7
Mineral		1833,8	ges. Mineral	1595			238,8
Bindemittel [g]		122,3					
Bindemittel [%]		6,25		IST [%]	SOLL [%]		
Plus Zuschlag		0,28	**Bindemittelgesamt**	6,54	6,7		
	Rückstand [g]	Rückstände [%	Durchgang [%]				
			100				
11,2 - 16,0	36,8	2,01	97,99				
8,0 - 11,2	223,5	12,19	85,80				
5,6 - 8,0	243	13,26	72,54				
2,0 - 5,6	532,7	29,06	43,48	IST [%]			
1,0 - 2,0	108,7	5,93	37,55	**gGK**	56,52		
0,25 - 1,0	323,5	17,65	19,91	**fGk**	30,39		
0,125 - 0,25	84,9	4,63	15,27	**Füller**	13,10		
0,063 - 0,125	39,9	2,18	13,10		100,00		
<0,063	240,1	13,10	0,00				
	1833,1	100,00					

Bericht zur Rückgewinnung: Oxidation T=210min,Temp.=160 +/- 3°C, MG SL 11 Pmb Versuch 1 28.05.2015

Gefäß Voll		4946					
Gefäß leer		3477,6	Gefäß (Schale) + Mineral	1244,6		Hülse voll	707,1
Einwaage		1468,4	Gefäß leer	38,7		Hülse leer	539,1
Mineral		1373,9	ges. Mineral	1205,9			168
Bindemittel [g]		94,5					
Bindemittel [%]		6,44		IST [%]	SOLL [%]		
Plus Zuschlag		0,27	**Bindemittelgesamt**	6,71	6,7		

	Rückstand [g]	Rückstände [%	Durchgang [%]
			100
11,2 - 16,0	69,6	5,07	94,93
8,0 - 11,2	190,8	13,90	81,03
5,6 - 8,0	201,2	14,66	66,38
2,0 - 5,6	327,9	23,89	42,49
1,0 - 2,0	65,5	4,77	37,72
0,25 - 1,0	243	17,70	20,02
0,125 - 0,25	70,7	5,15	14,87
0,063 - 0,125	33,4	2,43	12,43
<0,063	170,7	12,43	0,00
	1372,8	100,00	

	IST [%]
gGK	57,51
fGk	30,06
Füller	12,43
	100,00

Bericht zur Rückgewinnung: Oxidation T=210min,Temp.=160 +/- 3°C, MG SL 11 Pmb Versuch 2 28.05.2015

Gefäß Voll		5776					
Gefäß leer		3457,4	Gefäß (Schale) + Mineral	1876,6		Hülse voll	787,8
Einwaage		2318,6	Gefäß leer	38,7		Hülse leer	535,2
Mineral		2090,5	ges. Mineral	1837,9			252,6
Bindemittel [g]		228,1					
Bindemittel [%]		9,84		IST [%]	SOLL [%]		
Plus Zuschlag		0,27	**Bindemittelgesamt**	10,11	6,7		

	Rückstand [g]	Rückstände [%	Durchgang [%]
			100
11,2 - 16,0	93,3	4,47	95,53
8,0 - 11,2	261,8	12,54	82,99
5,6 - 8,0	277,7	13,30	69,70
2,0 - 5,6	562,8	26,95	42,74
1,0 - 2,0	113,5	5,44	37,31
0,25 - 1,0	374,4	17,93	19,38
0,125 - 0,25	98,5	4,72	14,66
0,063 - 0,125	48,1	2,30	12,36
<0,063	258,1	12,36	0,00
	2088,2	152,11	

	IST [%]
gGK	57,26
fGk	30,39
Füller	12,36
	100,00

Bericht zur Rückgewinnung: Temp + Oxidation T=variabel,t=60 min , MG SL 11 70/100 Versuch 1 24.06.2015

Gefäß Voll		4873,9						
Gefäß leer		3451,8	Gefäß (Schale) + Mineral		1216,7		Hülse voll	715,9
Einwaage		1422,1	Gefäß leer		38,8		Hülse leer	564,1
Mineral		1329,7	ges. Mineral		1177,9			151,8
Bindemittel [g]		92,4						
Bindemittel [%]		6,50			IST [%]	SOLL [%]		
Plus Zuschlag		0,26	**Bindemittelgesamt**		6,76	6,7		
	Rückstand [g]	Rückstände [%	Durchgang [%]					
			100					
11,2 - 16,0	39,4	2,97	97,03					
8,0 - 11,2	205,1	15,44	81,60					
5,6 - 8,0	176,3	13,27	68,33					
2,0 - 5,6	347,1	26,13	42,20		IST [%]			
1,0 - 2,0	72,1	5,43	36,77	**gGK**	57,80			
0,25 - 1,0	249,3	18,77	18,01	**fGk**	30,70			
0,125 - 0,25	60,8	4,58	13,43	**Füller**	11,49			
0,063 - 0,125	25,7	1,93	11,49		100,00			
<0,063	152,7	11,49	0,00					
	1328,5	100,00						

Bericht zur Rückgewinnung: Temp + Oxidation T=variabel,t=60 min , MG SL 11 70/100 Versuch 2

Gefäß Voll		5474,9						
Gefäß leer		3452,3	Gefäß (Schale) + Mineral		1696		Hülse voll	753
Einwaage		2022,6	Gefäß leer		38,6		Hülse leer	523,9
Mineral		1886,5	ges. Mineral		1657,4			229,1
Bindemittel [g]		136,1						
Bindemittel [%]		6,73			IST [%]	SOLL [%]		
Plus Zuschlag		0,27	**Bindemittelgesamt**		7,00	6,7		
	Rückstand [g]	Rückstände [%	Durchgang [%]					
			100					
11,2 - 16,0	37,6	1,99	98,01					
8,0 - 11,2	273,8	14,52	83,48					
5,6 - 8,0	286,4	15,19	68,29					
2,0 - 5,6	459,5	24,37	43,92		IST [%]			
1,0 - 2,0	99,5	5,28	38,65	**gGK**	56,08			
0,25 - 1,0	365	19,36	19,29	**fGk**	31,67			
0,125 - 0,25	90,9	4,82	14,47	**Füller**	12,26			
0,063 - 0,125	41,7	2,21	12,26		100,00			
<0,063	231,1	12,26	0,00					
	1885,5	100,00						

Bericht zur Rückgewinnung: Temp + Oxidation T=120min,Temp.=variabel, MG SL 11 PmB 45/80-65 Versuch 2

Gefäß Voll		5737,4						
Gefäß leer		3435,1	Gefäß (Schale) + Mineral		1914,6		Hülse voll	817,7
Einwaage		2302,3	Gefäß leer		38,5		Hülse leer	544,6
Mineral		2149,2	ges. Mineral		1876,1			273,1
Bindemittel [g]		153,1						
Bindemittel [%]		6,65			IST [%]	SOLL [%]		
Plus Zuschlag		0,28	**Bindemittelgesamt**		6,93	6,7		
	Rückstand [g]	Rückstände [%	Durchgang [%]					
			100					
11,2 - 16,0	49,9	2,32	97,68					
8,0 - 11,2	243,7	11,34	86,33					
5,6 - 8,0	270,7	12,60	73,73					
2,0 - 5,6	566,1	26,35	47,38		IST [%]			
1,0 - 2,0	134,8	6,28	41,10	**gGK**	52,62			
0,25 - 1,0	450	20,95	20,15	**fGk**	34,45			
0,125 - 0,25	103,8	4,83	15,32	**Füller**	12,92			
0,063 - 0,125	51,5	2,40	12,92		100,00			
<0,063	277,6	12,92	0,00					
	2148,1	100,00						

Bericht zur Rückgewinnung: Temp + Oxidation t=120min,T=variabel, MG SL 11 70/100 Versuch 1

Gefäß Voll		5712,2						
Gefäß leer		3433,5	Gefäß (Schale) + Mineral		1913,7		Hülse voll	818,6
Einwaage		2278,7	Gefäß leer		39,5		Hülse leer	568,8
Mineral		2124	ges. Mineral		1874,2			249,8
Bindemittel [g]		154,7						
Bindemittel [%]		6,79			IST [%]	SOLL [%]		
Plus Zuschlag		0,27	**Bindemittelgesamt**		7,06	6,7		
	Rückstand [g]	Rückstände [%	Durchgang [%]					
			100					
11,2 - 16,0	30,7	1,45	98,55					
8,0 - 11,2	259,5	12,23	86,33					
5,6 - 8,0	294,4	13,87	72,46					
2,0 - 5,6	559,6	26,37	46,09		IST [%]			
1,0 - 2,0	135,5	6,38	39,71	**gGK**	53,91			
0,25 - 1,0	423,3	19,94	19,76	**fGk**	33,78			
0,125 - 0,25	102,1	4,81	14,95	**Füller**	12,32			
0,063 - 0,125	56	2,64	12,32		100,00			
<0,063	261,4	12,32	0,00					
	2122,5	100,00						

Bericht zur Rückgewinnung: Temp + Oxidation t=120min,T=variabel, MG SL 11 70/100 Versuch 2

Gefäß Voll		5797,4						
Gefäß leer		3453,8	Gefäß (Schale) + Mineral		1959,1		Hülse voll	812,2
Einwaage		2343,6	Gefäß leer		38,6		Hülse leer	540,1
Mineral		2192,6	ges. Mineral		1920,5			272,1
Bindemittel [g]		151						
Bindemittel [%]		6,44			IST [%]	SOLL [%]		
Plus Zuschlag		0,28	**Bindemittelgesamt**		6,72	6,7		
	Rückstand [g]	Rückstände [%	Durchgang [%]					
			100					
11,2 - 16,0	68,6	3,13	96,87					
8,0 - 11,2	246,2	11,23	85,64					
5,6 - 8,0	284,6	12,99	72,65					
2,0 - 5,6	590,2	26,93	45,72		IST [%]			
1,0 - 2,0	138,2	6,31	39,42	**gGK**	54,28			
0,25 - 1,0	428,9	19,57	19,85	**fGk**	33,03			
0,125 - 0,25	103	4,70	15,15	**Füller**	12,69			
0,063 - 0,125	53,8	2,45	12,69		100,00			
<0,063	278,2	12,69	0,00					
	2191,7	100,00						

Bericht zur Rückgewinnung: Temp + Oxidation T=120min,Temp.=variabel, MG SL 11 PmB 45/80-65 Versuch 1

Gefäß Voll		6174,1					Hülse voll	814,9
Gefäß leer		3433,8	Gefäß (Schale) + Mineral		2315,8		Hülse leer	529,4
Einwaage		2740,3	Gefäß leer		38,6			
Mineral		2562,7	ges. Mineral		2277,2			285,5
Bindemittel [g]		177,6						
Bindemittel [%]		6,48			IST [%]	SOLL [%]		
Plus Zuschlag		0,26	**Bindemittelgesamt**		6,74	6,7		
	Rückstand [g]	Rückstände [%	Durchgang [%]					
			100					
11,2 - 16,0	71,6	2,79	97,21					
8,0 - 11,2	367,1	14,33	82,88					
5,6 - 8,0	355,2	13,86	69,02					
2,0 - 5,6	624,9	24,39	44,63		IST [%]			
1,0 - 2,0	157,6	6,15	38,48	**gGK**	55,37			
0,25 - 1,0	510,8	19,93	18,55	**fGk**	33,22			
0,125 - 0,25	123	4,80	13,75	**Füller**	11,41			
0,063 - 0,125	59,8	2,33	11,41		100,00			
<0,063	292,5	11,41	0,00					
	2562,5	100,00						

Bericht zur Rückgewinnung: Temp + Oxidation T=120min,Temp.=variabel, MG SL 11 PmB 45/80-65 Versuch 2

Gefäß Voll		5925,2					Hülse voll	812,1
Gefäß leer		3453,6	Gefäß (Schale) + Mineral		2083,5		Hülse leer	544,5
Einwaage		2471,6	Gefäß leer		39,13			
Mineral		2311,97	ges. Mineral		2044,37			267,6
Bindemittel [g]		159,63						
Bindemittel [%]		6,46			IST [%]	SOLL [%]		
Plus Zuschlag		0,27	**Bindemittelgesamt**		6,72	6,7		
	Rückstand [g]	Rückstände [%	Durchgang [%]					
			100					
11,2 - 16,0	72,8	3,15	96,85					
8,0 - 11,2	263,3	11,40	85,45					
5,6 - 8,0	303,8	13,16	72,29					
2,0 - 5,6	571,7	24,76	47,53		IST [%]			
1,0 - 2,0	166,1	7,19	40,34	**gGK**	52,47			
0,25 - 1,0	490	21,22	19,12	**fGk**	35,71			
0,125 - 0,25	112,2	4,86	14,26	**Füller**	11,83			
0,063 - 0,125	56,3	2,44	11,83		100,00			
<0,063	273,1	11,83	0,00					
	2309,3	100,00						

Bericht zur Rückgewinnung: Temp + Oxidation T=210min,Temp.=variabel, MG SL 11 70/100 Versuch 1 21.05.2015

Gefäß Voll		4743,6						
Gefäß leer		3454,6	Gefäß (Schale) + Mineral		1082,1	Hülse voll		703,9
Einwaage		1289	Gefäß leer		38,5	Hülse leer		543,8
Mineral		1203,7	ges. Mineral		1043,6			160,1
Bindemittel [g]		85,3						
Bindemittel [%]		6,62			IST [%]	SOLL [%]		
Plus Zuschlag		0,29	**Bindemittelgesamt**		6,91	6,7		
	Rückstand [g]	Rückstände [%	Durchgang [%]					
			100					
11,2 - 16,0	45,8	3,81	96,19					
8,0 - 11,2	119,3	9,92	86,27					
5,6 - 8,0	140,2	11,66	74,62					
2,0 - 5,6	335,4	27,88	46,74		IST [%]			
1,0 - 2,0	74,5	6,19	40,54	**gGK**	53,26			
0,25 - 1,0	240	19,95	20,59	**fGk**	33,34			
0,125 - 0,25	59,2	4,92	15,67	**Füller**	13,40			
0,063 - 0,125	27,3	2,27	13,40		100,00			
<0,063	161,2	13,40	0,00					
	1202,9	100,00						

Bericht zur Rückgewinnung: Temp + Oxidation T=210min,Temp.=variabel, MG SL 11 70/100 Versuch 2 22.05.2015

Gefäß Voll		4516,6						
Gefäß leer		3444,4	Gefäß (Schale) + Mineral		903,6	Hülse voll		660
Einwaage		1072,2	Gefäß leer		38,9	Hülse leer		522
Mineral		1002,7	ges. Mineral		864,7			138
Bindemittel [g]		69,5						
Bindemittel [%]		6,48			IST [%]	SOLL [%]		
Plus Zuschlag		0,29	**Bindemittelgesamt**		6,78	6,7		
	Rückstand [g]	Rückstände [%	Durchgang [%]					
			100					
11,2 - 16,0	19,8	1,98	98,02					
8,0 - 11,2	113,8	11,36	86,66					
5,6 - 8,0	105,1	10,49	76,17					
2,0 - 5,6	311,3	31,07	45,10		IST [%]			
1,0 - 2,0	60,2	6,01	39,09	**gGK**	54,90			
0,25 - 1,0	183,7	18,34	20,75	**fGk**	31,28			
0,125 - 0,25	49,3	4,92	15,83	**Füller**	13,82			
0,063 - 0,125	20,2	2,02	13,82		100,00			
<0,063	138,4	13,82	0,00					
	1001,8	100,00						

Bericht zur Rückgewinnung: Oxidation + Temperatur T=variabel,t=210min, MG SL 11 Pmb Versuch 1 11.06.2015

Gefäß Voll		5421,4					
Gefäß leer		3451,5	Gefäß (Schale) + Mineral	1647,2		Hülse voll	773,5
Einwaage		1969,9	Gefäß leer	38,5		Hülse leer	540,4
Mineral		1841,8	ges. Mineral	1608,7			233,1
Bindemittel [g]		128,1					
Bindemittel [%]		6,50		IST [%]	SOLL [%]		
Plus Zuschlag		0,28	**Bindemittelgesamt**	6,78	6,7		
	Rückstand [g]	Rückstände [%	Durchgang [%]				
			100				
11,2 - 16,0	59,8	3,25	96,75				
8,0 - 11,2	226,9	12,33	84,43				
5,6 - 8,0	249,5	13,55	70,87				
2,0 - 5,6	486,9	26,45	44,42	IST [%]			
1,0 - 2,0	83,5	4,54	39,88	**gGK**	55,58		
0,25 - 1,0	336,9	18,30	21,58	**fGk**	31,50		
0,125 - 0,25	109,5	5,95	15,63	**Füller**	12,92		
0,063 - 0,125	49,9	2,71	12,92		100,00		
<0,063	237,9	12,92	0,00				
	1840,8	100,00					

Bericht zur Rückgewinnung: Oxidation T=variabel,t=210, MG SL 11 Pmb Versuch 2 15.06.2015

Gefäß Voll		5396,3					
Gefäß leer		3432,5	Gefäß (Schale) + Mineral	1656,4		Hülse voll	764,7
Einwaage		1963,8	Gefäß leer	38,9		Hülse leer	544,7
Mineral		1837,5	ges. Mineral	1617,5			220
Bindemittel [g]		126,3					
Bindemittel [%]		6,43		IST [%]	SOLL [%]		
Plus Zuschlag		0,27	**Bindemittelgesamt**	6,70	6,7		
	Rückstand [g]	Rückstände [%	Durchgang [%]				
			100				
11,2 - 16,0	35,9	1,96	98,04				
8,0 - 11,2	217,7	11,86	86,19				
5,6 - 8,0	275,9	15,03	71,16				
2,0 - 5,6	481,6	26,23	44,93	IST [%]			
1,0 - 2,0	100,2	5,46	39,47	**gGK**	55,07		
0,25 - 1,0	371,6	20,24	19,24	**fGk**	32,87		
0,125 - 0,25	90,6	4,93	14,30	**Füller**	12,06		
0,063 - 0,125	41,1	2,24	12,06		100,00		
<0,063	221,5	12,06	0,00				
	1836,1	100,00					

A.2. Steifigkeit - indirekte Zugprüfung (CIT-CY)

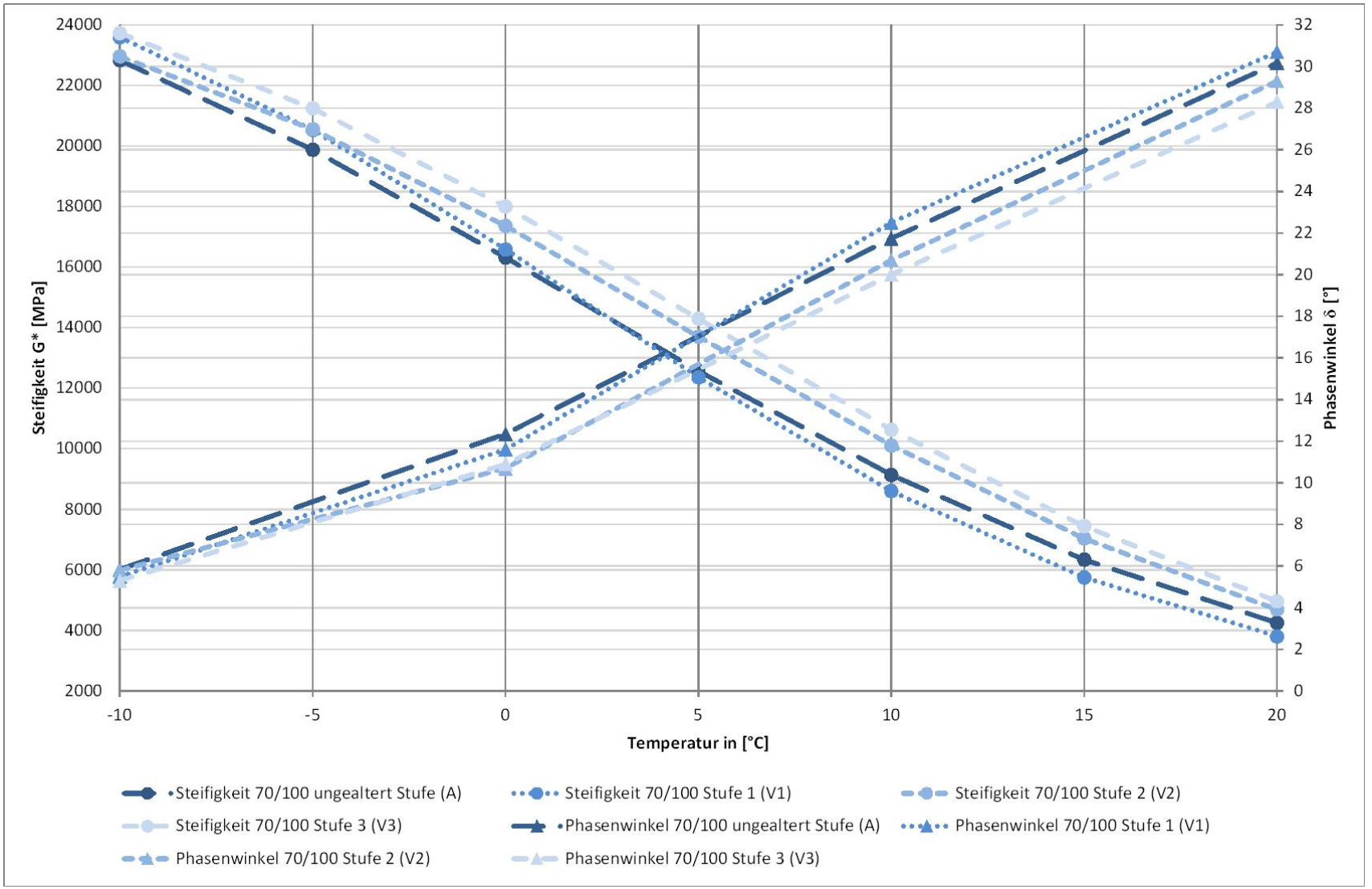


Abbildung A.1.: Steifigkeiten und zugehöriger Phasenwinkel nach Oxidationsversuchen, Bitumen 70/100

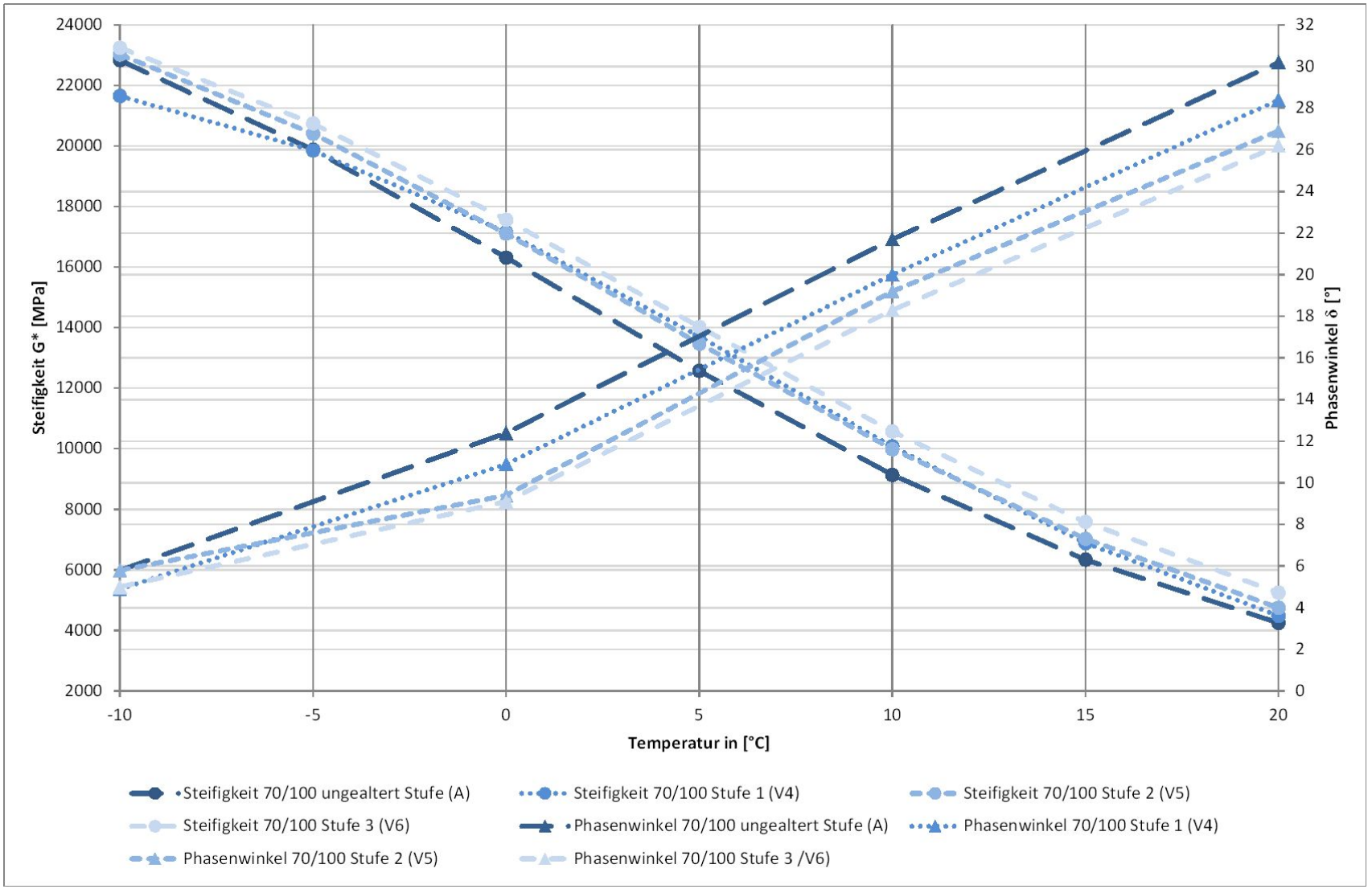


Abbildung A.2.: Steifigkeiten und zugehöriger Phasenwinkel nach Kombinationsversuchen, Bitumen 70/100

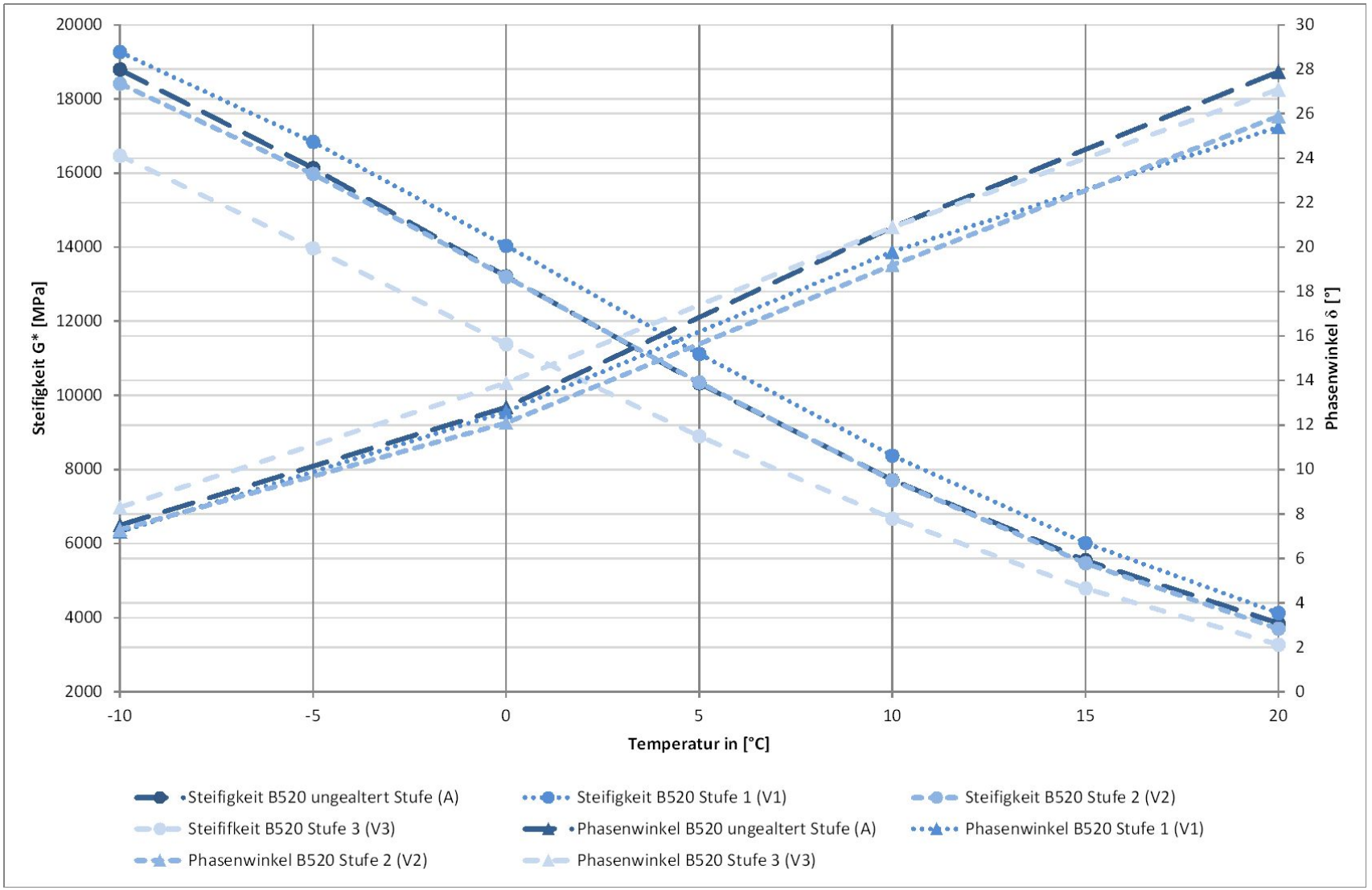


Abbildung A.3.: Steifigkeiten und zugehöriger Phasenwinkel nach Oxidationsversuchen, B520

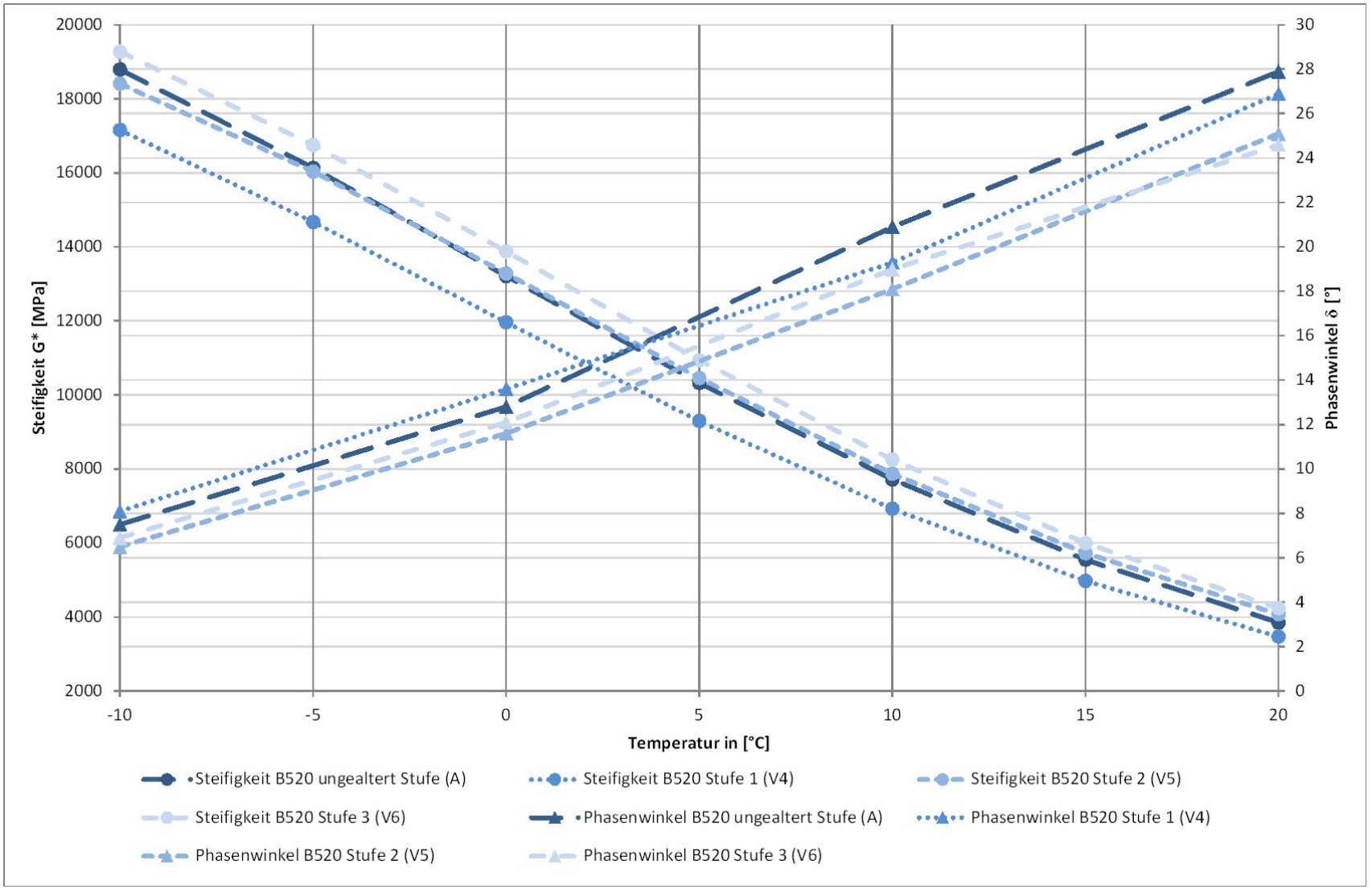


Abbildung A.4.: Steifigkeiten und zugehöriger Phasenwinkel nach Kombinationsversuchen, B520

A.3. Gemessene Abkühlkurven während Alterungsversuchen

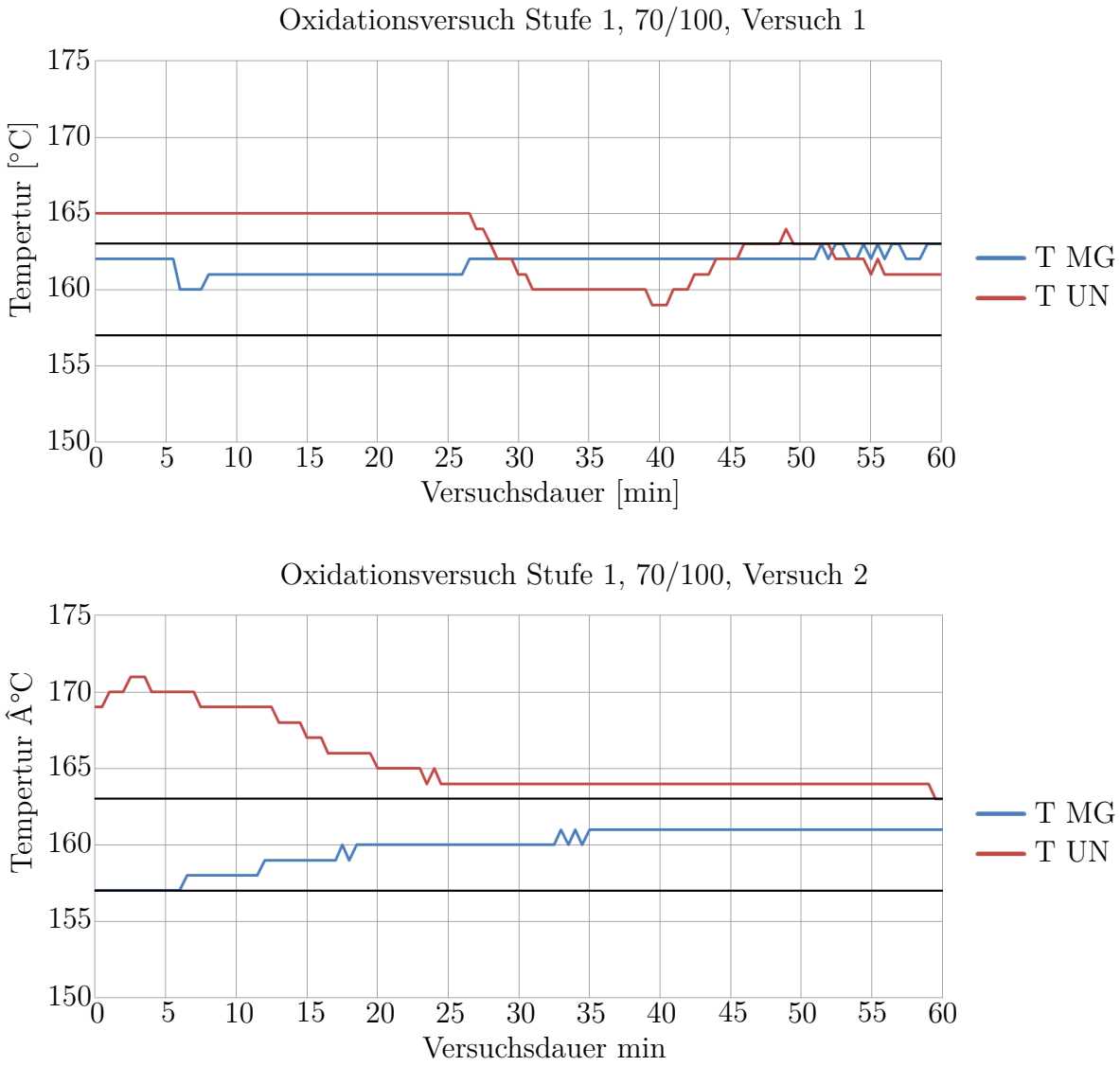


Abbildung A.5.: Abkühlverläufe Oxidationsversuche Bitumen 70/100, Stufe 1, Versuch 1 und 2

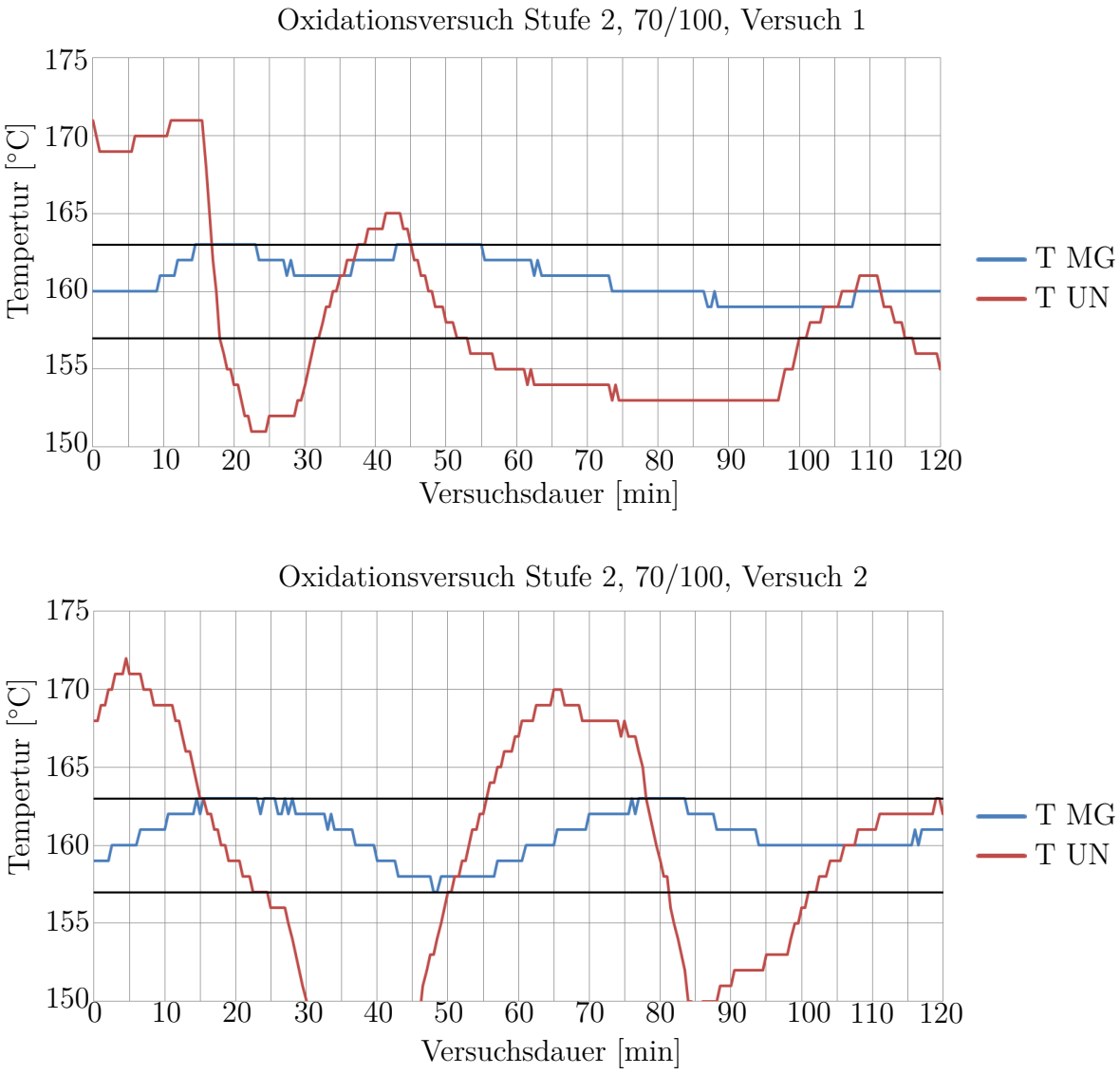


Abbildung A.6.: Abkühlverläufe Oxidationsversuche Bitumen 70/100, Stufe 2, Versuch 1 und 2

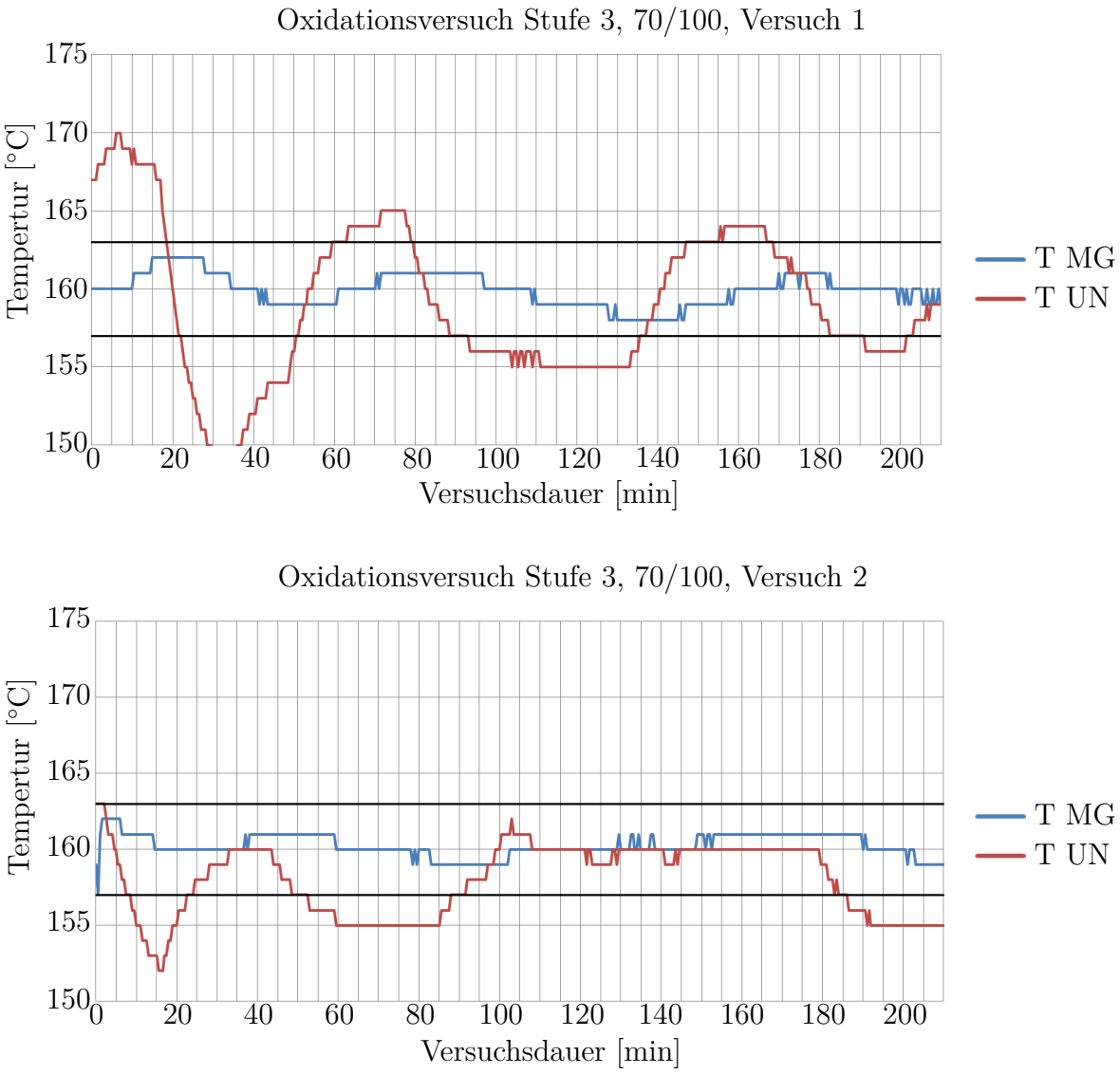


Abbildung A.7.: Abkühlverläufe Oxidationsversuche Bitumen 70/100, Stufe 3, Versuch 1 und 2

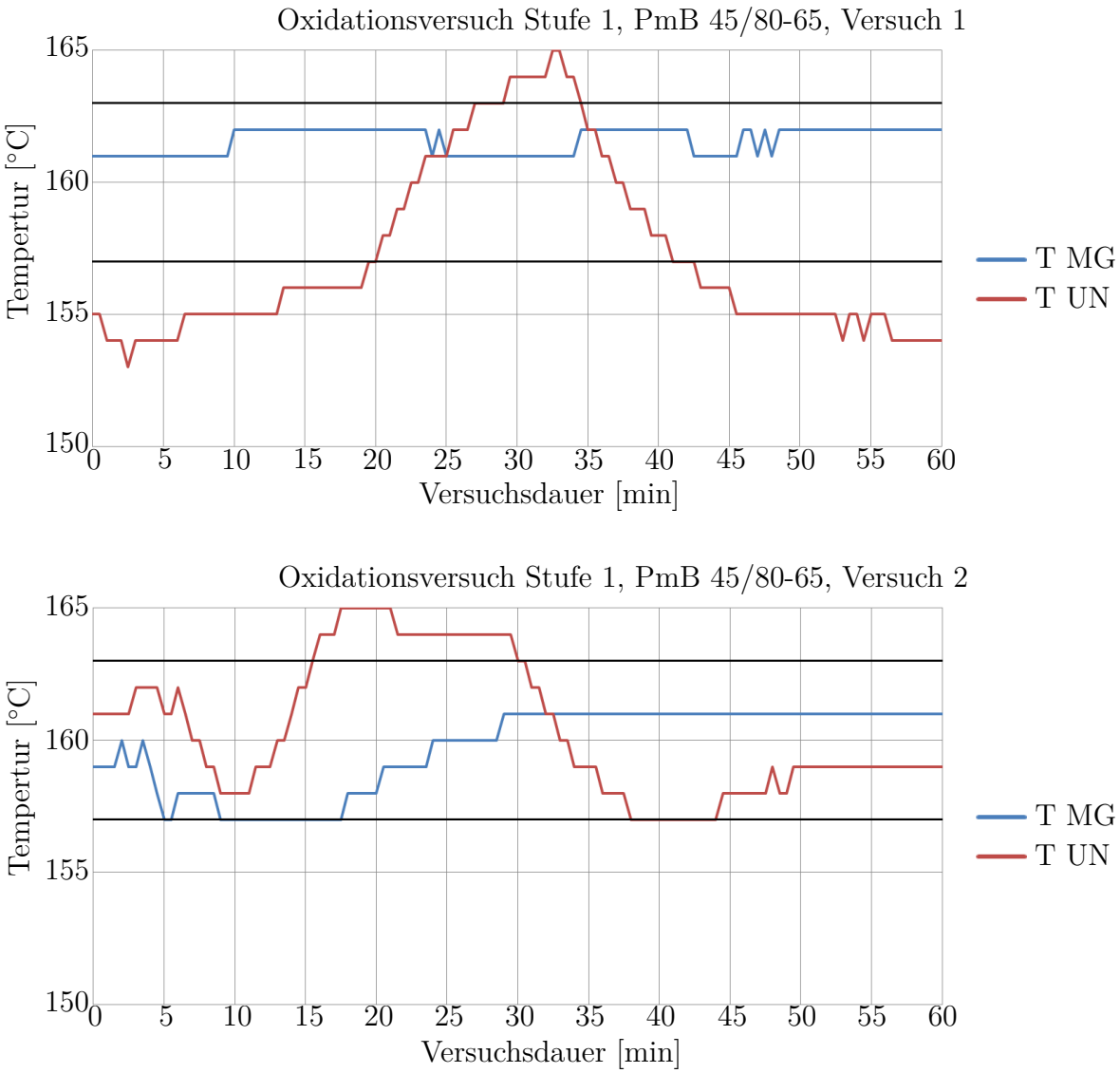


Abbildung A.8.: Abkühlverläufe Oxidationsversuche PmB 45/80-65, Stufe 1, Versuch 1 und 2

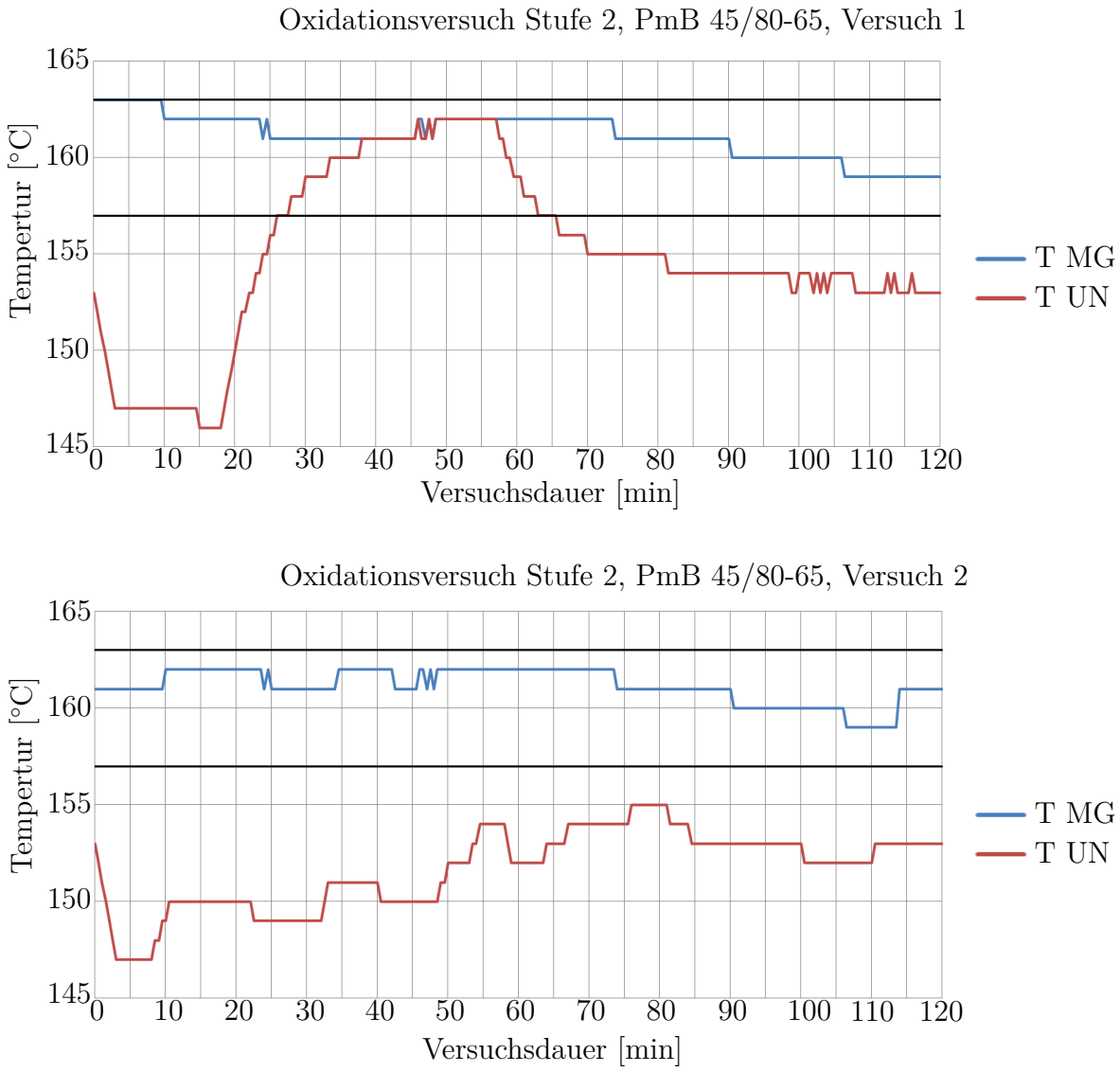


Abbildung A.9.: Abkühlverläufe Oxidationsversuche PmB 45/80-65, Stufe 2, Versuch 1 und 2

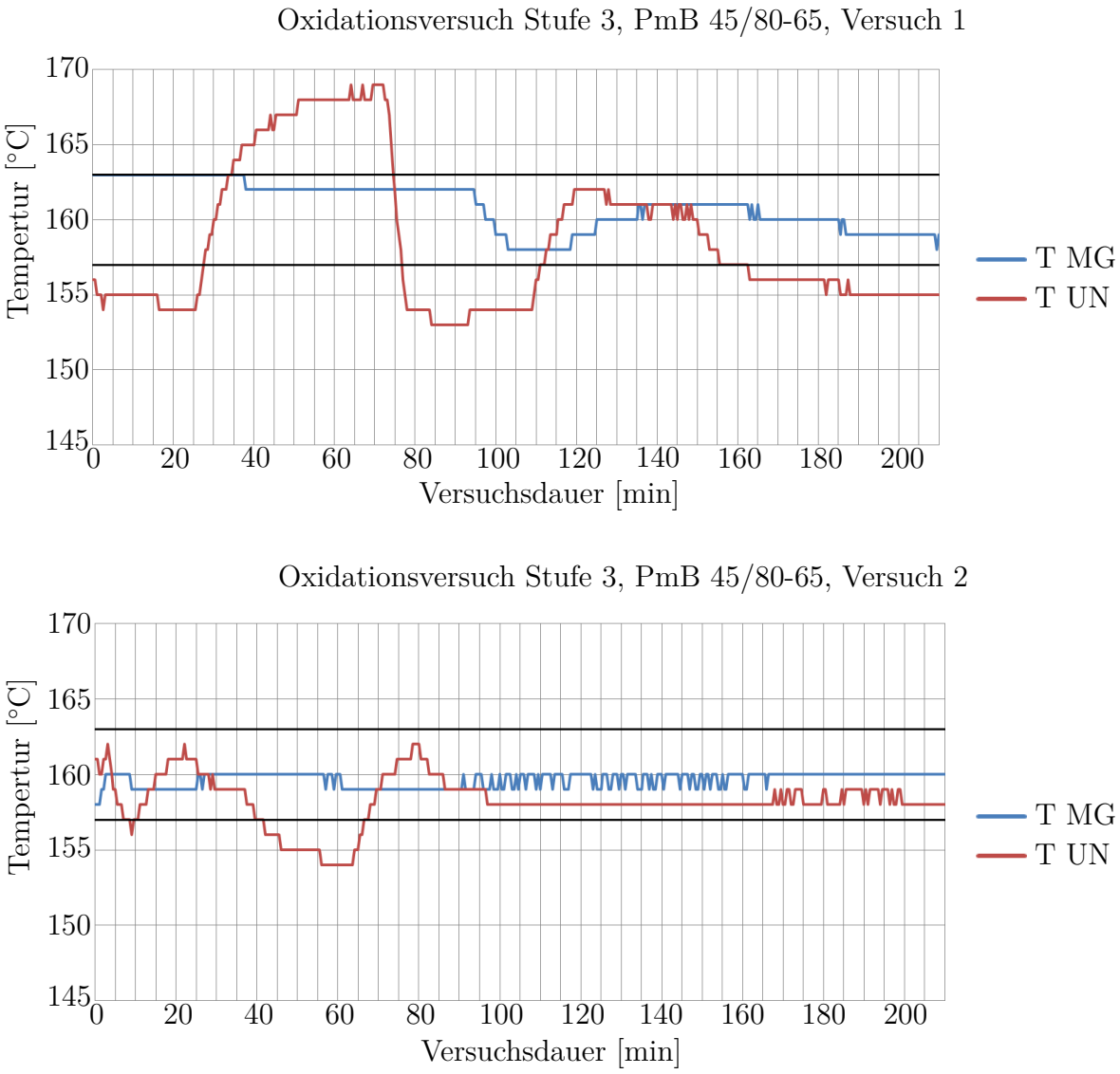


Abbildung A.10.: Abkühlverläufe Oxidationsversuche PmB 45/80-65, Stufe 3, Versuch 1 und 2

A.4. DSR Messdaten - B533

B533A			
Temp. [°C]	Freq. [Hz]	|G*| [Pa]	δ [°]
-10	0,1	57 019 000	27,3
0	0,1	14 236 500	40,9
10	0,1	2 527 050	54,4
20	0,1	378 400	62,7
30	0,1	68 166	63,6
40	0,1	18 116	61,8
-10	1	100 995 000	22
0	1	33 353 500	33,4
10	1	8 171 850	45,5
20	1	1 596 950	56,4
30	1	297 125	62,5
40	1	71 392	63
-10	1,59	113 765 000	20,8
0	1,59	39 833 500	32
10	1,59	10 389 500	44
20	1,59	2 151 750	55,2
30	1,59	415 265	62,2
40	1,59	99 382	63,7
-10	10	173 353 333	17
0	10	74 760 000	27,1
10	10	24 672 889	38,5
20	10	6 415 089	50,2
30	10	1 457 822	60
40	10	354 331	65,2

B533B_LRTF			
Temp. [°C]	Freq. [Hz]	|G*| [Pa]	δ [°]
-10	0,1	63 149 000	25,6
0	0,1	17 457 000	37,4
10	0,1	3 579 200	49,3
20	0,1	616 005	58,1
30	0,1	113 135	61,6
40	0,1	27 787	61,8
-10	1	108 570 000	21
0	1	38 073 500	31,3
10	1	10 265 500	41,8
20	1	2 252 150	51,8
30	1	460 925	58,6
40	1	110 510	61,2
-10	1,59	121 890 000	19,9
0	1,59	45 094 500	30
10	1,59	12 803 000	40,6
20	1,59	2 965 400	50,8
30	1,59	629 935	58,2
40	1,59	155 035	61,5
-10	10	183 146 667	16,4
0	10	82 248 889	25,7
10	10	28 592 222	36,1
20	10	8 218 644	46,5
30	10	2 027 600	55,5
40	10	539 100	61,9

B534A			
Temp. [°C]	Freq. [Hz]	|G*| [Pa]	δ [°]
-10	0,1	54 365 500	28
0	0,1	13 461 500	41,8
10	0,1	2 372 600	55,2
20	0,1	354 195	63,1
30	0,1	62 866	63,5
40	0,1	16 366	62,4
-10	1	96 015 500	22,5
0	1	31 580 000	34
10	1	7 695 850	46,2
20	1	1 500 350	57
30	1	273 870	62,7
40	1	63 743	63
-10	1,59	108 620 000	21,3
0	1,59	37 781 500	32,6
10	1,59	9 814 000	44,6
20	1,59	2 030 050	55,9
30	1,59	383 825	62,5
40	1,59	87 905	63,7
-10	10	167 071 111	17,4
0	10	71 598 000	27,6
10	10	23 562 667	39,2
20	10	6 119 200	50,9
30	10	1 343 778	60,5
40	10	324 596	65,7

B533B_F_V1			
Temp. [°C]	Freq. [Hz]	|G*| [Pa]	δ [°]
-10	0,1	48 841 500	30,1
0	0,1	14 862 500	40,7
10	0,1	3 102 600	51,9
20	0,1	501 435	59,3
30	0,1	87 128	61,1
40	0,1	20 377	60,4
-10	1	92 599 500	24,1
0	1	34 112 500	33,7
10	1	9 066 400	44,4
20	1	1 817 700	54,2
30	1	346 445	59,8
40	1	79 564	61,2
-10	1,59	105 870 000	22,8
0	1,59	40 462 500	32,4
10	1,59	11 541 000	43
20	1,59	2 406 150	53,1
30	1,59	469 410	59,6
40	1,59	109 895	61,7
-10	10	168 831 111	18,5
0	10	77 036 000	27,6
10	10	26 246 154	38,5
20	10	6 713 978	49,7
30	10	1 567 200	57,7
40	10	385 067	63,2

B533B_F_V2			
Temp. [°C]	Freq. [Hz]	|G*| [Pa]	δ [°]
-10	0,1	49 042 500	29,6
0	0,1	16 058 000	39,6
10	0,1	3 455 000	50,9
20	0,1	574 130	58,8
30	0,1	97 830	61,2
40	0,1	21 912	60,6
-10	1	92 557 000	23,6
0	1	35 806 000	32,8
10	1	9 813 550	43,3
20	1	2 042 550	53,2
30	1	388 170	59,3
40	1	86 261	61,1
-10	1,59	105 920 000	22,2
0	1,59	42 680 000	31,4
10	1,59	12 414 000	41,9
20	1,59	2 716 150	52
30	1,59	526 375	59
40	1,59	119 985	61,6
-10	10	166 455 556	18,1
0	10	78 882 667	26,8
10	10	27 515 778	37,5
20	10	7 311 044	48,6
30	10	1 716 200	57
40	10	415 331	62,6

Abbildung A.11.: DSR-B533

B533B_F_V3			
Temp. [°C]	Freq. [Hz]	|G*| [Pa]	δ [°]
-10	0,1	57 903 500	27,5
0	0,1	18 313 500	37,6
10	0,1	4 207 650	48,5
20	0,1	751 110	56,6
30	0,1	134 830	60
40	0,1	30 622	60,4
-10	1	104 075 000	22,5
0	1	39 783 000	31,6
10	1	11 362 000	41,6
20	1	2 517 550	51,1
30	1	515 165	57,4
40	1	119 720	60,1
-10	1,59	117 925 000	21,3
0	1,59	47 099 000	30,4
10	1,59	14 027 000	40,2
20	1,59	3 346 750	49,9
30	1,59	692 780	57
40	1,59	163 460	60,5
-10	10	182 193 333	17,4
0	10	86 027 778	26,1
10	10	30 832 500	36,2
20	10	8 572 156	46,8
30	10	2 163 178	54,9
40	10	559 749	60,8

B533B_F_V4			
Temp. [°C]	Freq. [Hz]	|G*| [Pa]	δ [°]
-10	0,1	60 504 500	25,9
0	0,1	16 958 500	37,2
10	0,1	3 489 900	49,1
20	0,1	585 480	57,6
30	0,1	108 585	61,4
40	0,1	25 244	62,3
-10	1	103 945 000	21,5
0	1	36 877 500	31,4
10	1	9 914 950	41,9
20	1	2 143 550	51,9
30	1	443 615	58,7
40	1	102 925	61,2
-10	1,59	116 895 000	20,4
0	1,59	43 573 500	30,2
10	1,59	12 385 500	40,7
20	1,59	2 827 800	50,9
30	1,59	594 445	58,3
40	1,59	142 625	61,5
-10	10	176 973 333	16,8
0	10	79 516 889	26
10	10	27 538 444	36,3
20	10	7 797 267	46,8
30	10	1 891 244	55,9
40	10	482 162	61,5

B533B_F_V5			
Temp. [°C]	Freq. [Hz]	|G*| [Pa]	δ [°]
-10	0,1	66 598 500	24,6
0	0,1	19 952 000	35,2
10	0,1	4 480 650	46,4
20	0,1	800 975	55,6
30	0,1	151 445	60,2
40	0,1	34 835	62,2
-10	1	112 835 000	20,5
0	1	41 900 500	29,9
10	1	11 997 000	39,9
20	1	2 763 000	49,6
30	1	596 765	56,7
40	1	141 085	60,3
-10	1,59	126 560 000	19,5
0	1,59	49 203 000	28,8
10	1,59	14 825 500	38,7
20	1,59	3 597 150	48,6
30	1,59	800 020	56,2
40	1,59	195 395	60,3
-10	10	189 855 556	16,1
0	10	88 322 444	24,9
10	10	32 068 667	34,7
20	10	9 458 956	44,7
30	10	2 471 689	53,7
40	10	660 187	60,1

B533B_F_V6			
Temp. [°C]	Freq. [Hz]	|G*| [Pa]	δ [°]
-10	0,1	66 073 500	24,6
0	0,1	19 488 500	35,3
10	0,1	4 308 000	46,5
20	0,1	789 095	55,5
30	0,1	144 805	60
40	0,1	34 408	61,5
-10	1	111 965 000	20,6
0	1	40 876 000	30
10	1	11 546 000	40
20	1	2 692 750	49,6
30	1	561 305	56,7
40	1	136 070	60,1
-10	1,59	125 455 000	19,6
0	1,59	47 965 000	28,9
10	1,59	14 276 500	38,8
20	1,59	3 495 650	48,6
30	1,59	762 320	56,2
40	1,59	188 385	60,2
-10	10	186 991 111	16,2
0	10	85 889 333	25
10	10	30 809 778	34,8
20	10	9 192 556	44,7
30	10	2 333 467	53,6
40	10	635 891	60,2

Abbildung A.12.: DSR-B533

B533A			
Temp. [°C]	Freq. [Hz]	|G*| [Pa]	δ [°]
30	0,1	46 848	61,7
40	0,1	13 875	60,3
50	0,1	3 823	60,7
60	0,1	1 250	60,3
70	0,1	504	56,7
80	0,1	257	52,1
30	1	201 570	60,1
40	1	54 343	60,9
50	1	15 102	60,1
60	1	5 137	61,2
70	1	2 003	62,6
80	1	900	60,4
30	1,59	284 345	59,3
40	1,59	74 355	61,5
50	1,59	21 748	60,7
60	1,59	7 860	61,5
70	1,59	2 876	63,1
80	1,59	1 161	61,8
30	10	1 048 533	51,6
40	10	276 989	61,9
50	10	72 890	63,8
60	10	24 858	63,4
70	10	10 058	64,1
80	10	4 519	64,8

B533B_LRTF			
Temp. [°C]	Freq. [Hz]	|G*| [Pa]	δ [°]
30	0,1	58 252	60,2
40	0,1	23 766	60,5
50	0,1	5 815	60
60	0,1	2 002	60,3
70	0,1	771	60,6
80	0,1	335	60,8
30	1	223 320	56
40	1	91 879	59,9
50	1	23 096	59,9
60	1	7 914	59,8
70	1	3 093	60,5
80	1	1344	61
30	1,59	325 030	54,5
40	1,59	126 795	59,9
50	1,59	32 806	60,5
60	1,59	11 582	60,3
70	1,59	4 597	60,9
80	1,59	2 118	61,7
30	10	1 108 089	43,7
40	10	464 093	57,5
50	10	113 898	62,2
60	10	37 849	62,9
70	10	14 698	62,8
80	10	6 446	63,2

B534A			
Temp. [°C]	Freq. [Hz]	|G*| [Pa]	δ [°]
30	0,1	50 951	61,3
40	0,1	13 209	58,9
50	0,1	4 287	56,4
60	0,1	1 578	51,5
70	0,1	683	45,1
80	0,1	344	43,6
30	1	218 215	59,6
40	1	51 389	60,5
50	1	16 110	59,2
60	1	5 652	59,4
70	1	2 238	59,6
80	1	1035	57,1
30	1,59	304 525	58,8
40	1,59	70 339	61,2
50	1,59	22 938	60,2
60	1,59	8 102	60,2
70	1,59	2 922	60,9
80	1,59	1 367	59,2
30	10	1 027 089	50,1
40	10	252 993	61,3
50	10	79 424	63,6
60	10	27 048	63,1
70	10	10 965	63,3
80	10	4 977	63,6

B533B_F_V1			
Temp. [°C]	Freq. [Hz]	|G*| [Pa]	δ [°]
30	0,1	65 015	59,8
40	0,1	13 798	59,3
50	0,1	4 978	58,5
60	0,1	1 774	57,4
70	0,1	718	55,9
80	0,1	340	55,1
30	1	261 310	56,7
40	1	63 396	59,5
50	1	18 536	59,3
60	1	6 763	59,3
70	1	2 707	59,6
80	1	1220	59
30	1,59	352 910	55,7
40	1,59	90 939	59,7
50	1,59	25 787	60
60	1,59	9 107	59,8
70	1,59	3 708	60,2
80	1,59	1 763	60
30	10	1 198 978	46,8
40	10	338 233	58,7
50	10	88 680	62,3
60	10	31 931	62,6
70	10	12 755	62,6
80	10	5 726	62,6

B533B_F_V2			
Temp. [°C]	Freq. [Hz]	|G*| [Pa]	δ [°]
30	0,1	81 067	60,2
40	0,1	19 285	60
50	0,1	5 682	59,5
60	0,1	1 888	59,6
70	0,1	733	59,4
80	0,1	325	58,9
30	1	322 770	55,8
40	1	76 192	59,5
50	1	21 963	59,6
60	1	7 400	59,6
70	1	2 886	60,3
80	1	1258	60,6
30	1,59	440 290	54,5
40	1,59	108 440	59,7
50	1,59	31 491	60,2
60	1,59	10 171	60,1
70	1,59	3 986	60,7
80	1,59	1 340	61,1
30	10	1 406 711	44,4
40	10	390 184	57,7
50	10	106 547	62,2
60	10	35 245	62,8
70	10	13 684	62,7
80	10	6 026	63,1

Abbildung A.13.: DSR-B533

B533B_F_V3			
Temp. [°C]	Freq. [Hz]	|G*| [Pa]	δ [°]
30	0,1	98 393	59,5
40	0,1	25 079	59,7
50	0,1	7 140	60
60	0,1	2 322	61,7
70	0,1	842	63,6
80	0,1	340	65,5
30	1	388 905	53,8
40	1	99 108	58,7
50	1	28 125	59,4
60	1	9 297	59,7
70	1	3 543	60,9
80	1	1498	62,7
30	1,59	526 025	52,1
40	1,59	135 305	58,6
50	1,59	39 301	60
60	1,59	13 702	60,1
70	1,59	4 907	61
80	1,59	2 215	62,7
30	10	1 563 556	41,1
40	10	471 273	55,5
50	10	135 264	61,1
60	10	44 040	62,3
70	10	16 823	62,6
80	10	7 289	63,4

B533B_F_V4			
Temp. [°C]	Freq. [Hz]	|G*| [Pa]	δ [°]
30	0,1	36 273	61,5
40	0,1	20 625	59,8
50	0,1	5 935	59,3
60	0,1	1 991	59,4
70	0,1	769	59,3
80	0,1	339	59,6
30	1	229 710	55,2
40	1	89 607	59,2
50	1	23 275	59,5
60	1	7 757	59,5
70	1	3 025	60,1
80	1	1325	60,5
30	1,59	346 285	53,9
40	1,59	122 335	59,3
50	1,59	33 437	60,2
60	1,59	11 359	60,1
70	1,59	3 838	60,5
80	1,59	2 004	61,1
30	10	1 147 178	43,6
40	10	424 331	57,2
50	10	112 347	62
60	10	36 910	62,7
70	10	14 336	62,7
80	10	6 318	63

B533B_F_V5			
Temp. [°C]	Freq. [Hz]	|G*| [Pa]	δ [°]
30	0,1	118 520	57,6
40	0,1	28 729	58,7
50	0,1	8 344	59,4
60	0,1	2 588	61,5
70	0,1	915	63,7
80	0,1	357	66,1
30	1	442 755	51,7
40	1	116 025	57,4
50	1	32 220	59,2
60	1	10 349	59,9
70	1	3 843	61
80	1	1588	62,9
30	1,59	593 100	49,9
40	1,59	165 085	57,1
50	1,59	42 546	59,6
60	1,59	14 861	60,3
70	1,59	4 368	61,3
80	1,59	2 247	62,9
30	10	1 707 156	38,6
40	10	585 753	53,8
50	10	154 093	60,4
60	10	49 631	62,3
70	10	18 510	63
80	10	7 823	63,8

B533B_F_V6			
Temp. [°C]	Freq. [Hz]	|G*| [Pa]	δ [°]
30	0,1	112 010	57,5
40	0,1	27 374	58,3
50	0,1	7 201	59,1
60	0,1	2 381	60,6
70	0,1	867	62,4
80	0,1	352	64,5
30	1	424 430	52,5
40	1	103 885	57,4
50	1	28 048	58,9
60	1	9 440	59,8
70	1	3 564	60,8
80	1	1508	62,2
30	1,59	574 940	50,9
40	1,59	141 275	57,3
50	1,59	33 785	59,4
60	1,59	14 372	60,2
70	1,59	5 346	61,1
80	1,59	2 110	62,4
30	10	1 752 511	40,5
40	10	490 038	54,6
50	10	131 891	60,4
60	10	45 111	62,3
70	10	17 135	63
80	10	7 352	63,8

Abbildung A.14.: DSR-B533

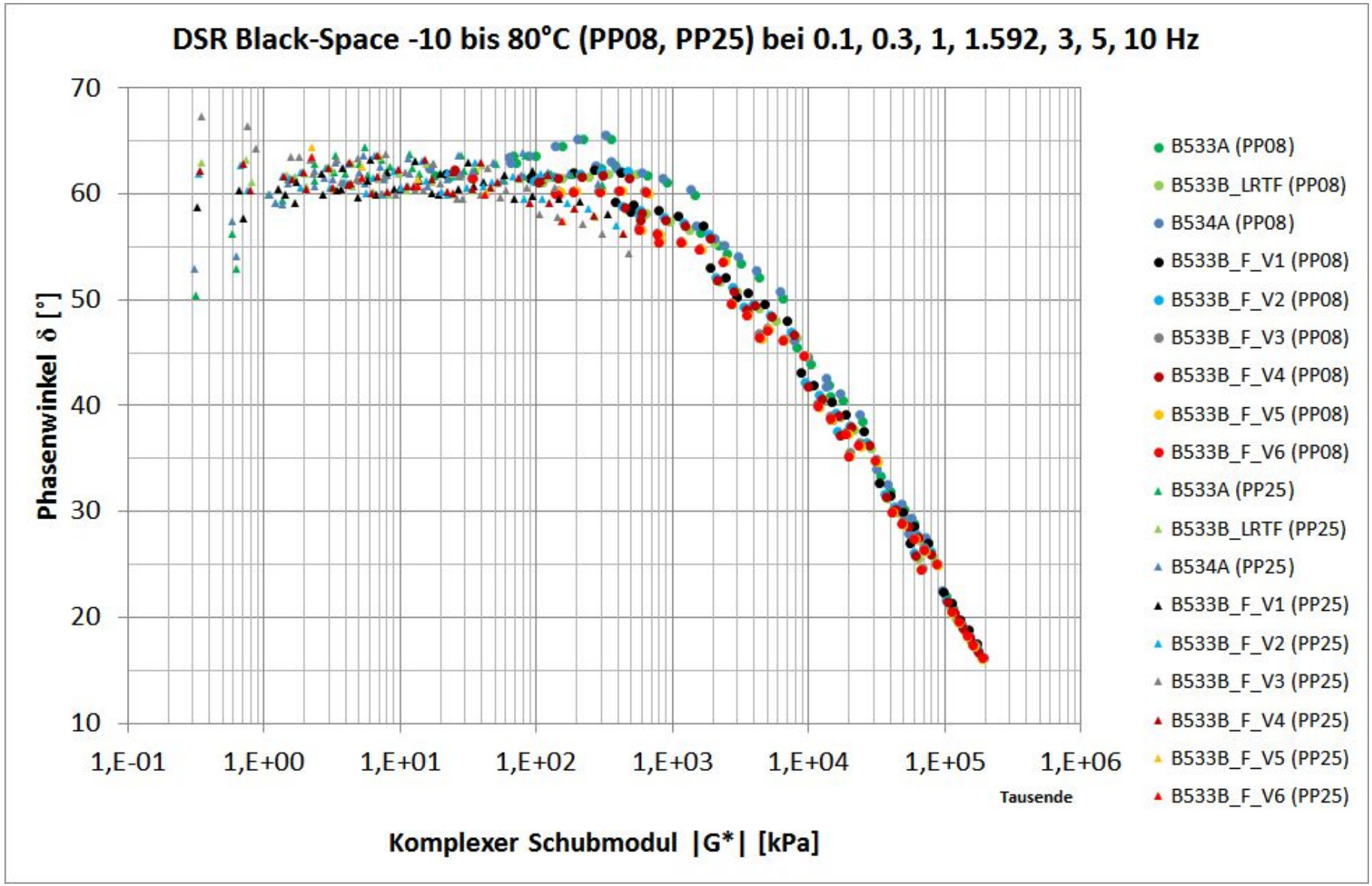


Abbildung A.15.: DSR Black-Space Diagramm, B533, -10°C bis 80°C (PP08, PP25) bei 0.1, 0.3, 1, 1.592, 3, 5, 10 Hz

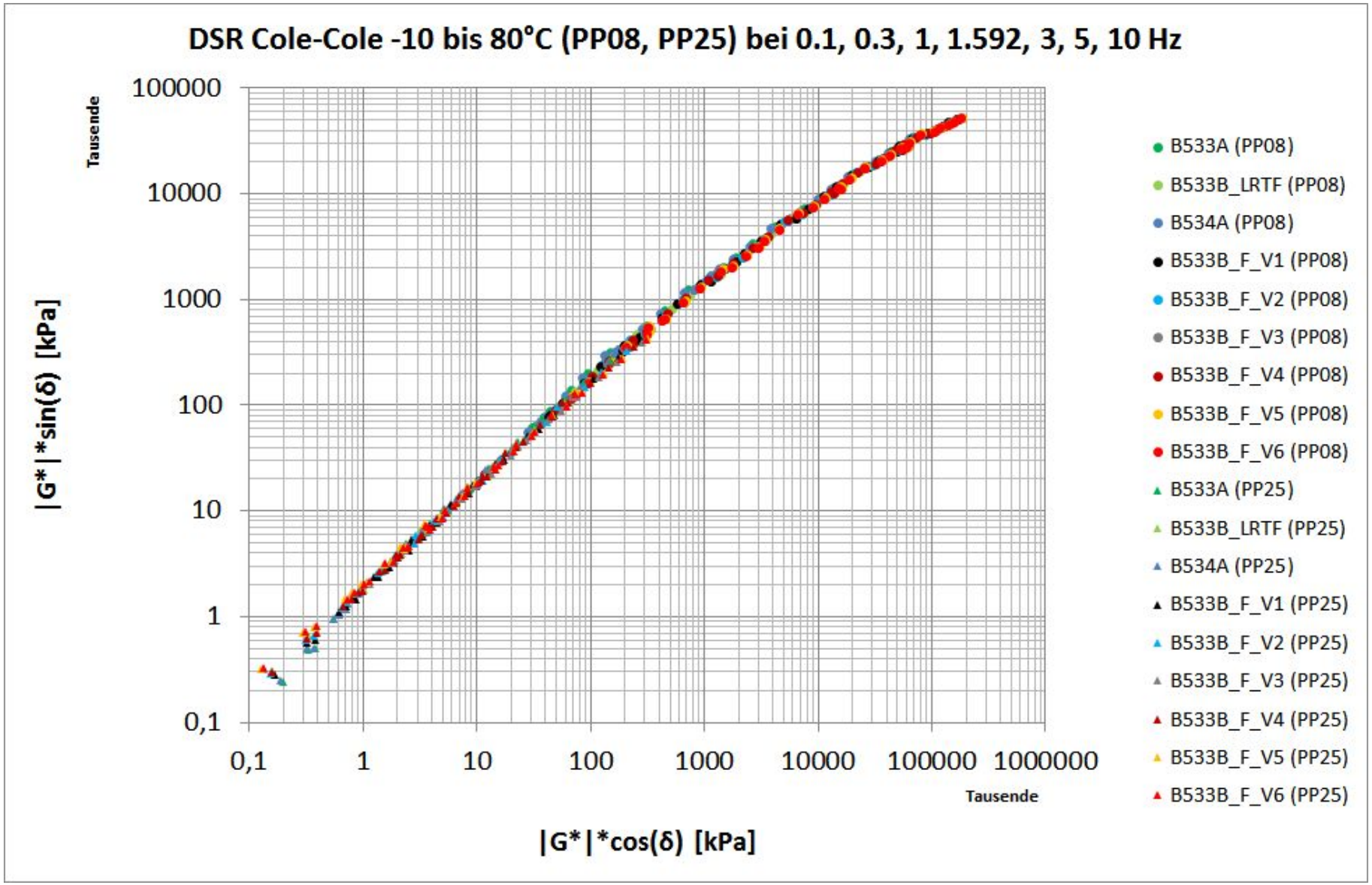


Abbildung A.16.: DSR Cole-Cole Diagramm, B533, -10°C bis 80°C (PP08, PP25) bei 0.1, 0.3, 1, 1.592, 3, 5, 10 Hz

A.5. Gesteinskörnung - Datenblätter

Anerkannt nach RAP Stra für Böden einschl. Bodenverbesserungen (A1, A3, A4), Gesteinskörnungen (D0³, D3, D4), Asphalt (G3-G4), hydr. geb. Gemische einschl. Bödenverfestigung (H1, H3, H4) und Gemische für Schichten ohne Bindemittel (I1-I4)

GfB BAUSTOFFPRÜFSTELLE
ERFT-LABOR GMBH

Erft-Labor · Vom-Stein-Str. 20 · 53879 Euskirchen
info@erft-labor.de
www.erft-labor.de

Mineral Baustoff GmbH
Unter der Hardt 16

59846 Sundern-Westenfeld

Vom-Stein-Straße 20
53879 Euskirchen
Tel. 0 22 51 - 1 28 39-00
Fax 0 22 51 - 1 28 39-29
NL Aachen: Salierallee 30
52066 Aachen
Tel. 02 41 - 1 57 01 56
Fax. 02 41 - 1 57 01 58

Labor- und Feldversuche
Asphalt · Beton · AKR · Boden · Deponie
Mineralstoffe · Recycling · Bohrungen
Sondierungen · Probenahme Wasser, Boden, Luft
Ingenieurgeologie und Hydrologie
Gründungsberatung · bautechnische Beratung, asphalt- und betontechnologische Gutachen · Lagerstättenbewerrung · Gefährdungsabschätzung

Prüfungszeugnis

Nr.: 570A-12-6 Datum 28. Jan. 2013

I Angaben des Auftragschreibens

Auftraggeber: **Siehe Anschriftenfeld**

Prüfungsanlass: **Produktprüfung 2/2012 nach EN 13043 in Verbindung mit TL Gestein-StB gleichzeitig Wiederholung der Zweijahresprüfung**

Prüfungsobjekt: **Einzelkörnungen / Gesteinskörnungen aus Kalkstein**

Lieferwerk: **Sundern Westenfeld**

Prüfungs-Nr.	Art der Probe	Körnung mm	Bez. der Probe	Probenahme am	Probeneingang am	Entnahmestelle
570A-12-6	Gesteinskörnung Gesteinskörnung Gesteinskörnung Gesteinskörnung Gesteinskörnung Gesteinskörnung Gesteinskörnung Gesteinskörnung Gesteinskörnung	0/2 2/5 2/8 5/8 8/11 8/16 11/16 16/22 22/32		09. Okt. 2012	10. Okt. 2012	Verladung

Dieses Prüfungszeugnis umfasst 13 Seiten und 1 Anlage.

Dieses Prüfungszeugnis darf nur ungekürzt vervielfältigt werden; auszugsweise Wiedergabe und jede Veröffentlichung bedarf unserer Zustimmung.

II Gliederung

I	Angaben des Auftragschreibens	1
II	Gliederung	2
III	Vorbemerkungen	3
III.1	Probenahme	3
III.2	Prüfumfang und Prüfergebnisse	3
IV	Untersuchungsergebnisse	4
IV.1	Beschreibung der Lagerstätte	4
IV.2	Beschreibung der Aufbereitung	5
IV.3	Werkseigene Produktionskontrolle (WPK)	6
IV.4	Bestimmung der geometrischen Anforderungen	7
IV.4.1	Bestimmung der Korngrößenverteilung, Kornform und Bruchflächigkeit	7
	(EN 933-1, EN 933-4 und EN 933-5; EN 13043:2002-09, Abs. 4.1.3, 4.1.6 und 4.1.7)	7
IV.4.2	Bestimmung der Reinheit und Feinanteile der Körnungen und Korngemische	8
	(EN 933-1 und EN 1744-1; EN 13043:2002-09, Abs. 4.1.4 und 4.3.3)	8
IV.4.3	Röntgendiffraktometrische Untersuchungen	8
	(EN 933-9 Anlehnung; EN 13043:2002-09, Abs. 4.1.5)	8
IV.4.4	Bestimmung des Methylenblau-Wertes	8
	(EN 933-9; EN 13043:2002-09, Abs. 4.1.5)	8
IV.4.5	Bestimmung des Fließkoeffizienten	9
	(EN 933-6; EN 13043:2002-09, Abs. 4.1.8)	9
IV.5	Bestimmung der physikalischen Anforderungen	9
IV.5.1	Bestimmung der Schlagzertrümmerung	9
	(EN 1097-2, Abs. 6; EN 13043:2002-09, Abs. 4.2.2)	9
IV.5.2	Bestimmung der Rohdichte und Wasseraufnahme an Gesteinskörnungen	9
	(EN 1097-6; EN 13043:2002-09, Abs. 4.2.7)	9
IV.6	Bestimmung der Dauerhaftigkeit	10
IV.6.1	Bestimmung des Frost-Tau-Widerstandes	10
	(EN 1367-1; EN 13043:2002-09, Abs. 4.2.9.2)	10
IV.6.2	Bestimmung des Widerstandes gegen Zertrümmerung	10
	nach Durchführung der Bestimmung des Frostwiderstandes	10
	(EN 1367-1 und EN 1097-2, Abs. 6; EN 13043:2002-09, Abs. 4.2.2)	10
IV.6.3	Bestimmung des Widerstandes gegen Hitzebeanspruchung	10
	(EN 1367-5 und EN 1097-2, Abs. 6; EN 13043:2002-09, Abs. 4.2.10)	10
IV.6.4	Bestimmung des Widerstandes gegen Zertrümmerung nach Hitzebeanspruchung	11
	(EN 1097-2, Abs. 6; EN 13043:2002-09, Abs. 4.2.2)	11
IV.6.5	Prüfung von Mischgut auf Verhalten bei Lagerung in Wasser	11
	(DIN 1996, Teil 10; TL Min-StB 2000, Abs. A-3.2.5)	11
IV.6.6	Bestimmung der Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen	11
	(EN 12697-11; EN 13043:2002-09, Abs. 4.2.11)	11
IV.7	Bestimmung der chemischen Anforderungen	12
IV.7.1	Bestimmung der groben organischen Bestandteile	12
	(EN 1744-1:2009, Abs. 14.2; EN 13043:2002-09, Abs. 4.3.3)	12
V	Zusammenfassung und Beurteilung	12

III Vorbemerkungen

III.1 Probenahme

In Gegenwart von Herrn Tobes und Herrn Fahrenholz als Vertreter des Unternehmens wurden durch Herrn Dr. Straßer und Herrn Dinkgraeve folgende Durchschnittsproben nach EN 932-1 entnommen:

Erfassung zur Zeit der Beprobung:	Probenahme am 09. Okt. 2012								
Entnahmestelle:	Vorratshalde/Freilager/Verladung								
Materialproben:	rd.	20	kg	feine Gesteinskörnung	0	/	2	G_F85 (EN 13043/TL Gestein-StB)
	rd.	20	kg	grobe Gesteinskörnung	2	/	5	$G_C90/10$ (EN 13043/TL Gestein-StB)
	rd.	20	kg	Grobe Gesteinskörnung	2	/	8	$G_C85/20$ (EN 13043/TL Gestein-StB)
	rd.	20	kg	grobe Gesteinskörnung	5	/	8	$G_C90/15$ (EN 13043/TL Gestein-StB)
	rd.	60	kg	grobe Gesteinskörnung	8	/	11	$G_C90/15$ (EN 13043/TL Gestein-StB)
	rd.	20	kg	grobe Gesteinskörnung	8	/	16	$G_C85/20$ (EN 13043/TL Gestein-StB)
	rd.	60	kg	grobe Gesteinskörnung	11	/	16	$G_C90/15$ (EN 13043/TL Gestein-StB)
	rd.	40	kg	grobe Gesteinskörnung	16	/	22	$G_C90/15$ (EN 13043/TL Gestein-StB)
	rd.	40	kg	grobe Gesteinskörnung	22	/	32	$G_C90/20$ (EN 13043/TL Gestein-StB)
Verpackungsart:	getrennte Transportbehälter (Plastiksäcke)								
Kennzeichnung:	Einlegezettel								

III.2 Prüfumfang und Prüfergebnisse

Die Untersuchungen wurden durchgeführt nach EN 13043:2002-09 und TL Gestein-StB in dem dort vorgeschriebenen Umfang nach den in den TP Gestein-StB aufgeführten Vorschriften und Richtlinien, DIN/EN-Normen und Merkblättern, in der jeweils neuesten Fassung.

IV Untersuchungsergebnisse

IV.1 Beschreibung der Lagerstätte

Die Firma Mineral Baustoff GmbH, Westenfeld gewinnt Kalkstein in einem Gesteinshorizont, der am südlichen Ortsausgang der Ortschaft Westenfeld liegt. Das Abbaufeld erstreckt sich unterhalb des nördlichen Ausläufers der Höhe Kahlenberg von Nordost nach Südwest.
Abbau und Aufbereitung liegen rechts an der Straße, die von Sundern über Westenfeld nach Altenhellefeld/Berge führt.

Das Kalksteinvorkommen ist im Bereich von zwei Abbaufeldern erschlossen, die im gleichen Gesteinshorizont direkt neben einander liegen. Das nördlich gelegene bisherige Abbaugelände war auf drei Hauptfördersohlen aufgeschlossen und wurde mit Abbauhöhen von rund 25 m und Abbaubreiten von bis zu 120 m im Wesentlichen mit südwestlichen bis westlich teils auch nordöstlichen Vortriebsrichtungen abgebaut.
Von diesem Aufschluss aus wird der unmittelbar südlich gelegene Lagerstättenabschnitt aufgefahren und zurzeit im Bereich einer Fördersohle vorgetrieben. Daneben wird unabhängig von dem Anschlussanschluss an das alte Abbaufeld der Gesteinshorizont auch direkt im separaten Förderbereich oberhalb des Feldes ebenfalls auf einer Abbausohle aufgefahren.

Das Kalksteinvorkommen wird geologisch dem Hellefelder Kalk innerhalb der Schichten des Unterkarbon zugeordnet und erstreckt sich stratigraphisch im Bereich des Westflügels des Ebbe-Hauptsattels.

Die Überlagerungsschichten des Kalksteinvorkommens bestehen in beiden Abbaufeldern neben Verwitterungsprodukten des anstehenden Gesteins aus steinigem Lehm und Wiesenboden, teilweise auch Waldboden. Während im alten Abbauteil die Überlagerungsschichten im Wesentlichen bis zur Feldesgrenze vorgetrieben sind, stehen diese Schichten im Bereich des Neuaufschlusses noch in voller Mächtigkeit an.
Diese Überdeckungen sind in je nach Morphologie der Geländeroberfläche wechselnder, teils auch erheblicher Mächtigkeit ausgebildet und werden im Bereich des Vortriebs durch getrennten Abbau als Abraum ausgesetzt.

Der Bereich der oberen Fördersohlen des Neuaufschlusses wird durch unterschiedliche, meist tiefgründige Verunreinigungen, Klüftungen und Schlote gekennzeichnet. Diese Zonen sind im Wesentlichen tiefgründig mit Lehm und/oder Verwitterungsprodukten angefüllt.
In allen Abbaubereichen mit besonderer Verunreinigung wird deshalb auf den einzelnen Fördersohlen selektiv abgebaut.

Der Hellefelder Kalkstein ist in seinen einzelnen Lagen dünn-, mittel- bis dickbankig ausgebildet, bei wechselnder kurz- bis mittelständiger Klüftung und teilweise deutlicher erkennbarer Schichtung.
Die Kalksteinfolgen fallen im vorwiegend unter 70° Nordwest ein und streichen in südwest-nordöstlicher Richtung.
Bankungs- und Kluftflächen sind teilweise und unterschiedlich die mit Lehm belegt.

Das Kalksteinmaterial des Hellefelder Kalk aus dem Unterkarbon zeigt eine fein-, mittel- bis grobkörnige Struktur, bei insgesamt regel- und gleichmäßigen Texturbedingungen. Die Farbe wechselt von grau bis dunkelgrau, teilweise auch schwarzgrau, gelegentlich, besonders auf Kluftflächen werden auch bräunlich Farbtöne beobachtet. Wechselnd und sehr unterschiedlich wird das Gesteinsvorkommen von Kalkspatadern durchzogen.
Neben Calcit als Hauptmineral liegen im Wesentlichen Dolomit, Quarz und Illit vor. Auf Bankungs- und Kluftflächen zeigen sich unterschiedliche graubraune bis graugelbe Verfärbungen (Oxydationsbereiche).

Im Bereich des Abbaues der geschlossenen Kalksteinschichten sind Verwitterungserscheinungen nicht erkennbar.
In den Zonen vorstehend beschriebener Verunreinigungen wird auf den einzelnen Fördersohlen selektiv abgebaut.

IV.2 Beschreibung der Aufbereitung

Das durch Großbohrlochsprengung gewonnene Haufwerk fällt mittelstückig, gelegentlich auch etwas grobstückig an und wird über folgende Stufen aufbereitet:

- Vorabsiebung verunreinigter Partien mit je nach Verunreinigungsgrad des Haufwerkes steuerbarem Endkorndurchmesser der Vorabsiebung
- Auslagerung der Vorabsiebung auf Freihalde
- Zuführung des vor gereinigten Materials zur Aufbereitung
- Vorzerkleinerung über Prallmühle
- Klassierung des Austragsgutes der Vorzerkleinerung wahlweise in Baustoffgemische 0/32 bzw. 0/45 und > 32/45 mm
- Möglichkeit der Auslagerung der Baustoffgemische auf getrennten Freihalden mit entsprechender Kennzeichnung
- Zweistufige Nachzerkleinerung des Vorbrecheraustragsgutes > 32/45 mm über Prallmühle

- ❖ Klassierung des Austragsgutes der Nachzerkleinerung in feine und grobe Gesteinskörnungen („Edelbrechsand-, Edelsplitt- Splitt- und Schotterkörnungen")
- ❖ Lagerung der Einzelkörnungen in Siloanlagen
- ❖ Rückführung von Wahlkörnungen in die Nachzerkleinerung mit Zuführung zur Zentralklassierung

Ausreichende Aufbereitungs-, Klassier-, Lager-, Dosier- und Verladeeinrichtungen sind vorhanden.

IV.3 Werkseigene Produktionskontrolle (WPK)

Ein zentrales Werkslaboratorium mit Laborpersonal und Geräteausstattung zur Durchführung der Produktprüfungen im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle nach EN 13043:2002-09 in Verbindung mit TL Gestein-StB ist vorhanden.

Die Prüfungen im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle und die werkseigene Produktionskontrolle werden entsprechend EN 13043:2002-09 in Verbindung mit den TL Gestein-StB regelmäßig durchgeführt.

IV.4 Bestimmung der geometrischen Anforderungen

IV.4.1 Bestimmung der Korngrößenverteilung, Kornform und Bruchflächigkeit (EN 933-1, EN 933-4 und EN 933-5; EN 13043:2002-09, Abs. 4.1.3, 4.1.6 und 4.1.7)

Gesteinskörnungen									
Soll-Körnung (Werksbezeichnung)	0/2	2/5	2/8	5/8	8/11	8/16	11/16	16/22	22/32
Prüfsiebe (mm)	Siebdurchgang (M.-%)								
45,0	-	-	-	-	-	-	-	-	100
31,5	-	-	-	-	-	-	-	100	90,3
22,4	-	-	-	-	-	100	100	90,7	5,4
16,0	-	-	-	-	100	98,0	93,8	11,4	0,7
11,2	-	-	100	100	91,0	49,2	15,0	0,7	0,6
8,0	-	100	93,9	99,0	7,0	6,9	1,1	0,6	-
5,6	-	94,6	50,1	6,7	0,8	1,4	0,8	-	-
4,0	100	66,2	28,0	0,9	0,7	1,3	-	-	-
2,8	99,7	39,3	16,7	0,7	-	-	-	-	-
2,0	97,8	7,4	5,1	-	-	-	-	-	-
1,0	69,5	0,8	2,0	-	-	-	-	-	-
0,5	55,8	-	-	-	-	-	-	-	-
0,25	39,2	-	-	-	-	-	-	-	-
0,125	25,8	-	-	-	-	-	-	-	-
0,063	18,3	0,6	1,0	0,6	0,6	0,9	0,6	0,5	0,5
Angaben zu Überkornanteilen									
Überkorn „2 D" (M.-%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Überkorn „1,4 D" (M.-%)	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0
Überkorn „D" (M.-%)	2,2	5,4	6,1	1,0	9,0	2,0	6,2	9,3	9,7
Angaben zu Unterkornanteilen									
Unterkorn „d" (M.-%)	-	7,4	5,1	6,7	7,0	6,9	15,0	11,4	5,4
Unterkorn „d/2" (M.-%)	-	0,8	2,0	0,7	0,7	1,3	0,8	0,6	0,6
Angaben zu Toleranzen für den Siebdurchgang bei Zwischensieben									
Zwischensieb (M.-%)	69,5	-	28,0	-	-	49,2	-	-	-
Bewertung									
Ist-Körnung Kategorie	**0/2 G_F85 $G_{TC}NR$**	**2/5 $G_C90/10$**	**2/8 $G_C85/20$**	**5/8 $G_C90/15$**	**8/11 $G_C90/15$**	**8/16 $G_C85/20$**	**11/16 $G_C90/15$**	**16/22 $G_C90/15$**	**22/32 $G_C90/20$**
Angaben zu Kornform und dem Anteil gebrochener Oberflächen an Gesteinskörnungen									
l:d > 3:1 (M.-%) **Kategorie**	-	-	6 SI_{20}	13 SI_{20}	8 SI_{20}	7 SI_{20}	6 SI_{20}	6 SI_{20}	5 SI_{20}
bruchflächig / ungebrochen **Kategorie**	$C_{100/0}$	$C_{100/0}$	$C_{100/0}$	$C_{100/0}$	$C_{100/0}$	$C_{100/0}$	$C_{100/0}$	$C_{100/0}$	$C_{100/0}$

IV.4.2 Bestimmung der Reinheit und Feinanteile der Körnungen und Korngemische (EN 933-1 und EN 1744-1; EN 13043:2002-09, Abs. 4.1.4 und 4.3.3)

Körnung Werks-bezeichnung	Bestimmung Fremdstoffe u. grobe Stoffe organischen Ursprungs	Bestimmung der feinen organischen Bestandteile (Färbung der Natronlauge)	Bestimmung des Anteiles an mergeligen u. tonigen Körnern M.-%	Bestimmung der abschlämmbaren Bestandteile < 0,063 mm M.-% / **Kategorie**
0/2	keine	hellgelb	keine	18,3 / f_{22}
2/5	keine	-	keine	0,6 / f_1
2/8	keine	-	keine	1,0 / f_1
5/8	keine	-	keine	0,6 / f_1
8/11	keine	-	keine	0,6 / f_1
8/16	keine	-	keine	0,9 / f_1
11/16	keine	-	keine	0,6 / f_1
16/22	keine	-	keine	0,5 / f_1
22/32	keine	-	keine	0,5 / f_1

IV.4.3 Röntgendiffraktometrische Untersuchungen (EN 933-9 Anlehnung; EN 13043:2002-09, Abs. 4.1.5)

Mineralogisch-petrographisch besteht das Kalksteinmaterial vorrangig aus Calcit. Untergeordnet liegen noch Dolomit, Quarz, Glimmer, Chlorit und Goethit vor.

Bei dem untersuchten Kalkstein handelt es sich um Kohlenkalk des Unterkarbon, dessen Mineralsubstanz unter dem Mikroskop als durchgängig frisch und unverwittert angesprochen wird.

Nach den Ergebnissen der röntgenographischen Untersuchung konnten weder innerkristallin quellfähige Mineralphasen noch quellfähige Wechsellagerungsminerale nachgewiesen werden.

IV.4.4 Bestimmung des Methylenblau-Wertes (EN 933-9; EN 13043:2002-09, Abs. 4.1.5)

Der Methylenblau-Wert wurde an der Prüfkörnung 0/0,125 mm, wie folgt, bestimmt:

feine Gesteinskörnung	0/2	MB_F = 1,33 g/kg
Dies entspricht der:		Kategorie „***MB*$_F$10**“

IV.4.5 Bestimmung des Fließkoeffizienten (EN 933-6; EN 13043:2002-09, Abs. 4.1.8)

Die Bestimmung des Fließkoeffizienten erfolgte an der Kornklasse 0,063/2,0 mm:

Gesteinskörnung	Fließkoeffzient [s]					Mittelwert
0/2	37,9	38,1	38,2	38,1	38,0	**38**

Dies entspricht der: Kategorie „E_{CS}**35**“

IV.5 Bestimmung der physikalischen Anforderungen

IV.5.1 Bestimmung der Schlagzertrümmerung (EN 1097-2, Abs. 6; EN 13043:2002-09, Abs. 4.2.2)

Versuch Nr.	SPLITT 8/12		
	Trockenrohdichte EN 1097-6 RK 45-P	Anteile l:d > 3:1	Schlagzertrümmerungs-werte
	(Mg/m^3)	(M.-%)	(M.-%)
1	2,722	6	16,96
2	2,722	6	16,32
3	2,722	6	16,62
Mittel **Kategorie**			16,6 $\underline{SZ_{18}}$

IV.5.2 Bestimmung der Rohdichte und Wasseraufnahme an Gesteinskörnungen (EN 1097-6; EN 13043:2002-09, Abs. 4.2.7)

Gesteinskörnung	Rohdichte (Mg/m^3)	Wasseraufnahme (M.-%)
2/8	2,722	1,2
16/22	2,734	0,8

IV.6 Bestimmung der Dauerhaftigkeit

IV.6.1 Bestimmung des Frost-Tau-Widerstandes (EN 1367-1; EN 13043:2002-09, Abs. 4.2.9.2)

Die Prüfkörnung 8,0/12,5 mm nach EN 1367-1 geprüft, erbrachte folgendes Ergebnis:

Absplitterungen nach Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung	
Versuch Nr.	Absplitterungen < 4,0 mm in M.-%
1	0,48
2	0,35
3	0,32
Mittelwert	0,4

Dies entspricht der: Kategorie „F_1“

IV.6.2 Bestimmung des Widerstandes gegen Zertrümmerung nach Durchführung der Bestimmung des Frostwiderstandes (EN 1367-1 und EN 1097-2, Abs. 6; EN 13043:2002-09, Abs. 4.2.2)

Versuch Nr.	SPLITT 8/12		
	Trockenrohdichte EN 1097-6, RK 45-P	Anteile l:d > 3:1	Schlagzertrümmerungswerte nach Frostbeanspruchung
	(Mg/m^3)	(M.-%)	(M.-%)
1	2,722	6	16,02
2	2,722	6	16,22
3	2,722	6	16,86
Mittel			16,4

Der Differenzwert der Splittschlagzertrümmerungswerte vor und nach Frostbeanspruchung beträgt - 0,2 M.-%.

IV.6.3 Bestimmung des Widerstandes gegen Hitzebeanspruchung (EN 1367-5 und EN 1097-2, Abs. 6; EN 13043:2002-09, Abs. 4.2.10)

Die Untersuchungen an der Prüfkörnung 8,0/12,5 mm erbrachte folgendes Ergebnis:

Absplitterungen nach Hitze-Beanspruchung	
Versuch Nr.	Absplitterungen < 5,0 mm in M.-%
1	0,08
2	0,06
3	0,04
Mittelwert	0,1

IV.6.4 Bestimmung des Widerstandes gegen Zertrümmerung nach Hitzebeanspruchung (EN 1097-2, Abs. 6; EN 13043:2002-09, Abs. 4.2.2)

Versuch Nr.	SPLITT 8/12		
	Trockenrohdichte EN 1097-6 RK 45-P	Anteile l:d > 3:1	Schlagzertrümmerungswerte nach Hitzebeanspruchung
	(Mg/m^3)	(M.-%)	(M.-%)
1	2,722	6	16,88
2	2,722	6	17,20
3	2,722	6	17,04
Mittel			17,0

Der Differenzwert der Splittschlagzertrümmerungswerte vor und nach Hitzebeanspruchung beträgt + 0,4 M.-%.

Dies entspricht der: Kategorie V_{SZ}**0,4**

IV.6.5 Prüfung von Mischgut auf Verhalten bei Lagerung in Wasser (DIN 1996, Teil 10; TL Min-StB 2000, Abs. A-3.2.5)

Bindemittelfreie Fläche nach 24-stündiger Wasserlagerung gemäß DIN 1996, Teil 10:

Bei Straßenbaubitumen 50/70 0 M.-%.

IV.6.6 Bestimmung der Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen (EN 12697-11; EN 13043:2002-09, Abs. 4.2.11)

Die Untersuchungen wurden nach EN 12697-11:2003 an der Prüfkörnung 8/11 mm durchgeführt. Verwendet wurde dabei ein Bitumen 50/70. Die Drehgeschwindigkeit betrug 60 min^{-1} ± 10 %. Während der Versuchsdurchführung wurde keine Klumpenbildung beobachtet. Die Bestimmungen erfolgten nach 6 bzw. 24 Stunden. Angegeben werden hier die Bestimmungen nach 6 Stunden:

Mittlerer Grad der Umhüllung:

Bestimmungsreihe 1:	90 %
Bestimmungsreihe 2:	85 %
Bestimmungsreihe 3:	85 %
Gesamtmittel:	85 %

IV.7 Bestimmung der chemischen Anforderungen

IV.7.1 Bestimmung der groben organischen Bestandteile (EN 1744-1:2009, Abs. 14.2; EN 13043:2002-09, Abs. 4.3.3)

Quellfähige und leichtgewichtigen organische Bestandteile wurden in allen geprüften Lieferkörnungen nicht festgestellt.

Nach diesen Untersuchungsergebnissen werden für das geprüfte Versuchsmaterial die Anforderungen, wie folgt, erfüllt:

feine Gesteinskörnungen: Kategorie „m_{LPC}**0,25**“

grobe Gesteinskörnungen: Kategorie „m_{LPC}**0,1**“

V Zusammenfassung und Beurteilung

Für das aus dem Vorkommen Sundern Westenfeld gewonnene und über eine den technischen Anforderungen entsprechende Anlage aufbereitete Kalkstein-Material wurde für die Gesteinskörnungen

- 0/2, 2/5, 2/8, 5/8, 8/11, 8/16, 11/16, 16/22, 22/32 -

die Produktprüfung 2/2012, gleichzeitig Wiederholung der Zweijahresprüfung, nach EN 13043:2002-09 in Verbindung mit den TL Gestein-StB durchgeführt.

Nach den hier vorgelegten Untersuchungen werden für die Gesteinskörnungen die nachfolgend aufgeführten Kategorien angegeben:

Anforderungen an	Gesteinskörnung	Anwendungsbereich EN 13043 / TL Gestein-StB
Korngrößenverteilung	0/2 2/5 2/8, 8/16 5/8, 8/11, 11/16, 16/22 22/32	G_F85, G_{TC}NR G_C90/10 G_C85/20 G_C90/15 G_C90/20
Feinanteile	0/2 2/5, 2/8, 5/8, 8/11, 8/16, 11/16, 16/22, 22/32	f_{22} f_1 f_1
Kornform	2/8, 5/8, 8/11, 8/16, 11/16, 16/22, 22/32	SI_{20}
Bruchflächigkeit	2/5, 2/8, 5/8, 8/11, 8/16, 11/16, 16/22, 22/32	$C_{100/0}$
Fließkoeffizient	0/2	E_{CS}35

Anforderungen an	Gesteinskörnung	Anwendungsbereich EN 13043 / TL Gestein-StB
Widerstand gegen Zertrümmerung	Prüfkörnung 8,0 / 12,5 mm	SZ_{18}
Frostwiderstand	Prüfkörnung 8,0 / 12,5 mm	F_1
Widerstand gegen Hitze	Prüfkörnung 8,0 / 12,5 mm	$V_{SZ}0,4$
Affinität	Prüfkörnung 8,0 / 11,2 mm	erfüllt
Organische Verunreinigungen	feine Gesteinskörnung grobe Gesteinskörnungen	$m_{LPC}0,25$ $m_{LPC}0,1$

Die untersuchten Proben entsprechen in den geprüften Eigenschaften mit den vorgenannten Kategorien den entsprechenden Anforderungen nach EN 13043:2002-09 in Verbindung den TL Gestein-StB.

Die werkseigene Produktionskontrolle wird entsprechend EN 13043:2002-09 in Verbindung mit den TL Gestein-StB regelmäßig durchgeführt.

Dipl.-Geol. A. Voß
Prüfstellenleiterin

Dipl.-Ing. D. Dinkgraeve
stellv. Prüfstellenleiter

Dr.rer.nat. R. Tschernoster
Sachbearbeiter

Sortenverzeichnis nach
EN 13043:2002-09 in Verbindung mit TL Gestein-StB 04, Fassung 2007

Mineral Baustoff
GmbH
Unter der Hardt 16
59846 Sundern-Westenfeld

Betrieb: **Sundern-Westenfeld**
Mineralstoff: **Kalkstein**
Prüfbericht Nr.570A-12-6 P 2/2012 E

Kalenderwoche
bis 41. 2012

Liefer-körnung Sorten-nummer	EN 13043 Kategorie	Sollwerte, Streubereiche u. Mittelwerte für die Siebdurchgänge bei																Anforderungen in Kategorien												
1 *	2 *	3	4	5	6 *	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30 *	31
		Toleranzkategorie	Anteil < 0,063 mm	Anteil < 0,063 mm	Qualität der Feinanteile	0,25 mm (M.-%)		0,5 mm (M.-%)		1,0 mm (M.-%)		2,0 mm (M.-%)		2,8 mm (M.-%)		4,0 mm (M.-%)		Kornform l : d ≥ 3 : 1	Anteil gebrochener Oberfläche	Fließ-koeffizient	Widerstand gegen Zertrümmerung	Widerstand gegen Polieren	Widerstand gegen Frost/Frost-Tau- ..... Tau-Salz Wechsel		Widerstand gegen Hitzebeanspruchung	Widerstand gegen Sonnenbrand	Rohdichte angegebener Wert	Wasseraufnahme angegebener Wert	Affinität zu bitumenhaltigen Bindemitteln	grobe organische Verunreinigungen
						Soll-wert	Ist-wert	Streu-bereich	Ist-wert	Soll-wert	Ist-wert	Soll-wert	Ist-wert	Soll-wert	Ist-wert	Soll-wert	Ist-wert													
		G_{TC} Kate-gorie	M.-%	f Kate-gorie	Kate-gorie best.*													SI Kate-gorie	C Kate-gorie	E_{CS} Kate-gorie	SZ Kate-gorie	PSV Kate-gorie	F Kategorien	MS	V_{SZ} Kate-gorie	SB Kate-gorie	MG/m³	M.-%	ang geb. Wert	m_{LPC} Kate-gorie
0/2 34020	G_F**85**	G_{TC}NR	17,9	f_{22}	best.*	---	28,7	---	47,3	---	63,6	85 - 99	97,2	---	---	100	100	---	---	E_{CS}35	SZ_{18}	NPD	F_1	MS_{18}	V_{SZ}0,4	NPD	---	---	---	m_{LPC}0,25
						1,0 mm (M.-%) Soll-wert	Ist-wert	2,0/2,8 mm (M.-%) Soll-wert	Ist-wert	4,0/5,6 mm (M.-%) Soll-wert	Ist-wert	8,0 mm (M.-%) Soll-wert	Ist-wert	11,2 mm (M.-%) Soll-wert	Ist-wert	16,0 mm (M.-%) Soll-wert	Ist-wert													
2/5 34280	G_C**90/10**	---	0,8	f_1	---	0 - 5	1,3	0 - 10	8,3	90 - 99	95,7	100	100	---	---	---	---	---	$C_{100/0}$	---	SZ_{18}	NPD	F_1	MS_{18}	V_{SZ}0,4	NPD	2,655	0,7	---	m_{LPC}0,1
2/8 34300	G_C**85/20**	---	1,2	$f_{1,5}$	---	0 - 5	2,1	0 - 20	7,4	---	26,8	85 - 99	96,3	98-100	100	100	100	SI_{20}	$C_{100/0}$	---	SZ_{18}	NPD	F_1	MS_{18}	V_{SZ}0,4	NPD	2,722	1,2	---	m_{LPC}0,1
5/8 34620	G_C**90/15**	---	0,7	f_1	---	---	---	0 - 5	0,9	0 - 15	9,3	90 - 99	98,5	98-100	100	100	100	SI_{20}	$C_{100/0}$	---	SZ_{18}	NPD	F_1	MS_{18}	V_{SZ}0,4	NPD	---	---	---	m_{LPC}0,1
						4,0/5,6mm (M.-%) Soll-wert	Ist-wert	8,0 mm (M.-%) Soll-wert	Ist-wert	11,2 mm (M.-%) Soll-wert	Ist-wert	16,0 mm (M.-%) Soll-wert	Ist-wert	22,4 mm (M.-%) Soll-wert	Ist-wert	31,5 mm (M.-%) Soll-wert	Ist-wert													
8/11 34660	G_C**90/15**	---	0,6	f_1	---	0 - 5	1,0	0 - 15	7,0	90 - 99	92,1	98-100	100	100	100	---	---	SI_{20}	$C_{100/0}$	---	SZ_{18}	NPD	F_1	MS_{18}	V_{SZ}0,4	NPD	2,722	---	0	m_{LPC}0,1
8/16 34690	G_C**85/20**	---	0,9	f_1	---	0 - 5	1,1	0 - 20	9,0	---	47,7	85 - 99	98,5	98-100	100	100	100	SI_{20}	$C_{100/0}$	---	SZ_{18}	NPD	F_1	MS_{18}	V_{SZ}0,4	NPD	---	---	---	m_{LPC}0,1
11/16 34790	G_C**90/15**	---	0,7	f_1	---	0 - 5	1,0	---	---	0 - 15	13,3	90 - 99	93,4	98-100	100	100	100	SI_{20}	$C_{100/0}$	---	SZ_{18}	NPD	F_1	MS_{18}	V_{SZ}0,4	NPD	---	---	---	m_{LPC}0,1
						8,0 mm (M.-%) Soll-wert	Ist-wert	11,2/16,0 mm (M.-%) Soll-wert	Ist-wert	22,4 mm (M.-%) Soll-wert	Ist-wert	31,5 mm (M.-%) Soll-wert	Ist-wert	45,0 mm (M.-%) Soll-wert	Ist-wert	63,0 mm (M.-%) Soll-wert	Ist-wert													
16/22 34810	G_C**90/15**	---	0,6	f_1	---	0 - 5	0,9	0 - 15	12,0	90 - 99	90,8	98-100	100	100	100	---	---	SI_{20}	$C_{100/0}$	---	SZ_{18}	NPD	F_1	MS_{18}	V_{SZ}0,4	NPD	2,734	0,8	---	m_{LPC}0,1
22/32	G_C**90/20**	---	0,6	f_1	---	---	---	0 - 5	0,9	0 - 20	7,3	90 - 99	90,5	98-100	100	100	100	SI_{20}	$C_{100/0}$	---	SZ_{18}	NPD	F_1	MS_{18}	V_{SZ}0,4	NPD	---	---	---	m_{LPC}0,1

* Unschädlichkeit der Feinanteile zusätzlich mittels Röntgendiffraktometrie nachgewiesen; quellfähige Tonminerale nicht in schädlichen Mengen enthalten.
* Rohdichte und Wasseraufnahme exemplarisch an den Gesteinskörnungen 2/8 und 16/22.
* Für die Bestimmung der Affinität nach EN 12697-11:2000 in Deutschland noch keine Festlegung, daher hier der Bezug auf DIN 1996, Teil 10.

GfB ERFT-LABOR GmbH

zu Prüfungszeugnis-Nr. 570A-12-6

Anlage 1

Anerkannt nach RAP Stra für Böden einschl. Bodenverbesserungen (A1, A3, A4), Gesteinskörnungen (D0³, D3, D4), Asphalt (G3-G4), hydr. geb. Gemische einschl. Bödenverfestigung (H1, H3, H4) und Gemische für Schichten ohne Bindemittel (I1-I4)

GfB BAUSTOFFPRÜFSTELLE
ERFT-LABOR GMBH

Erft-Labor · Vom-Stein-Str. 20 · 53879 Euskirchen
info@erft-labor.de
www.erft-labor.de

Mineral Baustoff GmbH
Unter der Hardt 16

59846 Sundern-Westenfeld

Vom-Stein-Straße 20
53879 Euskirchen
Tel. 0 22 51 - 1 28 39-00
Fax 0 22 51 - 1 28 39-29

NL Aachen: Salierallee 30
52066 Aachen
Tel. 02 41 - 1 57 01 56
Fax. 02 41 - 1 57 01 58

Labor- und Feldversuche
Asphalt · Beton · AKR · Boden · Deponie Mineralstoffe · Recycling · Bohrungen Sondierungen · Probenahme Wasser, Boden, Luft
Ingenieurgeologie und Hydrologie
Gründungsberatung · bautechnische Beratung, asphalt- und betontechnologische Gutachen · Lagerstättenbewerrung · Gefährdungsabschätzung

Prüfungszeugnis

Nr.: 570FA-12-6 Datum 28. Jan. 2013

I Angaben des Auftragschreibens

Auftraggeber: **Siehe Anschriftenfeld**

Prüfungsanlass: **Ergänzungsprüfung zur Produktprüfung 2/2012 nach EN 13043 in Verbindung mit TL Gestein-StB**

Prüfungsobjekt: **Fremdfüller und Eigenfüller aus feiner Gesteinskörnung 0/2 auf Basis Kalkstein**

Lieferwerk: **Sundern Westenfeld**

Prüfungs-Nr.	Art der Probe	Körnung mm	Bez. der Probe	Probenahme am	Probeneingang am	Entnahmestelle
570FA-12-6	**Gesteinsmehl Füller** **feine Gesteinskörnung**	**0/0,063** **0/2**	**Kalkstein** **Kalkstein**	**09. Okt. 2012**	**10. Okt. 2012**	**s. Text**

Dieses Prüfungszeugnis umfasst 8 Seiten.

Dieses Prüfungszeugnis darf nur ungekürzt vervielfältigt werden; auszugsweise Wiedergabe und jede Veröffentlichung bedarf unserer Zustimmung.

II Gliederung

I	Angaben des Auftragschreibens	1
II	Gliederung	2
III	Vorbemerkungen	3
III.1	Probenahme	3
III.2	Prüfungs- und Beurteilungsgrundlagen	3
III.3	Werkseigene Produktionskontrolle (WPK)	3
IV	Untersuchungsergebnisse	3
IV.1	Röntgenographische Untersuchungen	3
	(EN 933-9 Anlehnung; EN 13043:2002-09, Abs. 5.2.2)	3
IV.2	Bestimmung der geometrischen Anforderungen	3
IV.3	Bestimmung der Korngrößenverteilung	4
	(EN 13043:2002-9, Abs. 5.2.1)	4
IV.4	Bestimmung des Methylenblau-Wertes	5
	(EN 933-9; EN 13043:2002-09, Abs. 5.2.2)	5
IV.5	Bestimmung der physikalischen Anforderungen	5
IV.5.1	Bestimmung des Wassergehaltes	5
	(EN 1097-5; EN 13043:2002-09, Abs. 5.3.1)	5
IV.5.2	Bestimmung der Rohdichte	5
	(EN 1097-7; EN 13043:2002-09, Abs. 5.3.2)	5
IV.5.3	Bestimmung des Hohlraumgehaltes nach Rigden	5
	(EN 1097-4; EN 13043:2002-09, Abs. 5.3.3.1)	5
IV.5.4	Bestimmung des Erweichungspunkt „Delta-Ring und Kugel“ von Füller für Asphalte	6
	(EN 13179-1; EN 13043:2002-09, Abs. 5.3.3.2)	6
IV.6	Bestimmung der chemischen Anforderungen	6
IV.6.1	Bestimmung der organischen Bestandteile	6
	(EN 1744-1; EN 13043:2002-09)	6
IV.6.2	Bestimmung der Wasserlöslichkeit	6
	(EN 1744-1; EN 13043-2002-09, Abs. 5.4.1)	6
IV.6.3	Bestimmung der Wasserempfindlichkeit	7
	(EN 1744-4; EN 13043-2002-09, Abs. 5.4.2)	7
IV.6.4	Bestimmung des Calciumcarbonatgehaltes von Kalksteinfüller	7
V	Zusammenfassung und Beurteilung	8

III Vorbemerkungen

III.1 Probenahme

In Gegenwart von Herrn Tobes und Herrn Fahrenholz als Vertreter des Unternehmens wurden durch Herrn Dr. Straßer und Herrn Dinkgraeve folgende Durchschnittsproben nach EN 932-1 entnommen:

Erfassung zur Zeit der Beprobung:	Probenahme am 09. Okt. 2012					
Entnahmestelle:	Vorratshalde/Freilager/Verladung					
Materialproben:	rd.	10	kg	Fremdfüller	0/0,063	EN 13043 / TL Gestein-StB
	rd.	20	kg	Eigenfüller aus feiner Gesteinskörnung	0/2	EN 13043 / TL Gestein-StB
Verpackungsart:	Getrennte Transportbehälter (Plastiksäcke)					
Kennzeichnung:	Einlegezettel					

III.2 Prüfungs- und Beurteilungsgrundlagen

Die Untersuchungen wurden durchgeführt nach EN 13043:2002-09 in Verbindung TL Gestein-StB in dem dort vorgeschriebenen Umfang nach den in den TP Gestein-StB aufgeführten Vorschriften und Richtlinien, DIN/EN-Normen und Merkblättern, in der jeweils neuesten Fassung.

III.3 Werkseigene Produktionskontrolle (WPK)

Ein zentrales Werkslaboratorium mit Laborpersonal und Geräteausstattung zur Durchführung der Produktprüfungen im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle nach EN 13043:2002-09 in Verbindung mit TL Gestein-StB ist vorhanden.

Die Prüfungen im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle und die werkseigene Produktionskontrolle werden entsprechend EN 13043:2002-09 in Verbindung mit den TL Gestein-StB regelmäßig durchgeführt.

IV Untersuchungsergebnisse

IV.1 Röntgenographische Untersuchungen (EN 933-9 Anlehnung; EN 13043:2002-09, Abs. 5.2.2)

Mineralogisch-petrographisch besteht das Kalksteinmaterial vorrangig aus Calcit. Untergeordnet liegen noch Quarz, Dolomit, Glimmer, Chlorit und Goethit vor.

Bei dem untersuchten Kalkstein handelt es sich um Kohlenkalk des Unterkarbon, dessen Mineralsubstanz unter dem Mikroskop als durchgängig frisch und unverwittert angesprochen wird.

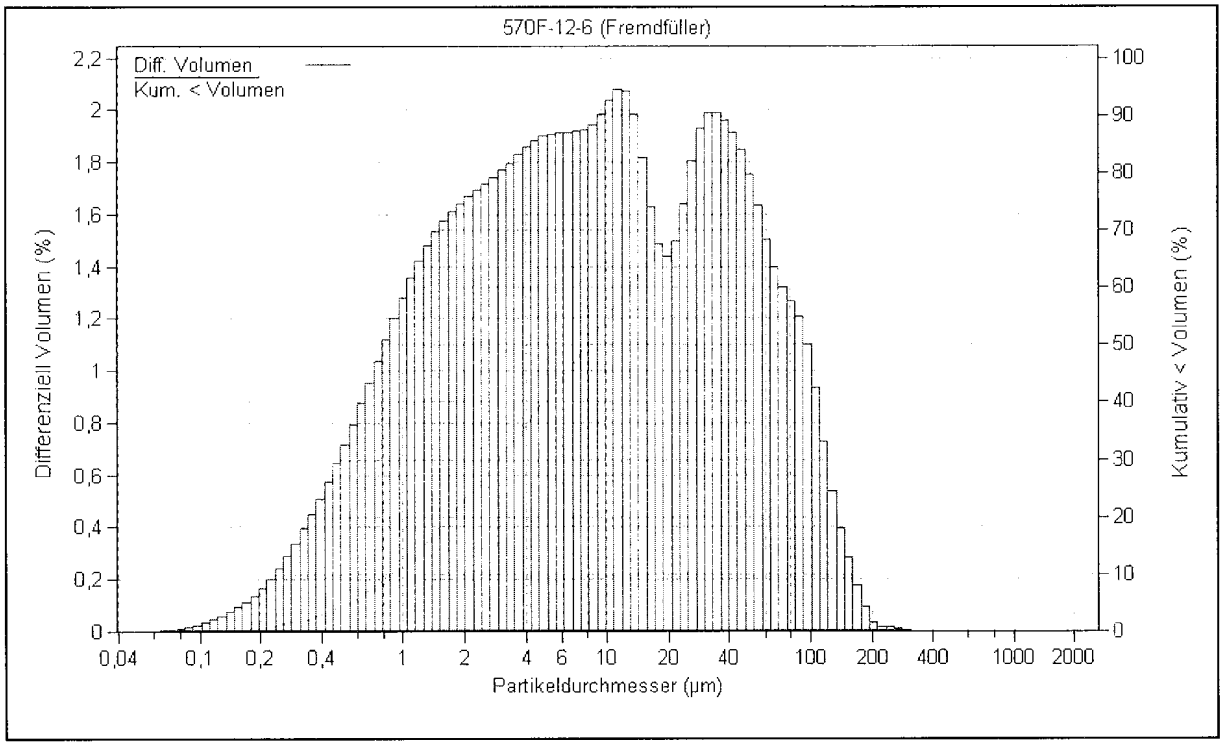
Nach den Ergebnissen der röntgenographischen Untersuchung konnten weder innerkristallin quellfähige Mineralphasen noch quellfähige Wechsellagerungsminerale nachgewiesen werden.

IV.2 Bestimmung der geometrischen Anforderungen

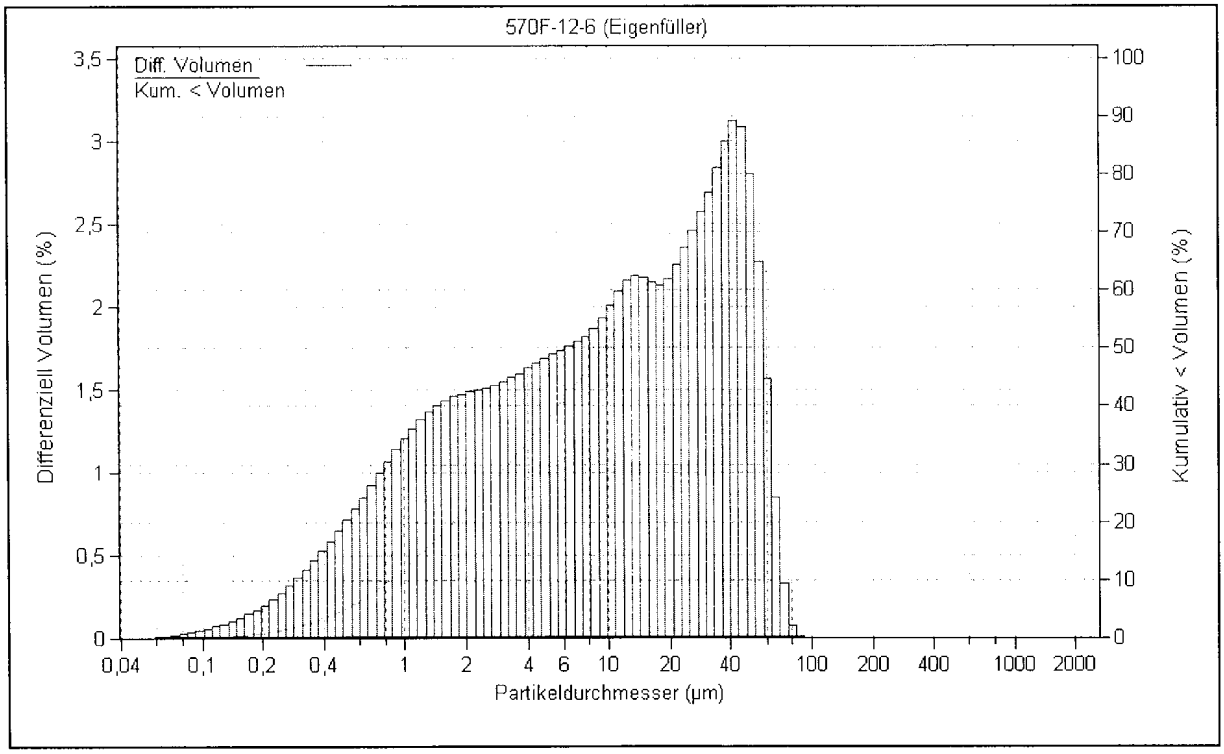
IV.3 Bestimmung der Korngrößenverteilung (EN 13043:2002-9, Abs. 5.2.1)

Die Korngrößenverteilungen wurden durch kombinierte Laser-Partikelanalysen bestimmt.

Fremdfüller



Eigenfüller



IV.4 Bestimmung des Methylenblau-Wertes (EN 933-9; EN 13043:2002-09, Abs. 5.2.2)

Der Methylenblau-Wert wurde, wie folgt, bestimmt:

Fremdfüller	MB_F = 1,33 g/kg
feine Gesteinskörnung 0/2	MB_F = 1,33 g/kg
Dies entspricht jeweils der:	Kategorie **„MB_F10“**

IV.5 Bestimmung der physikalischen Anforderungen

IV.5.1 Bestimmung des Wassergehaltes (EN 1097-5; EN 13043:2002-09, Abs. 5.3.1)

Kennzeichnung	Wassergehalt [M.-%]
Fremdfüller	0,2

IV.5.2 Bestimmung der Rohdichte (EN 1097-7; EN 13043:2002-09, Abs. 5.3.2)

Kennzeichnung	Prüfwert [Mg/m³]
Fremdfüller	2,712
Eigenfüller	2,713

IV.5.3 Bestimmung des Hohlraumgehaltes nach Rigden (EN 1097-4; EN 13043:2002-09, Abs. 5.3.3.1)

Material	Hohlraumgehalt [Vol.-%] Mittel	**Kategorie**
Fremdfüller	28,3	$V_{28/45}$
Eigenfüller	29,4	$V_{28/45}$

IV.5.4 Bestimmung des Erweichungspunkt „Delta-Ring und Kugel" von Füller für Asphalte (EN 13179-1; EN 13043:2002-09, Abs. 5.3.3.2)

Fremdfüller

Versuchsansatz	Delta Ring und Kugel	**Kategorie**
70/100 [°C]	49,6	-
70/100 + Füller [°C]	60,9	-
Erhöhung [°C]	11,3	$\Delta_{R\&B}$**8/25**

Eigenfüller

Versuchsansatz	Delta Ring und Kugel	**Kategorie**
70/100 [°C]	49,6	-
70/100 + Füller [°C]	63,4	-
Erhöhung [°C]	13,8	$\Delta_{R\&B}$**8/25**

IV.6 Bestimmung der chemischen Anforderungen

IV.6.1 Bestimmung der organischen Bestandteile (EN 1744-1; EN 13043:2002-09)

Feinverteilte organische Bestandteile (Huminsäure und humusartige Bestandteile) wurden in schädlichen Mengen in den Füller-Proben nicht festgestellt.

Nach Versuchsdurchführung war die überstehende Messflüssigkeit (Natronlauge) jeweils farblos/heller.

IV.6.2 Bestimmung der Wasserlöslichkeit (EN 1744-1; EN 13043-2002-09, Abs. 5.4.1)

	Wasserlöslichkeit [M.-%]	Anforderung nach TL Gestein-StB	**Kategorie**
Fremdfüller	4,2	≤ 10	WS_{10}
Eigenfüller	1,2	≤ 10	WS_{10}

IV.6.3 Bestimmung der Wasserempfindlichkeit (EN 1744-4; EN 13043-2002-09, Abs. 5.4.2)

Qualitative Bestimmung	Fremdfüller	Eigenfüller
Trübung des Wassers	nein	nein
Absetzen von nicht umhüllten Füller	nein	nein

IV.6.4 Bestimmung des Calciumcarbonatgehaltes von Kalksteinfüller

Der Calciumcarbonatgehalt des Kalksteinfüllers wurde röntgendiffraktometrisch, wie folgt, bestimmt.

	Calciumcarbonatgehalt ($CaCO_3$) [M.-%]	**Kategorie**
Fremdfüller	82	CC_{80}

	Calciumcarbonatgehalt ($CaCO_3$) [M.-%]	**Kategorie**
Eigenfüller	84	CC_{80}

V Zusammenfassung und Beurteilung

Für das aus dem Vorkommen Sundern Westenfeld gewonnene und über eine den technischen Anforderungen entsprechende Anlage aufbereitete Kalkstein-Material wurde für den

- Fremdfüller und Eigenfüller aus feiner Gesteinskörnung 0/2 -

die Produktprüfung 2/2012 nach EN 13043:2002-09 in Verbindung mit TL Gestein-StB durchgeführt.

Die untersuchten Proben entsprechen in den geprüften Eigenschaften mit den vorgenannten Kategorien den entsprechenden Anforderungen nach EN 13043:2002-09 in Verbindung mit TL Gestein-StB.

Die werkseigene Produktionskontrolle wird entsprechend EN 13043:2002-09 in Verbindung mit TL Gestein-StB regelmäßig durchgeführt.

Dipl.-Geol. A. Voß
Prüfstellenleiterin

Dipl.-Ing. D. Dinkgraeve
stellv. Prüfstellenleiter

Dr.rer.nat. R. Tschernoster
Sachbearbeiter

A.6. Fluoreszenzmikroskopaufnahmen

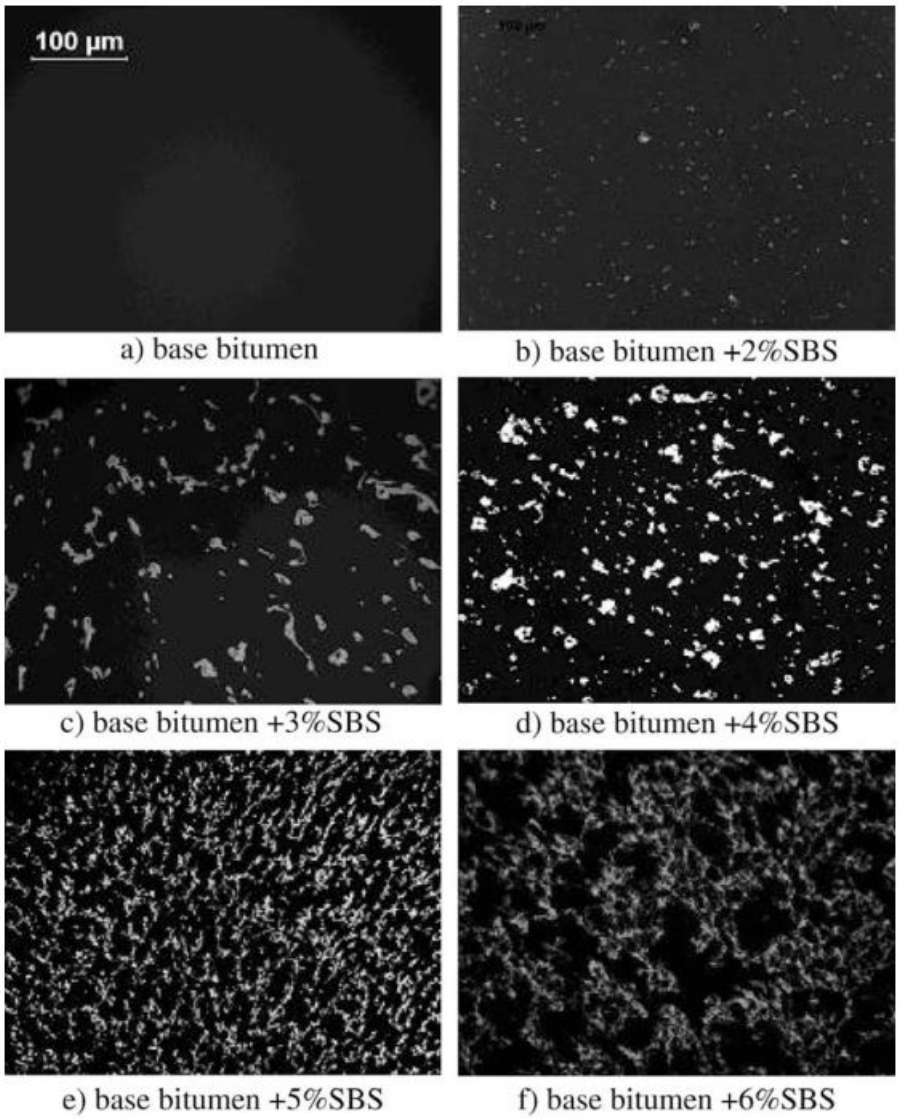


Abbildung A.17.: Fluorescent images of SBS modified bitumen with various contents (by weight) of SBS [36]

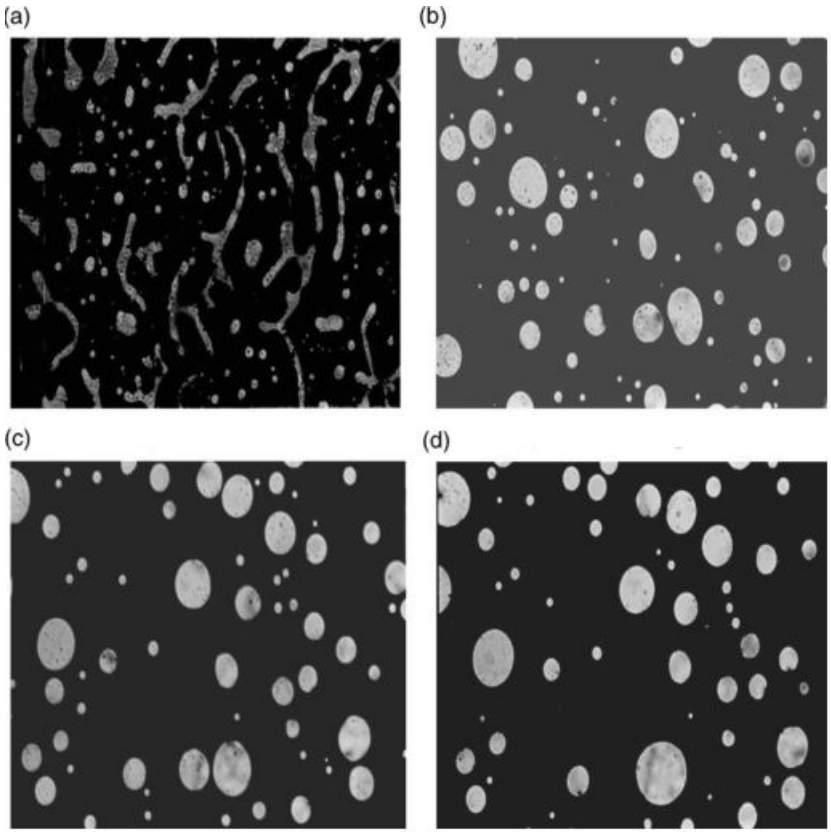


Abbildung A.18.: Morphology development with the storage time of a SBS modified bitumen at 160 °C [40]