



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e della comunicazione DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Überarbeitung und Harmonisierung der Probenaufbereitung von polymermodifizierten Bitumen

**Revision and harmonization of sample preparation
of polymer-modified bitumen**

**Révision et harmonisation de la préparation
d'échantillons de bitume polymère**

Walo Bertschinger Central AG, Zentrale Labordienste
Evelyn Friesenbichler
Sandra Dünner

Forschungsprojekt VSS_2024_338
auf Antrag des Bundesamtes für Strassen ASTRA
August 2026 | 1829

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet. Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière. Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima. Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee. Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)

Überarbeitung und Harmonisierung der Probenaufbereitung von polymermodifizierten Bitumen

**Revision and harmonization of sample preparation
of polymer-modified bitumen**

**Révision et harmonisation de la préparation
d'échantillons de bitume polymère**

Walo Bertschinger Central AG, Zentrale Labordienste
Evelyn Friesenbichler
Sandra Dünner

**Forschungsprojekt VSS_2024_338
auf Antrag des Bundesamtes für Strassen ASTRA
August 2026 | 1829**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Evelyn Friesenbichler
Sandra Dünner

Mitglieder

Federführende Fachkommission

NFK 3.4

Begleitkommission

Präsident

Nicolas Bueche

Mitglieder

Fabian Traber
Adrian Zippo
Urs Schellenberg
Felix Solcà
Tony Bühler
Françoise Beltzung
Martins Zaumanis

Antragsteller

Bundesamt für Strassen ASTRA

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von
<https://www.mobilityplatform.ch/>
heruntergeladen werden.

August 2026

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis.....	13
Abkürzungsverzeichnis	18
Zusammenfassung.....	19
Résumé	26
Summary.....	33
1 Einleitung	39
2 Grundlagen	43
3 Methodik.....	45
3.1 Begriffe	45
3.2 Auswahl der PmBs.....	45
3.3 Probeprobereitung und Prüfung der Bindemittelkennwerte	46
3.4 Auswertung der Ergebnisse.....	48
3.5 Interpretation der Grafiken.....	51
3.6 Verwendete Geräte	51
4 Ergebnisse	53
4.1 Anlieferungszustand.....	53
4.2 Aufschmelzen und Homogenisieren.....	54
4.3 Vergleich zwischen den im Ofen und den im Rotationsverdampfer erwärmten, rückgewonnenen PmBs.....	55
4.4 Vergleich mit nach der Rückgewinnung nicht erwärmten Proben.....	56
4.5 Penetration	57
4.6 Erweichungspunkt Ring & Kugel R+K	61
4.7 Penetrationsindex I_P	65
4.8 Elastische Rückstellung.....	69
4.9 Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahren BTSV	73
4.9.1 Temperatur T_{BTSV}	73
4.9.2 Phasenwinkel δ_{BTSV}	78
4.9.3 Black-Diagramme	82
4.9.4 T_{BTSV} vs. δ_{BTSV}	87
4.10 Multiple Stress Creep and Recovery Test MSCR.....	87
4.10.1 Rückformung R	87
4.10.2 Nachgiebigkeit J_{nr}	98
4.10.3 Kriech-Erholungskurven	108
4.11 FTIR	109

4.12 Vergleich einzelner Hersteller.....	117
4.13 Zusammenfassung der Ergebnisse	134
5 Diskussion	149
5.1 Einfluss der Probeaufbereitungstemperatur PAT.....	149
5.2 Erhitzen nach der Rückgewinnung.....	150
5.3 BTSV 150	
5.4 Einfluss der Polymere auf die Alterung	151
6 Vorschläge für Normrevisionen	153
7 Forschungsbedarf.....	155
8 Fazit	157
Literaturverzeichnis	159
Anhang	166
Datenverwendung.....	234
Projektabschluss.....	235

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht über den Arbeitsablauf. BTSV = Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahren; I_p = Penetrationsindex; MSCR = Multiple Stress Creep and Recovery Test. Zitierte Normen: SN EN 1426:2016-03 «Bestimmung der Nadelpenetration» [30], SN EN 1427:2016-03 «Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren» [31], SN EN 12591:2009 «Anforderungen an Strassenbaubitumen» [35], SN EN 12697-3+A1:2020-08 «Rückgewinnung des Bindemittels: Rotationsverdampfer» [2], SN EN 12697-35:2018-06 «Labormischung» [36], SN EN 13398:2018-06 «Bestimmung der elastischen Rückstellung von modifiziertem Bitumen» [32], SN EN 16659:2016-09 «MSCR-Prüfung (Multiple Stress Creep and Recovery Test)» [34], SN EN 17643:2016-09 «Bestimmung der Äqui-Schermoduletemperatur und des Phasenwinkels im Dynamischen Scherrheometer (DSR) – BTSV-Prüfung» [33] 22

Abbildung 2: Aperçu du déroulement des opérations. BTSV = essai BTSV; I_p = indice de pénétration; MSCR = essai MSCR. Normes citées: SN EN 1426:2016-03 «Détermination de la pénétrabilité à l'aiguille» [30], SN EN 1427:2016-03 «Détermination du point de ramollissement – Méthode Bille et Anneau» [31], SN EN 12591:2009 «Spécifications des bitumes routiers» [35], SN EN 12697-3+A1:2020-08 «Extraction des bitumes à l'évaporateur» [2], SN EN 12697-35:2018-06 «Malaxage en laboratoire» [36], SN EN 13398:2018-06 «Détermination du retour élastique des bitumes modifiés» [32], SN EN 16659:2016-09 «Essai de fluage-recouvrance sous contraintes répétées (essai MSCR)» [34], SN EN 17643:2016-09 «Détermination de la température d'equi-module de rigidité et de l'angle de phase à l'aide d'un rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR) – Essai BTSV» [33] 29

Abbildung 3: Overview of the workflow. BTSV = Binder-Fast-Characterization-Test; I_p = penetration index; MSCR = Multiple Stress Creep and Recovery Test. Cited standards: SN EN 1426:2016-03 «Determination of needle penetration» [30], SN EN 1427:2016-03 «Determination of softening point – Ring and Ball method» [31], SN EN 12591:2009 «Specifications for paving grade bitumens» [35], SN EN 12697-3+A1:2020-08 «Bitumen recovery: Rotary evaporator» [2], SN EN 12697-35:2018-06 «Laboratory mixing» [36], SN EN 13398:2018-06 «Determination of the elastic recovery of modified bitumen» [32], SN EN 16659:2016-09 «Multiple Stress Creep and Recovery Test (MSCRT)» [34], SN EN 17643:2016-09 «Determination of equi-shear modulus temperature and phase angle using a Dynamic Shear Rheometer (DSR) – BTSV test» [33] 36

Abbildung 4: Übersicht über den Arbeitsablauf. BTSV = Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahren; I_p = Penetrationsindex; MSCR = Multiple Stress Creep and Recovery Test. Zitierte Normen: SN EN 1426:2016-03 «Bestimmung der Nadelpenetration» [30], SN EN 1427:2016-03 «Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren» [31], SN EN 12591:2009 «Anforderungen an Strassenbaubitumen» [35], SN EN 12697-3+A1:2020-08 «Rückgewinnung des Bindemittels: Rotationsverdampfer» [2], SN EN 12697-35:2018-06 «Labormischung» [36], SN EN 13398:2018-06 «Bestimmung der elastischen Rückstellung von modifiziertem Bitumen» [32], SN EN 16659:2016-09 «MSCR-Prüfung (Multiple Stress Creep and Recovery Test)» [34], SN EN

17643:2016-09 «Bestimmung der Äqui-Schermodultemperatur und des Phasenwinkels im Dynamischen Scherrheometer (DSR) – BTSV-Prüfung [33].....	47
Abbildung 5: Interpretation der Boxplots	48
Abbildung 6: Beispiele des Anlieferungszustands verschiedener PmBs. (A) PmB-E 90/150-60 von Hersteller 1. (B) PmB 25/55-80 von Hersteller 2. (C) PmB 45/80-80 von Hersteller 5. Der R+K hat beim frischen PmB die Anforderungen nicht erfüllt. (D) PmB 25/55-65 von Hersteller 5	53
Abbildung 7: PmBs, die nach der Rückgewinnung bei 145 °C nicht weiter erhitzt wurden. (A) PmB 25/55-80 von Hersteller 3. Das PmB war sehr dickflüssig und die Prüfgefäße schwer zu befüllen. (B) PmB 90/150-80 von Hersteller 4. Homogenisierung nicht möglich. (C) PmB-E 25/55-65 von Hersteller 5. Unregelmässige Oberfläche. Siehe auch Tabelle 12	55
Abbildung 8: Die Ergebnisse der Penetration.....	58
Abbildung 9: Die Boxplots der absoluten Werte der Penetration der frischen (links) und rückgewonnenen PmBs (rechts)	59
Abbildung 10: Die Boxplots der relativen Abweichungen der Penetration bei 160 °C Referenztemperatur der frischen (A) und rückgewonnenen PmBs (B), bei 180 °C Referenztemperatur der frischen (C) und rückgewonnenen PmBs (D) und bei 200 °C Referenztemperatur der frischen (E) und rückgewonnenen PmBs (F)	59
Abbildung 11: Alle Werte der Penetration und die Trendlinien, die für die Regressionsanalysen benutzt wurden	60
Abbildung 12: Übersicht über die PmBs, deren Werte der Penetration innerhalb oder ausserhalb der r der SN EN 1426:2016-03 «Bestimmung der Nadelpenetration» [30] (A und B) oder des ROBIN 2024 (C) liegen.	61
Abbildung 13: Die Ergebnisse des R+K	62
Abbildung 14: Die Boxplots der absoluten Werte des R+K der frischen (links) und rückgewonnenen PmBs (rechts)	63
Abbildung 15: Die Boxplots der relativen Abweichungen des R+K bei 160 °C Referenztemperatur der frischen (A) und rückgewonnenen PmBs (B), bei 180 °C Referenztemperatur der frischen (C) und rückgewonnenen PmBs (D) und bei 200 °C Referenztemperatur der frischen (E) und rückgewonnenen PmBs (F)	64
Abbildung 16: Alle Werte des R+K und die Trendlinien, die für die Regressionsanalysen benutzt wurden	65
Abbildung 17: Übersicht über die PmBs, deren Werte des R+K innerhalb oder ausserhalb der r der SN EN 1427:2016-03 «Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren» [31] (A) oder des ROBIN 2024 (B) liegen.	66
Abbildung 18: Die Werte des berechneten I_P	67
Abbildung 19: Die Boxplots der absoluten Werte des I_P der frischen (links) und rückgewonnenen PmBs (rechts)	68
Abbildung 20: Die Boxplots der relativen Abweichungen des I_P bei 160 °C Referenztemperatur der frischen (A) und rückgewonnenen PmBs (B), bei 180 °C Referenztemperatur der frischen (C) und rückgewonnenen PmBs (D) und bei 200 °C Referenztemperatur der frischen (E) und rückgewonnenen PmBs (F)	68
Abbildung 21: Alle Werte des I_P und die Trendlinien, die für die Regressionsanalysen benutzt wurden	69
Abbildung 22: Übersicht über die PmBs, deren Werte des I_P innerhalb oder ausserhalb der r des ROBIN 2024 liegen.	70
Abbildung 23: Die Ergebnisse der elastischen Rückstellung.....	71

Abbildung 24: Die Boxplots der absoluten Werte der elastischen Rückstellung der frischen (links) und rückgewonnenen PmBs (rechts)	72
Abbildung 25: Die Boxplots der relativen Abweichungen der elastischen Rückstellung bei 160 °C Referenztemperatur der frischen (A) und rückgewonnenen PmBs (B), bei 180 °C Referenztemperatur der frischen (C) und rückgewonnenen PmBs (D) und bei 200 °C Referenztemperatur der frischen (E) und rückgewonnenen PmBs (F)	72
Abbildung 26: Alle Werte der elastischen Rückstellung und die Trendlinien, die für die Regressionsanalysen benutzt wurden.....	74
Abbildung 27: Übersicht über die PmBs, deren Werte der elastischen Rückstellung innerhalb oder ausserhalb der r der SN EN 13398:2018-06 «Bestimmung der elastischen Rückstellung von modifiziertem Bitumen» [32] liegen.	74
Abbildung 28: Die Ergebnisse des T_{BTSV}	75
Abbildung 29: Die Boxplots der absoluten Werte der T_{BTSV} der frischen (links) und rückgewonnenen PmBs (rechts)	76
Abbildung 30: Die Boxplots der relativen Abweichungen der T_{BTSV} bei 160 °C Referenztemperatur der frischen (A) und rückgewonnenen PmBs (B), bei 180 °C Referenztemperatur der frischen (C) und rückgewonnenen PmBs (D) und bei 200 °C Referenztemperatur der frischen (E) und rückgewonnenen PmBs (F)	76
Abbildung 31: Alle Werte der T_{BTSV} und die Trendlinien, die für die Regressionsanalysen benutzt wurden.....	77
Abbildung 32: Übersicht über die PmBs, deren Werte der T_{BTSV} innerhalb oder ausserhalb der r der SN EN 17643:2016-09 «Bestimmung der Äqui-Schermodultemperatur und des Phasenwinkels im Dynamischen Scherrheometer (DSR) – BTSV-Prüfung [33] oder des VAB/ALA 2022 liegen.....	78
Abbildung 33: Die Ergebnisse des δ_{BTSV}	79
Abbildung 34: Die Boxplots der absoluten Werte des δ_{BTSV} der frischen (links) und rückgewonnenen PmBs (rechts)	80
Abbildung 35: Die Boxplots der relativen Abweichungen des δ_{BTSV} bei 160 °C Referenztemperatur der frischen (A) und rückgewonnenen PmBs (B), bei 180 °C Referenztemperatur der frischen (C) und rückgewonnenen PmBs (D) und bei 200 °C Referenztemperatur der frischen (E) und rückgewonnenen PmBs (F)	80
Abbildung 36: Alle Werte des δ_{BTSV} und die Trendlinien, die für die Regressionsanalysen benutzt wurden.....	81
Abbildung 37: Übersicht über die PmBs, deren Werte des δ_{BTSV} innerhalb oder ausserhalb der r der SN EN 17643:2016-09 «Bestimmung der Äqui-Schermodultemperatur und des Phasenwinkels im Dynamischen Scherrheometer (DSR) – BTSV-Prüfung [33] oder des VAB/ALA 2022 liegen.....	82
Abbildung 38: Black-Diagramm des PmB-E 25/55-65. G^* = komplexer Schermodul	83
Abbildung 39: Black-Diagramm des PmB-E 45/80-65. G^* = komplexer Schermodul	83
Abbildung 40: Black-Diagramm des PmB-E 65/105-60. G^* = komplexer Schermodul.....	84
Abbildung 41: Black-Diagramm des PmB-E 90/150-60. G^* = komplexer Schermodul.....	84
Abbildung 42: Black-Diagramm des PmB 25/55-80. G^* = komplexer Schermodul	85

Abbildung 43: Black-Diagramm des PmB 45/80-80. G^* = komplexer Schermodul	85
Abbildung 44: Black-Diagramm des PmB 65/105-80. G^* = komplexer Schermodul	86
Abbildung 45: Black-Diagramm des PmB 90/150-80. G^* = komplexer Schermodul	86
Abbildung 46: T_{BTSV} vs. δ_{BTSV} Diagramm mit allen Werten aller PmBs	88
Abbildung 47: T_{BTSV} vs. δ_{BTSV} Diagramme mit allen Werten der NH-PmBs (links) und der H-PmBs (rechts). Legende siehe Abbildung 46	89
Abbildung 48: T_{BTSV} vs. δ_{BTSV} Diagramme der geprüften PmB-Sorten. Legende siehe Abbildung 46	90
Abbildung 49: Die Ergebnisse der $R_{3,2 \text{ kPa}}$	91
Abbildung 50: Die Ergebnisse der $R_{10 \text{ kPa}}$	92
Abbildung 51: Die Ergebnisse der R_{diff}	93
Abbildung 52: Die Boxplots der absoluten Werte der $R_{3,2 \text{ kPa}}$ der frischen (A) und rückgewonnenen PmBs (B), der $R_{10 \text{ kPa}}$ der frischen (C) und rückgewonnenen PmBs (D) und der R_{diff} der frischen (E) und rückgewonnenen PmBs (F)	94
Abbildung 53: Die Boxplots der relativen Abweichungen der $R_{3,2 \text{ kPa}}$ bei 160 °C Referenztemperatur der frischen (A) und rückgewonnenen PmBs (B), bei 180 °C Referenztemperatur der frischen (C) und rückgewonnenen PmBs (D) und bei 200 °C Referenztemperatur der frischen (E) und rückgewonnenen PmBs (F)	95
Abbildung 54: Die Boxplots der relativen Abweichungen der $R_{10 \text{ kPa}}$ bei 160 °C Referenztemperatur der frischen (A) und rückgewonnenen PmBs (B), bei 180 °C Referenztemperatur der frischen (C) und rückgewonnenen PmBs (D) und bei 200 °C Referenztemperatur der frischen (E) und rückgewonnenen PmBs (F)	96
Abbildung 55: Die Boxplots der relativen Abweichungen der R_{diff} bei 160 °C Referenztemperatur der frischen (A) und rückgewonnenen PmBs (B), bei 180 °C Referenztemperatur der frischen (C) und rückgewonnenen PmBs (D) und bei 200 °C Referenztemperatur der frischen (E) und rückgewonnenen PmBs (F)	97
Abbildung 56: Alle Werte und die Trendlinien der $R_{3,2 \text{ kPa}}$ (A), der $R_{10 \text{ kPa}}$ (B) und der R_{diff} (C), die für die Regressionsanalysen benutzt wurden	98
Abbildung 57: Übersicht über die PmBs, bei denen die Werte der R_{diff} innerhalb oder ausserhalb der r der SN EN 16659:2016-09 «MSCR-Prüfung (Multiple Stress Creep and Recovery Test)» [34] liegen	99
Abbildung 58: Die Ergebnisse der $J_{nr 3,2 \text{ kPa}}$	100
Abbildung 59: Die Ergebnisse der $J_{nr 10 \text{ kPa}}$	101
Abbildung 60: Die Ergebnisse der $J_{nr diff}$	102
Abbildung 61: Die Boxplots der absoluten Werte der $J_{nr 3,2 \text{ kPa}}$ der frischen (A) und rückgewonnenen PmBs (B), der $J_{nr 10 \text{ kPa}}$ der frischen (C) und rückgewonnenen PmBs (D) und der J_{diff} der frischen (E) und rückgewonnenen PmBs (F)	103
Abbildung 62: Die Boxplots der relativen Abweichungen der $J_{nr 3,2 \text{ kPa}}$ bei 160 °C Referenztemperatur der frischen (A) und rückgewonnenen PmBs (B), bei 180 °C Referenztemperatur der frischen (C) und rückgewonnenen PmBs (D) und bei 200 °C Referenztemperatur der frischen (E) und rückgewonnenen PmBs (F)	104
Abbildung 63: Die Boxplots der relativen Abweichungen der $J_{nr 10 \text{ kPa}}$ bei 160 °C Referenztemperatur der frischen (A) und rückgewonnenen PmBs (B), bei 180 °C Referenztemperatur der frischen (C) und rückgewonnenen PmBs (D) und bei 200 °C Referenztemperatur der frischen (E) und rückgewonnenen PmBs (F)	105

Abbildung 64: Die Boxplots der relativen Abweichungen der $J_{nr\ diff}$ bei 160 °C Referenztemperatur der frischen (A) und rückgewonnenen PmBs (B), bei 180 °C Referenztemperatur der frischen (C) und rückgewonnenen PmBs (D) und bei 200 °C Referenztemperatur der frischen (E) und rückgewonnenen PmBs (F)	106
Abbildung 65: Alle Werte und die Trendlinien der $R_{3,2\ kPa}$ (A), der $R_{10\ kPa}$ (B) und der R_{diff} (C), die für die Regressionsanalysen benutzt wurden	107
Abbildung 66: Übersicht über die PmBs, bei denen die Werte der $J_{nr\ diff}$ innerhalb oder ausserhalb der r der SN EN 16659:2016-09 «MSCR-Prüfung (Multiple Stress Creep and Recovery Test)» [34] liegen.....	109
Abbildung 67: Kriech-Erholungskurven des PmB-E 25/55-65. γ = Scherdeformation; t = Zeit.....	110
Abbildung 68: Kriech-Erholungskurven des PmB-E 45/80-65. γ = Scherdeformation; t = Zeit.....	110
Abbildung 69: Kriech-Erholungskurven des PmB-E 65/105-60. γ = Scherdeformation; t = Zeit.....	111
Abbildung 70: Kriech-Erholungskurven des PmB-E 90/150-60. γ = Scherdeformation; t = Zeit.....	111
Abbildung 71: Kriech-Erholungskurven des PmB 25/55-80. γ = Scherdeformation; t = Zeit.....	112
Abbildung 72: Kriech-Erholungskurven des PmB 45/80-80. γ = Scherdeformation; t = Zeit.....	112
Abbildung 73: Kriech-Erholungskurven des PmB 65/105-80. γ = Scherdeformation; t = Zeit.....	113
Abbildung 74: Kriech-Erholungskurven des PmB 90/150-80. γ = Scherdeformation; t = Zeit.....	113
Abbildung 75: FTIR-Spektrogramme aller PmBs. Bitumenspezifische Peaks und Modifizierungen verändert nach [78] und [79]	114
Abbildung 76: FTIR-Spektrogramme der PmBs von Hersteller 1. Modifizierungen verändert nach [79].....	115
Abbildung 77: FTIR-Spektrogramme der PmBs von Hersteller 2. Modifizierungen verändert nach [79].....	115
Abbildung 78: FTIR-Spektrogramme der PmBs von Hersteller 3. Modifizierungen verändert nach [79].....	116
Abbildung 79: FTIR-Spektrogramme der PmBs von Hersteller 4. Modifizierungen verändert nach [79].....	116
Abbildung 80: FTIR-Spektrogramme der PmBs von Hersteller 5. Modifizierungen verändert nach [79].....	117
Abbildung 81: Die Ergebnisse der Penetration (A), des $R+K$ (B), des I_P (C), der elastischen Rückstellung (D), des T_{BTSV} (E) und des δ_{BTSV} (F) der PmBs von Hersteller 1.....	118
Abbildung 82: Die Ergebnisse der R (links) und der J_{nr} (rechts) der PmBs von Hersteller 1.....	119
Abbildung 83: Black-Diagramme (oben) und Kriech-Erholungskurven (unten) der PmBs von Hersteller 1. G^* = komplexer Schermodul; γ = Scherdeformation; t = Zeit	120
Abbildung 84: Die Ergebnisse der Penetration (A), des $R+K$ (B), des I_P (C), der elastischen Rückstellung (D), des T_{BTSV} (E) und des δ_{BTSV} (F) der PmBs von Hersteller 2	121

Abbildung 85: Die Ergebnisse der R (links) und der J_{nr} (rechts) der PmBs von Hersteller 2.....	122
Abbildung 86: Black-Diagramme (oben) und Kriech-Erholungskurven (unten) der PmBs von Hersteller 2. G^* = komplexer Schermodul; γ = Scherdeformation; t = Zeit	123
Abbildung 87: Die Ergebnisse der Penetration (A), des R+K (B), des I_P (C), der elastischen Rückstellung (D), des T_{BTSV} (E) und des δ_{BTSV} (F) der PmBs von Hersteller 3.....	124
Abbildung 88: Die Ergebnisse der R (links) und der J_{nr} (rechts) der PmBs von Hersteller 3.....	125
Abbildung 89: Black-Diagramme (oben) und Kriech-Erholungskurven (unten) der PmBs von Hersteller 3. G^* = komplexer Schermodul; γ = Scherdeformation; t = Zeit	126
Abbildung 90: Die Ergebnisse der Penetration (A), des R+K (B), des I_P (C), der elastischen Rückstellung (D), des T_{BTSV} (E) und des δ_{BTSV} (F) der PmBs von Hersteller 4.....	127
Abbildung 91: Die Ergebnisse der R (links) und der J_{nr} (rechts) der PmBs von Hersteller 4.....	128
Abbildung 92: Black-Diagramme (oben) und Kriech-Erholungskurven (unten) der PmBs von Hersteller 4. G^* = komplexer Schermodul; γ = Scherdeformation; t = Zeit	129
Abbildung 93: Die Ergebnisse der Penetration (A), des R+K (B), des I_P (C), der elastischen Rückstellung (D), des T_{BTSV} (E) und des δ_{BTSV} (F) der PmBs von Hersteller 4.....	130
Abbildung 94: Die Ergebnisse der R (links) und der J_{nr} (rechts) der PmBs von Hersteller 5.....	131
Abbildung 95: Black-Diagramme (oben) und Kriech-Erholungskurven (unten) der PmBs von Hersteller 5. G^* = komplexer Schermodul; γ = Scherdeformation; t = Zeit	132

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick über die sich widersprechenden Normen.....	19
Tabelle 2: Übersicht über die untersuchten PmBs. X = Nur Frischbitumen geprüft; (X) = Frischbitumen und Rückgewinnung mit Erwärmung im Ofen; <i>kursiv</i> = zusätzliche Prüfserie, die nach der Rückgewinnung nicht erwärmt wurde; ___ = zusätzliche Prüfserie, die nach der Rückgewinnung im Rotationsverdampfer erwärmt wurde; * = Zusätzliche Daten einer Mischanlage vorhanden	21
Tabelle 3: Aperçu des normes contradictoires	26
Tabelle 4: Aperçu des PmB examinés. X = seul le bitume frais a été testé; (X) = bitume frais et récupération avec chauffage au four; <i>italique</i> = série de tests supplémentaires qui n'ont pas été chauffés après la récupération; ___ = série de tests supplémentaires qui ont été chauffés dans un évaporateur rotatif après la récupération; * = données supplémentaires disponibles pour une centrale d'enrobage	28
Tabelle 5: Overview of conflicting standards	33
Tabelle 6: Overview of the PmBs examined. X = Only fresh bitumen tested; (X) = Fresh bitumen and recovery with heating in the oven; <i>italics</i> = additional test series that was not heated after recovery; ___ = additional test series that was heated in the rotary evaporator after recovery; * = Additional data from a mixing plant available	35
Tabelle 7: Übersicht über die sich widersprechenden Normen	39
Tabelle 8: Übersicht über die untersuchten PmBs. X = Nur Frischbitumen geprüft; (X) = Frischbitumen und Rückgewinnung mit Erwärmung im Ofen; <i>kursiv</i> = zusätzliche Prüfserie, die nach der Rückgewinnung nicht erwärmt wurde; ___ = zusätzliche Prüfserie, die nach der Rückgewinnung im Rotationsverdampfer erwärmt wurde; * = Zusätzliche Daten einer Mischanlage vorhanden	46
Tabelle 9: Farbcode der Ergebnisse der BKW. Wenn in einer Grafik mehrere Daten eines Herstellers dargestellt sind, ändert sich die Helligkeit der Farbe	51
Tabelle 10: Farbcode der Ergebnisse der einzelnen PmBs. Wenn mehrere Daten eines PmBs in einer Grafik dargestellt werden, ändert sich die Helligkeit der Farbe	51
Tabelle 11: Übersicht über die in den Grafiken verwendeten Symbole.....	52
Tabelle 12: Übersicht über die PmBs, die nicht vollständig homogenisiert werden konnten	54
Tabelle 13: Vergleich der rückgewonnenen PmBs die im Ofen aufgewärmt wurden, mit denen die im Rotationsverdampfer erwärmt wurden. Die Tabelle zeigt die Differenzen der MW, die aus den drei Einzelwerten ermittelt wurden	56
Tabelle 14: Übersicht über die Herstellerangaben über die in ihren PmBs verwendeten Polymere. Die Angaben des Styrol-Gehalts in den von Hersteller 5 benutzten Produkten stammt aus den vom Hersteller zur Verfügung gestellten Konformitätserklärungen	117
Tabelle 15: Übersicht über die durchschnittlichen Steigungen der Trendlinien der einzelnen Hersteller im Vergleich zu allen Werten. Die Steigungen der frischen PmBs haben keine Klammern, die Steigungen der rückgewonnenen PmBs stehen in Klammern. Die Zahlen unter den Hersteller geben an, wie viele frische bzw. rückgewonnene PmBs (in Klammern) des jeweiligen Herstellers geprüft wurden. Rot.	

= rückgewonnene PmBs die im Rotationsverdampfer und nicht im Ofen erhitzt wurden.....	133
Tabelle 16: Übersicht über die durchschnittliche Differenz zwischen dem höchsten und tiefsten Einzelwert einer Prüfserie der einzelnen Hersteller im Vergleich zu allen Werten. Die maximalen Differenzen der frischen PmBs haben keine Klammern, die maximalen Differenzen der rückgewonnenen PmBs stehen in Klammern. Die Zahlen unter den Herstellern geben an, wie viele frische bzw. rückgewonnene PmBs (in Klammern) des jeweiligen Herstellers geprüft wurden. Rot. = rückgewonnene PmBs die im Rotationsverdampfer und nicht im Ofen erhitzt wurden.....	134
Tabelle 17: Einzelwerte frischer PmBs: Die Zahlen geben an, wie oft der höchste Einzelwert bei den 21 frischen PmBs bei der entsprechenden PAT ermittelt wurde. Angaben sowohl als absolute Werte als auch in Prozent	137
Tabelle 18: Einzelwerte rückgewonnener PmBs: Die Zahlen geben an, wie oft der höchste Einzelwert bei den zehn rückgewonnenen PmBs bei der entsprechenden PAT ermittelt wurde. Angaben sowohl als absolute Werte als auch in Prozent	138
Tabelle 19: Trendlinien der frischen PmBs: Anzahl der 21 frischen PmBs deren Trendlinien mit zunehmender PAT ansteigen, abfallen oder keine Steigung haben. Angaben sowohl als absolute Werte als auch in Prozent	139
Tabelle 20: Trendlinien der rückgewonnenen PmBs: Anzahl der zehn rückgewonnenen PmBs deren Trendlinien mit zunehmender PAT ansteigen, abfallen oder keine Steigung haben. Angaben sowohl als absolute Werte als auch in Prozent	140
Tabelle 21: Steigung der Trendlinien und p-Werte der frischen und rückgewonnenen PmBs. Zur Berechnung wurden alle Einzelwerte aller PmBs benutzt	141
Tabelle 22: SD der frischen PmBs. Anzahl der 63 Einzelwerte die bei der entsprechenden PAT und insgesamt ausserhalb der SD liegen. Angaben sowohl als absolute Werte als auch in Prozent	142
Tabelle 23: SD der rückgewonnenen PmBs. Anzahl der 30 Einzelwerte die bei der entsprechenden PAT und insgesamt ausserhalb der SD liegen. Angaben sowohl als absolute Werte als auch in Prozent.	143
Tabelle 24: Übersicht über die durchschnittlichen Unterschiede zwischen den MW frischer und rückgewonnener PmBs.	144
Tabelle 25: Übersicht über die durchschnittliche Differenz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Einzelwert	145
Tabelle 26: Anzahl der frischen PmBs, die innerhalb der r der entsprechenden Norm, der berechneten r vom ROBIN 2024 und innerhalb der r des VAB/ALA 2022 liegen. Angaben sowohl als absolute Werte als auch in Prozent	146
Tabelle 27: Anzahl der rückgewonnenen PmBs, die innerhalb der r der entsprechenden Norm, der berechneten r vom ROBIN 2024 und innerhalb der r des VAB/ALA 2022 liegen. Angaben sowohl als absolute Werte als auch in Prozent.....	147
Tabelle 28: Übersicht über die ermittelten Werte der Penetration. Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB; Pen. = Penetration; z = z-score; Steig. = Steigung; gelb hinterlegt = Wert ausserhalb der SD; A = Wert erfüllt nicht die Anforderungen; B = im Prüfgefäss war eine unregelmässige Oberfläche erkennbar; C = Klümpchen und Verdickungen nach dem Erwärmen; D = konnte nicht vollständig homogenisiert werden, im Probenbehälter gab es Bereiche mit unterschiedlicher	

Viskosität; E = Klümpchen und Verdickungen beim Homogenisieren vor dem Mischen der Labormischung	168
Tabelle 29: Übersicht über die ermittelten Werte des R+K. Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB; z = z-score; Steig. = Steigung; gelb hinterlegt = Wert ausserhalb der SD; A = hätte gemäss SN EN 1427:2016-03 «Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren» [31] mit Glycerin geprüft werden sollen; B = hätte gemäss SN EN 1427:2016-03 «Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren» [31] mit Wasser geprüft werden sollen; C = Klümpchen und Verdickungen nach dem Erwärmen; D = Wert erfüllt nicht die Anforderungen; E = hätte gemäss SN EN 1427:2016-03 «Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren» [31] wiederholt werden müssen; F = konnte nicht vollständig homogenisiert werden; G = Klümpchen und Verdickungen beim Homogenisieren vor dem Mischen der Labormischung	171
Tabelle 30: Übersicht über die ermittelten Werte des I _p . Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB; z = z-score; Steig. = Steigung; gelb hinterlegt = Wert ausserhalb der SD; A = Klümpchen und Verdickungen nach dem Erwärmen; B = konnte nicht vollständig homogenisiert werden; C = Klümpchen und Verdickungen beim Homogenisieren vor dem Mischen der Labormischung.....	174
Tabelle 31: Übersicht über die ermittelten Werte der elastischen Rückstellung. Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB; Elast. Rückst. = elastische Rückstellung; z = z-score; Steig. = Steigung; A = Klümpchen und Verdickungen nach dem Erwärmen; B = konnte nicht vollständig homogenisiert werden; C = Klümpchen und Verdickungen beim Homogenisieren vor dem Mischen der Labormischung	177
Tabelle 32: Übersicht über die ermittelten Werte des T _{BTsv} . Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB; z = z-score; Steig. = Steigung; gelb hinterlegt = Wert ausserhalb der SD; A = Klümpchen und Verdickungen nach dem Erwärmen; B = zum Abfüllen der DSR-Formen musste das PmB nochmal für 15 min im Ofen auf 150 °C erwärmt werden; C = konnte nicht vollständig homogenisiert werden; D = körnige Struktur während des Trimmens im DSR sichtbar	180
Tabelle 33: Übersicht über die ermittelten Werte des δ _{BTsv} . Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB; z = z-score; Steig. = Steigung; gelb hinterlegt = Wert ausserhalb der SD; A = Klümpchen und Verdickungen nach dem Erwärmen; B = zum Abfüllen der DSR-Formen musste das PmB nochmal für 15 min im Ofen auf 150 °C erwärmt werden; C = konnte nicht vollständig homogenisiert werden; D = körnige Struktur während des Trimmens im DSR sichtbar	183
Tabelle 34: Übersicht über die ermittelten Werte des R _{3,2 kPa} . Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB; z = z-score; Steig. = Steigung; gelb hinterlegt = Wert ausserhalb der SD; A = Klümpchen und Verdickungen nach dem Erwärmen; B = zum Abfüllen der DSR-Formen musste das PmB nochmal für 15 min im Ofen auf 150 °C erwärmt werden; C = konnte nicht vollständig homogenisiert werden; D = körnige Struktur während des Trimmens im DSR sichtbar	186

Tabelle 35: Übersicht über die ermittelten Werte des $R_{10 \text{ kPa}}$. Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB; z = z-score; Steig. = Steigung; gelb hinterlegt = Wert ausserhalb der SD; A = Klümpchen und Verdickungen nach dem Erwärmen; B = zum Abfüllen der DSR-Formen musste das PmB nochmal für 15 min im Ofen auf 150 °C erwärmt werden; C = konnte nicht vollständig homogenisiert werden; D = körnige Struktur während des Trimmens im DSR sichtbar.....	189
Tabelle 36: Übersicht über die ermittelten Werte des R_{diff} . Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB; z = z-score; Steig. = Steigung; gelb hinterlegt = Wert ausserhalb der SD; A = Klümpchen und Verdickungen nach dem Erwärmen; B = zum Abfüllen der DSR-Formen musste das PmB nochmal für 15 min im Ofen auf 150 °C erwärmt werden; C = konnte nicht vollständig homogenisiert werden; D = körnige Struktur während des Trimmens im DSR sichtbar.....	192
Tabelle 37: Übersicht über die ermittelten Werte des $J_{\text{nr } 3,2 \text{ kPa}}$. Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB; z = z-score; Steig. = Steigung; gelb hinterlegt = Wert ausserhalb der SD; A = Klümpchen und Verdickungen nach dem Erwärmen; B = zum Abfüllen der DSR-Formen musste das PmB nochmal für 15 min im Ofen auf 150 °C erwärmt werden; C = konnte nicht vollständig homogenisiert werden; D = körnige Struktur während des Trimmens im DSR sichtbar.....	195
Tabelle 38: Übersicht über die ermittelten Werte des $J_{\text{nr } 10 \text{ kPa}}$. Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB; z = z-score; Steig. = Steigung; gelb hinterlegt = Wert ausserhalb der SD; A = Klümpchen und Verdickungen nach dem Erwärmen; B = zum Abfüllen der DSR-Formen musste das PmB nochmal für 15 min im Ofen auf 150 °C erwärmt werden; C = konnte nicht vollständig homogenisiert werden; D = körnige Struktur während des Trimmens im DSR sichtbar.....	198
Tabelle 39: Übersicht über die ermittelten Werte des $J_{\text{nr diff}}$. Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB; z = z-score; Steig. = Steigung; gelb hinterlegt = Wert ausserhalb der SD; A = Klümpchen und Verdickungen nach dem Erwärmen; B = zum Abfüllen der DSR-Formen musste das PmB nochmal für 15 min im Ofen auf 150 °C erwärmt werden; C = konnte nicht vollständig homogenisiert werden; D = körnige Struktur während des Trimmens im DSR sichtbar.....	201
Tabelle 40: Übersicht über die Werte der Boxplots der absoluten Werte. I = Interquartilsabstand; Q2 = Median	203
Tabelle 41: Übersicht über die Werte der Boxplots der relativen Abweichungen bei 160 °C PAT. I = Interquartilsabstand; Q2 = Median.....	205
Tabelle 42: Übersicht über die Werte der Boxplots der relativen Abweichungen bei 180 °C PAT. I = Interquartilsabstand; Q2 = Median	207
Tabelle 43: Übersicht über die Werte der Boxplots der relativen Abweichungen bei 200 °C PAT. I = Interquartilsabstand; Q2 = Median	209
Tabelle 44: Übersicht über die PmBs, bei denen die Penetration innerhalb (✓) oder ausserhalb (×) der r der SN EN 1426:2016-03 «Bestimmung der Nadelpenetration» [30] oder des ROBIN 2024 liegt. Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB; Pen. = Penetration.....	212

Tabelle 45: Übersicht über die PmBs, bei denen der R+K innerhalb (✓) oder ausserhalb (×) der r der SN EN 1427:2016-03 «Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren» [31] oder des ROBIN 2024 liegt. Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB.....	215
Tabelle 46: Übersicht über die PmBs, bei denen der I_P innerhalb (✓) oder ausserhalb (×) der r des ROBIN 2024 liegt. Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB.....	218
Tabelle 47: Übersicht über die PmBs, bei denen die elastische Rückstellung innerhalb (✓) oder ausserhalb (×) der SN EN 13398:2018-06 «Bestimmung der elastischen Rückstellung von modifiziertem Bitumen» [32] liegt. Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB; Elast. Rückst. = elastische Rückstellung.....	221
Tabelle 48: Übersicht über die PmBs, bei denen die T_{BTSV} innerhalb (✓) oder ausserhalb (×) der r der SN EN 17643:2016-09 «Bestimmung der Äqui-Schermoduletemperatur und des Phasenwinkels im Dynamischen Scherrheometer (DSR) – BTSV-Prüfung» [33] oder des VAB/ALA 2022 liegt. Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB.....	224
Tabelle 49: Übersicht über die PmBs, bei denen die δ_{BTSV} innerhalb (✓) oder ausserhalb (×) der r der SN EN 17643:2016-09 «Bestimmung der Äqui-Schermoduletemperatur und des Phasenwinkels im Dynamischen Scherrheometer (DSR) – BTSV-Prüfung» [33] oder des VAB/ALA 2022 liegt. Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB.....	227
Tabelle 50: Übersicht über die PmBs, bei denen die R_{diff} innerhalb (✓) oder ausserhalb (×) der r der SN EN 16659:2016-09 «MSCR-Prüfung (Multiple Stress Creep and Recovery Test)» [34] liegt. Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB	230
Tabelle 51: Übersicht über die PmBs, bei denen die $J_{nr\ diff}$ innerhalb (✓) oder ausserhalb (×) der r der SN EN 16659:2016-09 «MSCR-Prüfung (Multiple Stress Creep and Recovery Test)» [34] liegt. Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB	233

Abkürzungsverzeichnis

BC	Binder characteristics (german «Bindemittelkennwert»)
BKW	Bindemittelkennwert
BTSV	Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahren
CL	Caractéristiques des liants (allemand « Bindemittelkennwert »)
DSR	Dynamisches Scherrheometer
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie
H-PmBs	höhermodifizierte polymermodifizierte Bindemittel
I _P	Penetrationsindex
J _{nr}	Nachgiebigkeit
J _{nr 10 kPa}	mit dem MSCR bestimmte durchschnittliche Nachgiebigkeit bei einer Kriechspannung von 10 kPa
J _{nr 3,2 kPa}	mit dem MSCR bestimmte durchschnittliche Nachgiebigkeit bei einer Kriechspannung von 3,2 kPa
J _{nr diff}	Differenz zwischen J _{nr 3,2 kPa} und J _{nr 10 kPa}
KI	Konfidenzintervall
MSCR	Multiple Stress Creep and Recovery Test
MW	Mittelwert
NH-PmBs	nicht höhermodifizierte polymermodifizierte Bindemittel
PAT	Probeaufbereitungstemperatur
PmB	Polymermodifiziertes Bindemittel
Q	Quartil
r	Wiederholpräzision
R	Rückformung
R+K	Erweichungspunkt Ring und Kugel
R _{10 kPa}	mit dem MSCR bestimmte durchschnittliche Rückformung bei einer Kriechspannung von 10 kPa
R _{3,2 kPa}	mit dem MSCR bestimmte durchschnittliche Rückformung bei einer Kriechspannung von 3,2 kPa
R _{diff}	Differenz zwischen R _{3,2 kPa} und R _{10 kPa}
ROBIN 2024	Ringversuch ROBIN aus dem Jahr 2024
SD	Standardabweichung (englisch «standard deviation»)
SPT	Sample preparation temperature (german «Probeaufbereitungstemperatur»)
T _{BTSV}	mit den BTSV bestimmte Temperatur bei einem komplexen Schermodul von 15 kPa
TPE	Température de préparation des échantillons (allemand « Probeaufbereitungstemperatur »)
VAB/ALA 2022	Ringversuch VAB/ALA aus dem Jahr 2022
δ _{BTSV}	mit dem BTSV bestimmter Phasenwinkel bei einem komplexen Schermodul von 15 kPa

Zusammenfassung

In den Schweizer Normen SN EN 12594:2015-09 «Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Vorbereitung von Untersuchungsproben» [1] und SN EN 12697-3+A1:2020-08 «Asphalt – Prüfverfahren – Teil 3: Rückgewinnung des Bindemittels: Rotationsverdampfer» [2] gibt es widersprüchliche Angaben, was die Homogenisierung während der Probenaufbereitung von polymermodifizierten Bindemitteln (PmBs) betrifft. SN EN 12594:2015-09 «Vorbereitung von Untersuchungsproben» [1] legt fest, dass sowohl frische als auch rückgewonnene PmBs bei der Probeaufbereitung auf 180 °C bis 200 °C aufgewärmt werden müssen. Die SN EN 12697-3+A1:2020-08 «Rückgewinnung des Bindemittels: Rotationsverdampfer» [2] fordert in Ziffer 8 eine Bitumenvorbereitung gemäss SN EN 12594:2015-09 «Vorbereitung von Untersuchungsproben» [1], legt aber gleichzeitig im Nationalen Anhang Ziffer 10 fest, dass die Temperatur bei hochviskosen Bindemitteln erhöht werden kann. Abgesehen davon, dass der Begriff «hochviskos» nicht genauer definiert wird, führt der Nationale Anhang Ziffer 10 zu einem Widerspruch mit SN EN 12594:2015-09 «Vorbereitung von Untersuchungsproben» [1] (Tabelle 1). Mit diesem Widerspruch wird in der Praxis unterschiedlich umgegangen. Das führt vor allem dann zu Problemen, wenn die Bindemittelkennwerte (BKW) nicht den Anforderungen entsprechen.

Widerspruch der Normen

SN EN 12594:2015-09 «Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Vorbereitung von Untersuchungsproben» [1]

1 Geltungsbereich: Dieses Nationale Vorwort gilt für Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel. Es gilt ausserdem für Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel, die aus bitumenhaltigen Gemischen gemäss SN EN 12697-3+A1:2020-08 (...) zurückgewonnen wurden (...)

Ziffer 7.1.1: Falls für polymermodifizierte Bitumen (...) keine Anleitung zur Verfügung steht, muss die Temperatur der Wärmekammer unabhängig vom Erweichungspunkt im Bereich von 180 °C bis 200 °C liegen.

SN EN 12697-3+A1:2020-08 «Asphalt – Prüfverfahren – Teil 3: Rückgewinnung des Bindemittels: Rotationsverdampfer» [2]

Ziffer 8: Die Bitumenproben werden nach EN 12594 vorbereitet.

Nationaler Anhang Ziffer 10: Bei hochviskosen Bindemitteln kann eine Erhöhung der Temperatur des rückgewonnenen Bindemittels erforderlich sein.

Widerspruch

Tabelle 1: Überblick über die sich widersprechenden Normen

In den Normen wird bei PmBs in Bezug auf die Prüfbedingungen sehr gerne der Zusatz «gemäss Angaben Hersteller» genannt. Für frische PmBs kann diese Vorgabe noch umgesetzt werden, bei rückgewonnenen PmBs allerdings ist es um einiges schwieriger, und unter Umständen sogar unmöglich, an solche Informationen zu kommen. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass die Prüflabore immer dieselbe

Probeaufbereitungstemperatur (PAT) benutzen, denn nur so kann die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sichergestellt werden.

Es ist schon lange bekannt, dass thermische Belastung einen wesentlichen Teil zur Alterung von Bindemitteln beiträgt. In der Praxis zeigt sich ihre Abhängigkeit von der PAT in der Variation der BKW unter den Prüflaboratorien, die, wie oben erwähnt, unterschiedliche PAT benutzen. Es stellt sich also die Frage, bei welcher Temperatur die Probevorbereitung erfolgen kann, ohne die im Bindemittel enthaltenen Polymere zu verändern und somit eine künstliche Alterung des Bindemittels zu verhindern.

Unter dem Begriff «Alterung» versteht man im Allgemeinen die Veränderung bituminöser Bindemittel mit der Zeit. Grund dafür ist, dass Bitumen ein organisches Material ist, das ständig chemischen Veränderungen unterliegt [3], wobei Oxidation, der Verlust leicht flüchtiger Bestandteile und die molekulare Umstrukturierung die Hauptverursacher sind [4] [5] [6]. Diese chemischen Veränderungen haben wiederum eine Veränderung seiner physikalischen und rheologischen Eigenschaften zur Folge [7] [8]. Es wurde gezeigt, dass die Alterung eines Bitumens sehr gut mit seinen physikalischen Parametern zusammenhängt. Die Penetration und die Duktilität verringern sich und die Viskosität, der Erweichungspunkt und der Penetrationsindex (I_P) steigen an [9] [10] [11]. Diese Verhärtung und Versprödung führt dazu, dass die Bildung von Rissen unter dynamischer Belastung und Kälteeinwirkung, Furchenbildung und Feuchtigkeitsschäden begünstigt, und die Beständigkeit gegen Ermüdung verringert wird [3] [8] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18].

Eine Möglichkeit die Alterung eines Bitumens hinauszuzögern und die Gebrauchsspanne zu erweitern ist die Polymermodifikation des Bitumens. Dabei werden dem Bitumen Modifizierungsmittel zugesetzt bzw. in die Bitumenstruktur eingearbeitet [3] [19], die einen positiven Einfluss auf die alterungsbedingten, rheologischen und viskoelastischen Eigenschaften des Bitumens haben [20] [21]. Diese Methode ist besonders beliebt, da sie einfach und vergleichsweise kostengünstig ist.

In der wissenschaftlichen Fachliteratur findet man eine Vielzahl an Studien, die sich mit der Alterung von Bitumen beschäftigt haben. Dabei stehen den Forschenden verschiedene Testmethoden zur Verfügung, um die Alterung von Bitumen zu simulieren. Bei diesen Testmethoden wird das zu untersuchende Material bei 30 °C bis mehr als 100 °C für mehrere Stunden, Tage oder Wochen gelagert [3] [22]. Nach der Alterung können verschiedene rheologische, chemische und morphologische Untersuchungen durchgeführt und die physikalischen Eigenschaften ermittelt werden (z.B.: [3] [7] [8] [11] [22] [23] [24] [25] [26] [27]). Beim Studium der wissenschaftlichen Literatur sind die folgenden Punkte besonders auffällig:

1. Die Forschung über hochmodifizierte Bitumen ist aufgrund des hohen Polymeranteils und des hohen Alterungsgrads immer noch sehr begrenzt [22].
2. Der Fokus der Wissenschaft liegt auf der Langzeitalterung, also Änderungen, die während der 10 bis 20 Jahren Nutzungsdauer stattfinden. Die Probeaufbereitung im Labor betrifft aber die Kurzzeitalterung.
3. Die in der Laborpraxis häufigsten Anforderungswerte wie die Penetration, der Erweichungspunkt Ring und Kugel (R+K), der I_P und die elastische Rückstellung werden vergleichsweise selten berücksichtigt (z.B.: [8]).
4. Die Frage, wie hoch man PmBs erhitzen darf, ohne diese thermisch zu schädigen, kann nicht beantwortet werden.

Bei diesen Punkten setzt dieses Forschungsprojekt an. Das Ziel war es, herauszufinden, bis zu welcher Temperatur PmBs während der Probeaufbereitung erhitzt werden dürfen, ohne eine thermische Schädigung hervorzurufen und die BKW zu verändern. Orientierend an SN EN 14023:2010 «Rahmenwerk für die Spezifikation von polymermodifizierten Bitumen» [28] Tabelle 2 und SN EN 13108-1:2022-09 «Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen – Teil 1: Asphaltbeton» [29] Tabelle 1 wurden acht PmB-Sorten ausgesucht, die von fünf Herstellern zur Verfügung gestellt wurden. Zu den acht ausgewählten PmB-Sorten gehören sowohl höhermodifizierte PmBs (H-PmBs) als auch nicht höhermodifizierte PmBs (NH-PmBs; siehe Kapitel 3.1). Insgesamt wurden 21 PmBs untersucht (Tabelle 2). Abbildung 1 gibt einen Überblick über den Arbeitsablauf.

Übersicht über die untersuchten PmBs

PmB		Hersteller				
		1	2	3	4	5
NH-PmBs	PmB-E 25/55-65		X	X		(X)
	PmB-E 45/80-65	X	(X)*		X	
	PmB-E 65/105-60		<u>(X)</u>	X		X
	PmB-E 90/150-60	X		(X)		
H-PmBs	PmB 25/55-80		X	<u>(X)</u>		
	PmB 45/80-80	(X)	X			X
	PmB 65/105-80	(X)	X			
	PmB 90/150-80	X		X	(X)	

Tabelle 2: Übersicht über die untersuchten PmBs. X = Nur Frischbitumen geprüft; (X) = Frischbitumen und Rückgewinnung mit Erwärmung im Ofen; *kursiv* = zusätzliche Prüfserie, die nach der Rückgewinnung nicht erwärmt wurde; = zusätzliche Prüfserie, die nach der Rückgewinnung im Rotationsverdampfer erwärmt wurde; * = Zusätzliche Daten einer Mischanlage vorhanden

Von jedem dieser 21 PmBs wurden drei Proben untersucht, die während der Probeaufbereitung im Ofen jeweils auf 160 °C, 180 °C oder 200 °C erwärmt wurden. 180 °C und 200 °C wurden gewählt, weil sie in SN EN 12594:2015-09 «Vorbereitung von Untersuchungsproben» [1] festgelegt sind. 160 °C wurden gewählt, da es in manchen Laboren üblich ist, PmBs nach der Rückgewinnung bei 145 °C nicht nochmal zu erwärmen. 220 °C wurden nicht gewählt, da diese Temperatur vermutlich schon zu heiss ist (siehe Kapitel 5.4) und in der Praxis selten bis gar nicht angewendet wird.

Um Hinweise auf die chemische Zusammensetzung der PmBs zu bekommen, wurde bei den frischen PmBs zusätzlich zu den BKW eine Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie (FTIR) durchgeführt und mit den Angaben der Hersteller bzgl. der verwendeten Polymere verglichen.

Bei der Auswahl der PmBs für die Rückgewinnung wurde darauf geachtet, dass jede PmB-Sorte und jeder Hersteller mind. einmal vertreten sind.

Nach der Mischung eines AC 8 H wurde das Mischgut lichtgeschützt und bei Raumtemperatur mind. eine Woche lang gelagert, bevor das PmB rückgewonnen und dieselben BKW wie bei den frischen PmBs geprüft wurden.

Um festzustellen, ob die Art und Weise der Erwärmung einen Einfluss auf die BKW der rückgewonnenen PmBs hat, wurden bei zwei der für die Rückgewinnung ausgewählten PmBs zusätzliche Labormischung hergestellt, deren rückgewonnenen PmBs nicht im Ofen, sondern direkt während der dritten Phase der Rückgewinnung im Rotations-

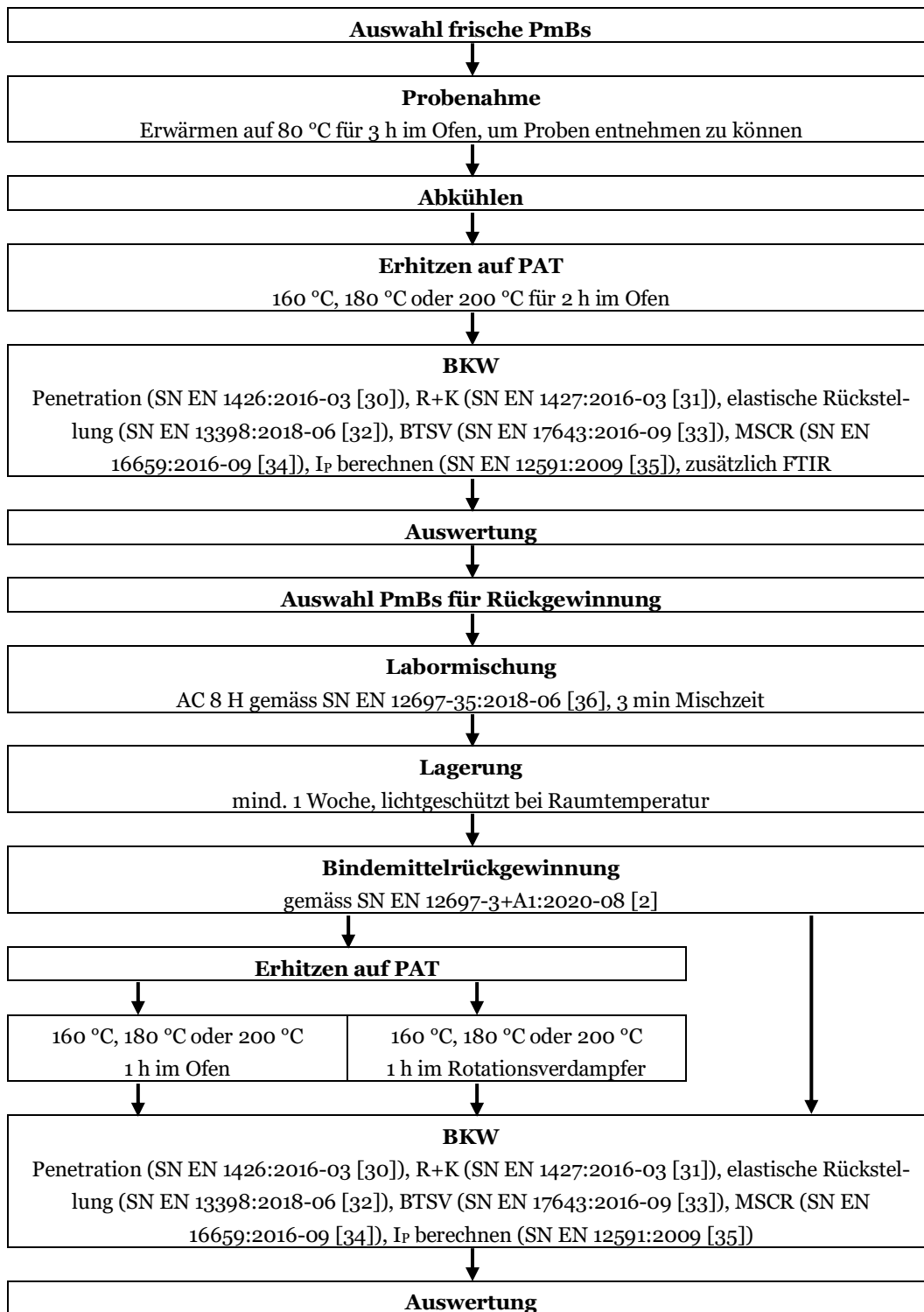


Abbildung 1: Übersicht über den Arbeitsablauf. BTSV = Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahren; I_P = Penetrationsindex; MSCR = Multiple Stress Creep and Recovery Test. Zitierte Normen: SN EN 1426:2016-03 «Bestimmung der Nadelpenetration» [30], SN EN 1427:2016-03 «Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren» [31], SN EN 12591:2009 «Anforderungen an Strassenbaubitumen» [35], SN EN 12697-3+A1:2020-08 «Rückgewinnung des Bindemittels: Rotationsverdampfer» [2], SN EN 12697-35:2018-06 «Labormischung» [36], SN EN 13398:2018-06 «Bestimmung der elastischen Rückstellung von modifiziertem Bitumen» [32], SN EN 16659:2016-09 «MSCR-Prüfung (Multiple Stress Creep and Recovery Test)» [34], SN EN 17643:2016-09 «Bestimmung der Äqui-Schermodultemperatur und des Phasenwinkels im Dynamischen Scherrheometer (DSR) – BTSV-Prüfung» [33]

kolben auf 160 °C, 180 °C oder 200 °C erwärmt wurden. Es wurde auch überprüft, ob eine zusätzliche Erwärmung der PmBs nach der Rückgewinnung überhaupt sinnvoll ist. Dafür wurden bei fünf der für die Rückgewinnung ausgewählten PmBs eine zusätzliche Labormischung hergestellt, dessen PmBs nach der Rückgewinnung bei 145 °C nicht nochmal erwärmt wurden. Mit diesem Schritt wurde nicht nur eine weitere Temperatur der Testreihe hinzugefügt, es konnte auch festgestellt werden, ob eine weitere Erwärmung nach der Rückgewinnung die PmBs thermisch schadet.

Bis auf den R+K und den Multiple Stress Creep and Recovery Test (MSCR) wurden alle Prüfungen nach Norm durchgeführt. Beim R+K wurden für eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse aller drei Einzelwerte einer Prüfserie mit derselben Prüflässigkeit ermittelt. Beim MSCR wurden in Anlehnung an die wissenschaftliche Literatur die Kriechspannungen der beiden Prüfzyklen auf 3.2 kPa und 10 kPa erhöht, obwohl die Norm 0.1 kPa und 3.2 kPa vorgibt (siehe Kapitel 7).

Die Ergebnisse wurden unter verschiedenen Aspekten ausgewertet. Es wurden Boxplots der absoluten Werte erstellt, um Unterschiede zwischen den drei PAT besser erkennen zu können. Es wurden auch Boxplots der relativen Abweichungen erstellt, indem jeweils eine PAT als Referenztemperatur festgelegt und mit den anderen beiden PAT verglichen wurde. Die höchsten gemessenen Einzelwerte pro Prüfserie, Trendlinien und deren Steigungen wurden ausgewertet, um Hinweise darauf zu bekommen, ob es einen Anstieg oder einen Abfall der BKW hin zu höheren PAT gibt. Um herauszufinden ob diese Trends statistisch signifikant sind, wurden Regressionsanalysen mit allen Werten eines BKW durchgeführt. Ausserdem wurden weitere statistische Kennzahlen wie die Standardabweichung (SD), das Konfidenzintervall (KI) und der z-score berechnet. Mit den Mittelwerten (MW) jeder Prüfserie wurden Unterschiede zwischen den frischen und rückgewonnenen PmBs, und zwischen NH-PmBs und H-PmBs ermittelt. Mit der maximalen Differenz zwischen dem höchsten und dem tiefsten Einzelwert einer Prüfserie sollte die Streuung der Werte ermittelt werden, um festzustellen, ob es einen Unterschied zwischen NH-PmBs und H-PmBs gibt. Zu guter Letzt wurden die Ergebnisse mit den Wiederholpräzisionen (r) der entsprechenden Normen sowie der Ringversuche ROBIN aus dem Jahr 2024 (ROBIN 2024) und VAB/ALA aus dem Jahr 2022 (VAB/ALA 2022) verglichen.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass nur die Ergebnisse des MSCR einen Zusammenhang mit der PAT zeigen. Dass wird deutlich an den folgenden Erkenntnissen:

- Die Kriech-Erholungskurven, die bei 160 °C ermittelt wurden, zeigen in den meisten Fällen die höchste Scherdeformationen. Diese sind teilweise sogar deutlich höher als bei 180 °C und 200 °C PAT.
- Die Regressionsanalysen der frischen PmBs ergeben für $R_{3.2 \text{ kPa}}$ eine statistische Signifikanz und für die $R_{10 \text{ kPa}}$ und die $J_{nr \ 3.2 \text{ kPa}}$ eine tendenzielle statistische Signifikanz.
- Die meisten Werte, die ausserhalb der SD liegen, wurden bei 160 °C PAT ermittelt.
- Der höchste gemessene Einzelwert wurde in 60-70 % der Fälle bei einer PAT von 160 °C ermittelt.
- Die Boxplots zeigen bei 160 °C PAT generell grössere Unterschiede.

Dem entgegengesetzt stehen die Penetration, der R+K, der I_p , die elastische Rückstellung, die δ_{BTSV} und der δ_{BTSV} , die nicht von der PAT beeinflusst werden. Bei der elastischen Rückstellung ändern sich die Werte am wenigsten.

Es konnte gezeigt werden, dass frische und rückgewonnene PmBs in den meisten Fällen sehr ähnliche Trends zeigen und dass die Einzelwerte von H-PmBs bei den meisten BKW etwas stärker streuen als die der NH-PmBs.

Die Anzahl der PmBs, die innerhalb der r der entsprechenden Norm, des ROBIN 2024 und des VAB/ALA 2022 liegen, variiert je nach BKW stark. Beim MSCR lässt es sich damit erklären, dass die Prüfung nicht nach Norm durchgeführt wurde. Die meisten Ergebnisse liegen jedoch innerhalb oder nur knapp ausserhalb der r . Daraus lässt sich schliessen, dass die Streuung der Einzelwerte pro Prüfsérie innerhalb oder nur etwas ausserhalb der Messunsicherheit der Prüfmethode liegt. Das deutet darauf hin, dass die Effekte der PAT nicht gross genug sind, um die BKW stark zu verändern, die Streuung der Werte aber doch so weit erhöht, dass die Wiederholbarkeit beeinträchtigt wird. Wir mussten feststellen, dass nicht alle PmBs bei allen PAT vollständig aufgeschmolzen und homogenisiert werden können. Besonders problematisch war das bei den PmBs, die nach der Rückgewinnung bei 145 °C nicht nochmal erwärmt wurden. Die Ergebnisse dieser PmBs stimmen aber gut mit den Ergebnissen der erwärmten rückgewonnenen PmBs überein.

Es konnte auch festgestellt werden, dass es keinen Unterschied macht, ob die PmBs nach der Rückgewinnung im Ofen oder während der dritten Phase der Rückgewinnung im Rotationsverdampfer erwärmt werden.

In den T_{BTSV} vs. δ_{BTSV} Diagrammen können die alterungsbedingten Verschiebungen der T_{BTSV} hin zu höheren Werten und des δ_{BTSV} hin zu niedrigeren Werten sehr gut nachvollzogen werden. In den Black-Diagrammen, die mit den Ergebnissen des Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahrens (BTSV) erstellt wurden, sieht man einerseits die Effekte der Alterung durch die Rückgewinnung, da sich die Kurven hin zu niedrigeren δ_{BTSV} hin verschieben. Andererseits lassen sich die PmBs anhand ihrer spezifischen Kurvenverläufe gut den jeweiligen Herstellern zuordnen.

Die Ergebnisse der FTIR stimmen mit den Angaben der Hersteller in Bezug auf die verwendeten Modifikationen überein.

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse wird vorgeschlagen, den Nationalen Anhang der Norm SN EN 12697-3+A1:2020-08 «Rückgewinnung des Bindemittels: Rotationsverdampfer» [2] Ziffer 10 so umzuändern, dass sie sowohl von frischen als auch von rückgewonnenen PmBs eine Erwärmung auf 185 ± 5 °C für eine Dauer von $1 \text{ h} \pm 10$ min fordert. Diese Erwärmung sollte im Ofen erfolgen, bei rückgewonnenen PmBs kann sie aber auch direkt im Rotationsverdampfer passieren. Dieser Vorschlag wird mit den folgenden Argumenten begründet:

- BKW, die bei 180 °C und 200 °C PAT ermittelt wurden, zeigen nur sehr geringe oder keine Unterschiede.
- Es gibt keine Hinweise darauf, dass die PmBs bei diesen PAT thermisch geschädigt und ihre BKW verändert werden.
- Es ist unwahrscheinlich, dass die Polymere bei dieser Temperatur zerstört werden (siehe Kapitel 5.4).
- Es macht keinen nennenswerten Unterschied, ob die rückgewonnenen PmBs im Ofen oder im Rotationsverdampfer erwärmt werden.
- Die Ergebnisse des MSCR deuten darauf hin, dass die Erwärmung der PmBs auf 160 °C nicht hoch genug sein könnte.

- Nicht alle PmBs konnten bei 145 °C komplett ausgeschmolzen und homogenisiert werden und die Produkte mancher Hersteller sind sogar explizit für einen Gebrauch ab 180 °C konzipiert.
- Der Widerspruch zur SN EN 12594:2015-09 «Vorbereitung von Untersuchungsproben» [1] wird ausgeräumt.
- Der nicht näher definierte Begriff «hochviskos» wird entfernt.
- Das Verfahren wird vereinheitlicht und die Vergleichbarkeit zwischen den Laboren wird sichergestellt.

Der Ersatz der elastischen Rückstellung mit dem MSCR kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht empfohlen werden. Grund dafür sind einerseits die Ergebnisse dieses Forschungsprojekts, die auf eine Anhängigkeit der Rückformung (R) und der Nachgiebigkeit (J_{nr}) mit der PAT hindeuten. Andererseits steht der MSCR, wie er gemäss SN EN 16659:2016-09 «Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – MSCR-Prüfung (Multiple Stress Creep and Recovery Test)» [34] durchgeführt werden soll, in der wissenschaftlichen Fachliteratur in der Kritik. Stark modifizierte elastomere Bindemittel können mit dem MSCR nur eingeschränkt charakterisiert werden, die in der Norm geforderten Kriechspannungen entsprechen nicht den tatsächlichen Bedingungen auf den Strassen, die Wiederholbarkeit der Messungen und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse lässt zu wünschen übrig und die Prüfung kann physikalisch unmögliche Ergebnisse liefern (siehe Kapitel 7). Aus diesen Gründen ist noch weitere Forschung nötig, bevor über einen Ersatz der elastischen Rückstellung durch den MSCR nachgedacht werden sollte.

Résumé

Les normes suisses SN EN 12594:2015-09 « Bitumes et liants bitumineux – Préparation des échantillons d'essai » [1] et SN EN 12697-3+A1:2020-08 « Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai – Partie 3 : Extraction des bitumes à l'évaporateur rotatif » [2], contiennent des indications contradictoires concernant l'homogénéisation lors de la préparation des échantillons de liants modifiés par des polymères (PmBs). La norme SN EN 12594:2015-09 « Préparation des échantillons d'essai » [1] stipule que les PmBs, qu'ils soient frais ou récupérés, doivent être chauffés à une température comprise entre 180 °C et 200 °C lors de la préparation des échantillons. La norme SN EN 12697-3+A1:2020-08 « Extraction des bitumes à l'évaporateur rotatif » [2] exige, au paragraphe 8, une préparation du bitume conforme à la norme SN EN 12594:2015-09 « Préparation des échantillons d'essai » [1], mais stipule en même temps, dans l'annexe nationale au paragraphe 10, que la température peut être augmentée pour les liants à haute viscosité. Outre le fait que le terme « à haute viscosité » n'est pas défini plus précisément, le paragraphe 10 de l'annexe nationale entraîne une contradiction avec la norme SN EN 12594:2015-09 « Préparation des échantillons d'essai » [1] (Table 3). Dans la pratique, cette contradiction est traitée de différentes manières. Cela pose surtout des problèmes lorsque les caractéristiques des liants (CL) ne répondent pas aux exigences.

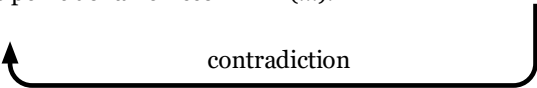
Contraction entre les normes	
SN EN 12594:2015-09 « Bitumes et liants bitumineux – Préparation des échantillons d'essai » [1]	SN EN 12697-3+A1:2020-08 « Méthodes d'essai – Partie 3: Extraction des bitumes à l'évaporateur rotatif » [2]
1 Domaine d'application: Cet avant-propos national s'applique aux bitumes et liants bitumineux. En outre il s'applique aux bitumes et liants bitumineux récupérés à partir de mélanges contenant du bitume selon la SN EN 12697-3+A1:2020-08 (...).	Chiffre 8: Préparer les échantillons de bitume conformément à EN 12594.
Chiffre 7.1.1: Si aucune recommandation n'est donnée pour les bitumes modifiés (...), la température de l'étuve doit être entre 180 °C et 200 °C, quel que soit le point de ramollissement.	Avant-propos national chiffre 10: En présence de liants très visqueux, il peut être nécessaire d'augmenter la température du liant récupéré (...).
 contradiction	

Tabelle 3: Aperçu des normes contradictoires

Dans les normes, on mentionne très souvent, en ce qui concerne les PmB, la mention « selon les indications du fabricant » pour les conditions d'essai. Si cette exigence peut encore être respectée pour les PmB neufs, il est en revanche beaucoup plus difficile, voire impossible dans certains cas, d'obtenir de telles informations pour les PmB recyclés. C'est pourquoi il est important que les laboratoires d'essai utilisent toujours la

même température de préparation des échantillons (TPE), car c'est le seul moyen de garantir la comparabilité des résultats.

On sait depuis longtemps que les contraintes thermiques contribuent de manière significative au vieillissement des liants. Dans la pratique, leur dépendance vis-à-vis de la TPE se manifeste par la variation de la CL entre les laboratoires d'essai qui, comme mentionné ci-dessus, utilisent des TPE différentes. La question se pose donc de savoir à quelle température la préparation des échantillons peut être effectuée sans altérer les polymères contenus dans le liant et ainsi empêcher un vieillissement artificiel de celui-ci.

Le terme « vieillissement » désigne généralement la modification des liants bitumineux au fil du temps. Cela s'explique par le fait que le bitume est un matériau organique soumis à des transformations chimiques constantes [3], dont les principales causes sont l'oxydation, la perte de composants légèrement volatils et la restructuration moléculaire [4] [5] [6]. Ces modifications chimiques entraînent à leur tour une altération de ses propriétés physiques et rhéologiques [7] [8]. Il a été démontré que le vieillissement d'un bitume est étroitement lié à ses paramètres physiques. La pénétration et la ductilité diminuent, tandis que la viscosité, le point de ramollissement et l'indice de pénétration (I_P) augmentent [9] [10] [11]. Ce durcissement et cette fragilisation favorisent la formation de fissures sous l'effet de charges dynamiques et du froid, l'apparition de sillons et les dommages dus à l'humidité, et réduisent la résistance à la fatigue [3] [8] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18].

La modification polymère du bitume constitue un moyen de retarder son vieillissement et d'en prolonger la durée de vie. Ce procédé consiste à ajouter des agents de modification au bitume ou à les incorporer dans sa structure [3] [19] qui ont une influence positive sur les propriétés rhéologiques et viscoélastiques du bitume liées au vieillissement [20] [21]. Cette méthode est particulièrement appréciée car elle est simple et relativement peu coûteuse.

La littérature scientifique spécialisée regorge d'études consacrées au vieillissement du bitume. Les chercheurs disposent de différentes méthodes d'essai pour simuler le vieillissement du bitume. Dans ces méthodes d'essai, le matériau à analyser est stocké à une température comprise entre 30 °C et plus de 100 °C pendant plusieurs heures, jours ou semaines [3] [22]. Après le vieillissement, diverses analyses rhéologiques, chimiques et morphologiques peuvent être effectuées et les propriétés physiques déterminées (par exemple : [3] [7] [8] [11] [22] [23] [24] [25] [26] [27]). À la lecture de la littérature scientifique, les points suivants ressortent particulièrement :

1. La recherche sur les bitumes hautement modifiés reste encore très limitée en raison de leur forte teneur en polymères et de leur degré élevé de vieillissement [22].
2. La recherche scientifique se concentre sur le vieillissement à long terme, c'est-à-dire sur les changements qui surviennent au cours des 10 à 20 années de durée de vie. La préparation des échantillons en laboratoire concerne toutefois le vieillissement à court terme.
3. Les paramètres les plus couramment utilisés en laboratoire, tels que la pénétration, le point de ramollissement anneau et bille (R+K), l' I_P et le retour élastique, sont relativement rarement pris en compte (par exemple : [8]).
4. Il est impossible de déterminer jusqu'à quelle température on peut chauffer les PmB sans les endommager thermiquement.

C'est sur ces points que porte ce projet de recherche. L'objectif était de déterminer jusqu'à quelle température les PmB peuvent être chauffés pendant la préparation des échantillons sans subir de dommages thermiques ni modifier les caractéristiques physiques et mécaniques. En se basant sur SN EN 14023:2010 « Cadre de spécifications des bitumes modifiés par des polymères » [28] tableau 2 et SN EN 13108-1:2022-09 « Mélanges bitumineux – Spécifications pour le matériau – Partie 1: Enrobés bitumineux » [29] tableau 1, huit types de PmB ont été sélectionnés, fournis par cinq fabricants. Parmi les huit types de PmB sélectionnés figurent à la fois des PmB hautement modifiés (H-PmB) et des PmB non hautement modifiés (NH-PmB ; voir chapitre 3.1). Au total, 21 PmB ont été analysés (Tabelle 4). La Abbildung 2 donne un aperçu du déroulement des travaux.

Aperçu des PmB examinés

PmB		Fabricant				
		1	2	3	4	5
NH-PmBs	PmB-E 25/55-65		X	X		(X)
	PmB-E 45/80-65	X	(X)*		X	
	PmB-E 65/105-60		<u>(X)</u>	X		X
	PmB-E 90/150-60	X		(X)		
H-PmBs	PmB 25/55-80		X	<u>(X)</u>		
	PmB 45/80-80	(X)	X			X
	PmB 65/105-80	(X)	X			
	PmB 90/150-80	X		X	(X)	

Tabelle 4: Aperçu des PmB examinés. X = seul le bitume frais a été testé; (X) = bitume frais et récupération avec chauffage au four; *italique* = série de tests supplémentaires qui n'ont pas été chauffés après la récupération; = série de tests supplémentaires qui ont été chauffés dans un évaporateur rotatif après la récupération; * = données supplémentaires disponibles pour une centrale d'enrobage

Pour chacun de ces 21 PmB, trois échantillons ont été analysés ; lors de la préparation des échantillons, ceux-ci ont été chauffés au four à 160 °C, 180 °C ou 200 °C. Les températures de 180 °C et 200 °C ont été choisies car elles sont définies dans la norme SN EN 12594:2015-09 « Préparation des échantillons d'essai » [1]. La température de 160 °C a été choisie car il est courant dans certains laboratoires de ne pas réchauffer les PmBs après leur récupération à 145 °C. La température de 220 °C n'a pas été retenue car elle est probablement déjà trop élevée (voir chapitre 5.4) et n'est que rarement, voire jamais, utilisée dans la pratique.

Afin d'obtenir des indications sur la composition chimique des PmB, une spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) a été réalisée sur les PmB frais, en complément des analyses CL, puis les résultats ont été comparés aux informations fournies par les fabricants concernant les polymères utilisés.

Lors de la sélection des PmB destinés à la récupération, on a veillé à ce que chaque variété de PmB et chaque fabricant soient représentés au moins une fois.

Après le mélange d'un AC 8 H, le mélange a été conservé à l'abri de la lumière et stocké à température ambiante pendant au moins une semaine, avant que les PmB ne soient récupérés et que les mêmes paramètres de qualité que pour les PmB frais, soient contrôlés.

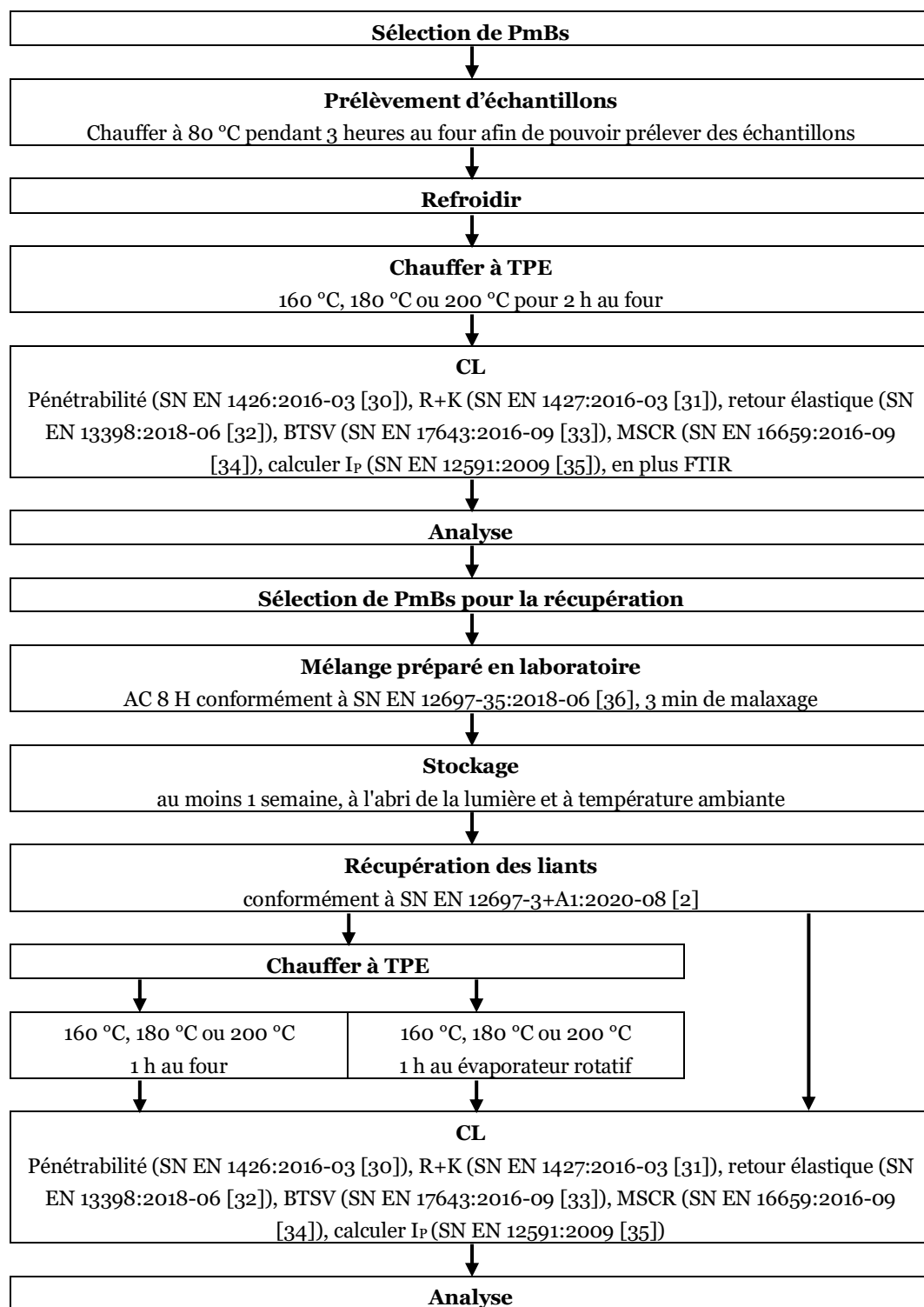


Abbildung 2: Aperçu du déroulement des opérations. BTSV = essai BTSV; I_p = indice de pénétration; MSCR = essai MSCR. Normes citées: SN EN 1426:2016-03 « Détermination de la pénétrabilité à l'aiguille » [30], SN EN 1427:2016-03 « Détermination du point de ramollissement – Méthode Bille et Anneau » [31], SN EN 12591:2009 « Spécifications des bitumes routiers » [35], SN EN 12697-3+A1:2020-08 « Extraction des bitumes à l'évaporateur » [2], SN EN 12697-35:2018-06 « Malaxage en laboratoire » [36], SN EN 13398:2018-06 « Détermination du retour élastique des bitumes modifiés » [32], SN EN 16659:2016-09 « Essai de fluage-recouvrance sous contraintes répétées (essai MSCR) » [34], SN EN 17643:2016-09 « Détermination de la température d'equi-module de rigidité et de l'angle de phase à l'aide d'un rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR) – Essai BTSV » [33]

Afin de déterminer si le mode de chauffage a une influence sur la CL des PmBs récupérés, des mélanges de laboratoire supplémentaires ont été préparés pour deux des PmBs sélectionnés pour la récupération ; les PmBs récupérés de ces mélanges n'ont pas été chauffés au four, mais directement dans le ballon rotatif à 160 °C, 180 °C ou 200 °C.

On a également vérifié s'il était judicieux de procéder à un réchauffage supplémentaire des PmBs après leur récupération. À cette fin, un mélange supplémentaire a été préparé en laboratoire à partir de cinq des PmBs sélectionnés pour la récupération, dont les PmBs n'ont pas été réchauffés une nouvelle fois après la récupération à 145 °C. Cette étape a non seulement permis d'ajouter une température supplémentaire à la série de tests, mais aussi de déterminer si un réchauffement supplémentaire après la récupération endommagerait thermiquement les PmBs.

À l'exception du test R+K et du test MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test), tous les essais ont été réalisés conformément à la norme. Pour le R+K, les trois valeurs individuelles d'une série d'essais ont été déterminées avec le même fluide d'essai afin d'améliorer la comparabilité des résultats. Pour le MSCR, conformément à la littérature scientifique, les contraintes de fluage des deux cycles d'essai ont été augmentées à 3,2 kPa et 10 kPa, bien que la norme prescrive 0,1 kPa et 3,2 kPa (voir chapitre 7).

Les résultats ont été analysés sous différents angles. Des diagrammes en boîte représentant les valeurs absolues ont été établis afin de mieux mettre en évidence les différences entre les trois TPE. Des diagrammes en boîte illustrant les écarts relatifs ont également été réalisés, en choisissant à chaque fois un TPE comme température de référence et en le comparant aux deux autres TPE. Les valeurs individuelles les plus élevées mesurées par série d'essais, les courbes de tendance et leurs pentes ont été analysées afin de déterminer s'il y avait une augmentation ou une diminution de la CL vers des TPE plus élevées. Afin de déterminer si ces tendances étaient statistiquement significatives, des analyses de régression ont été effectuées avec toutes les valeurs d'une CL. De plus, d'autres indicateurs statistiques tels que l'écart-type (SD), l'intervalle de confiance (KI) et le z-score ont été calculés. À partir des moyennes (MW) de chaque série d'essais, des différences ont été déterminées entre les PmBs frais et les PmBs récupérés, ainsi qu'entre les NH-PmBs et les H-PmBs. La différence maximale entre la valeur individuelle la plus élevée et la plus basse d'une série d'essais a été utilisée pour déterminer la dispersion des valeurs, afin de vérifier s'il existe une différence entre les NH-PmBs et les H-PmBs. Enfin, les résultats ont été comparés aux précisions de répétabilité (r) des normes correspondantes ainsi qu'aux essais interlaboratoires ROBIN de 2024 (ROBIN 2024) et VAB/ALA de 2022 (VAB/ALA 2022).

Les analyses ont montré que seuls les résultats du MSCR présentent un lien avec le TPE. Cela ressort clairement des observations suivantes :

- Les courbes de fluage-reprise, déterminées à 160 °C, présentent dans la plupart des cas les déformations de cisaillement les plus élevées. Celles-ci sont parfois même nettement plus élevées qu'aux TPE de 180 °C et 200 °C.
- Les analyses de régression des PmB frais révèlent une signification statistique pour $R_{3,2 \text{ kPa}}$ et une tendance à la signification statistique pour $R_{10 \text{ kPa}}$ et $J_{nr 3,2 \text{ kPa}}$.
- La plupart des valeurs situées en dehors de l'écart-type ont été déterminées à une TPE de 160 °C.

- La valeur individuelle la plus élevée mesurée a été déterminée dans 60 à 70 % des cas à une TPE de 160 °C.
- Les diagrammes en boîte montrent généralement des écarts plus importants à une TPE de 160 °C.

À l'inverse, la pénétration, le R+K, l'I_P, le retour élastique, le T_{BTSV} et le δ_{BTSV} ne sont pas influencés par le TPE. C'est dans le cas de la réinitialisation élastique que les valeurs varient le moins.

Il a été démontré que les PmB frais et régénérés présentent, dans la plupart des cas, des tendances très similaires et que les valeurs individuelles des H-PmB varient légèrement plus pour la plupart des CL que celles des NH-PmB.

Le nombre de PmB se situant dans les limites de la norme correspondante, du ROBIN 2024 et du VAB/ALA 2022 varie considérablement d'une CL à l'autre. Dans le cas du MSCR, cela s'explique par le fait que l'essai n'a pas été réalisé conformément à la norme. La plupart des résultats se situent toutefois dans les limites de la r ou juste en dehors. On peut en conclure que la dispersion des valeurs individuelles par série d'essais se situe dans les limites de l'incertitude de mesure de la méthode d'essai ou juste en dehors. Cela indique que les effets de la TPE ne sont pas suffisamment importants pour modifier fortement les CL, mais qu'ils augmentent néanmoins la dispersion des valeurs au point de nuire à la répétabilité.

Nous avons constaté que tous les PmB ne pouvaient pas être entièrement fondus et homogénéisés avec tous les TPE. Cela s'est avéré particulièrement problématique pour les PmB qui n'avaient pas été réchauffés après leur récupération à 145 °C. Les résultats obtenus avec ces PmB concordent toutefois bien avec ceux obtenus avec les PmB récupérés puis réchauffés.

On a également pu constater qu'il n'y a aucune différence entre le fait de chauffer les PmBs après la récupération dans le four ou pendant la troisième phase de la récupération dans l'évaporateur rotatif.

Les graphiques T_{BTSV} vs. δ_{BTSV} permettent de bien observer les variations liées au vieillissement : le T_{BTSV} tend vers des valeurs plus élevées, tandis que le δ_{BTSV} tend vers des valeurs plus faibles. Dans les diagrammes Black, établis à partir des résultats de la méthode rapide de caractérisation du bitume (BTSV), on observe d'une part les effets du vieillissement dus à la récupération, les courbes se décalant vers des valeurs δ_{BTSV} plus faibles. D'autre part, les PmB peuvent être facilement attribués à leurs fabricants respectifs grâce à leurs courbes spécifiques.

Les résultats de l'analyse FTIR concordent avec les informations fournies par les fabricants concernant les modifications apportées.

Au vu des conclusions tirées, il est proposé de modifier l'annexe nationale de la norme SN EN 12697-3+A1:2020-08 « Récupération du liant : évaporateur rotatif » [2] chiffre 10, de manière à exiger un chauffage à 185 °C ± 5 °C pendant une durée de 1 h ± 10 min, tant pour les PmB frais que pour les PmB récupérés. Ce chauffage devrait être effectué dans un four, mais pour les PmBs récupérés, il peut également avoir lieu directement dans l'évaporateur rotatif. Cette proposition est justifiée par les arguments suivants :

- Les valeurs de CL déterminées à 180 °C et 200 °C ne présentent que des différences très faibles, voire aucune.
- Rien n'indique que les PmBs subissent des dommages thermiques à ces températures et que leurs valeurs de CL soient modifiées.

- Il est peu probable que les polymères soient détruits à cette température (voir chapitre 5.4).
- Le fait que les PmBs récupérés soient chauffés dans un four ou dans un évaporateur rotatif ne fait pas de différence notable.
- Les résultats du MSCR suggèrent que le chauffage des PmBs à 160 °C pourrait ne pas être suffisant.
- Tous les PmBs n'ont pas pu être complètement fondus et homogénéisés à 145 °C, et les produits de certains fabricants sont même explicitement conçus pour une utilisation à partir de 180 °C.
- La contradiction avec la norme SN EN 12594:2015-09 « Préparation des échantillons d'essai » [1] est levée.
- Le terme « hautement visqueux », qui n'était pas défini plus précisément, est supprimé.
- La méthode est harmonisée et la comparabilité entre les laboratoires est garantie.

À l'heure actuelle, il n'est pas recommandé de remplacer la retour élastique par le MSCR. Cela s'explique d'une part par les résultats de ce projet de recherche, qui indiquent une dépendance de la recouvrance (R) et de la complaisance en fluage irréversible (J_{nr}) par rapport à la TPE. D'autre part, le MSCR, tel qu'il doit être réalisé conformément à la norme SN EN 16659:2016-09 « Essai MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test) » [34], fait l'objet de critiques dans la littérature scientifique spécialisée. Les liants élastomères fortement modifiés ne peuvent être caractérisés que de manière limitée par le MSCR, les contraintes de fluage exigées par la norme ne correspondent pas aux conditions réelles sur les routes, la répétabilité des mesures et la reproductibilité des résultats laissent à désirer et l'essai peut fournir des résultats physiquement aberrant (voir chapitre 7). Pour ces raisons, des recherches supplémentaires sont nécessaires avant d'envisager de remplacer la récupération élastique par le MSCR.

Summary

In the Swiss standards SN EN 12594:2015-09 “Bitumen and bituminous binders – Preparation of test samples” [1] and SN EN 12697-3+A1:2020-08 “Bituminous mixtures – Test methods – Part 3: Bitumen recovery: Rotary evaporator” [2], are contradictory statements regarding the homogenisation of polymer-modified binders (PmBs) during sample preparation. SN EN 12594:2015-09 “Preparation of test specimens” [1] determines that both fresh and recovered PmBs must be heated to between 180 °C and 200 °C during sample preparation. SN EN 12697-3+A1:2020-08 “Bitumen recovery: Rotary evaporator” [2] requires in section 8 that bitumen have to be prepared according to SN EN 12594:2015-09 “Preparation of test samples” [1], but at the same time determines in the National Annex, section 10, that the temperature can be increased for “highly viscous” binders. Apart from the fact that the term highly viscous” is not defined more precisely, the National Annex, section 10, leads to a contradiction with SN EN 12594:2015-09 “Preparation of test samples” [1] (Tabelle 5). In practice this contradiction is dealt with in different ways. This leads to problems particularly when the binder characteristics (BC) do not meet the requirements.

Conflict between standards

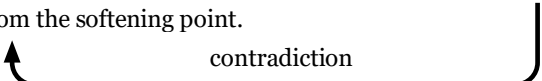
SN EN 12594:2015-09 «Bitumen and bituminous binders – Preparation of test samples» [1]	SN EN 12697-3+A1:2020-08 «Test methods – Part 3: Bitumen recovery: Rotary evaporator» [2]
1 Scope: This national foreword applies to bitumens and bituminous binders. It also applies to bitumens and bituminous binders that were recovered from bituminous mixtures in accordance with SN EN 12697-3+A1:2020-08 (...).	Paragraph 8: Prepare samples of bitumen in accordance with EN 12594.
Paragraph 7.1.1: If no guidance is provided for polymer modified bitumen (...), the temperature of the oven must be within 180 °C to 200 °C, irrespective from the softening point.	National foreword paragraph 10: For highly viscous binders an increase in the temperature of the recovered bitumen might be necessary.
 contradiction	

Tabelle 5: Overview of conflicting standards

In standards relating to PmBs, the phrase “in accordance with the manufacturer’s specifications” is frequently used when referring to test conditions. Whilst this requirement can still be met for fresh PmBs, it is considerably more difficult – and in some cases even impossible – to obtain such information for recovered PmBs. For this reason, it is important that testing laboratories always use the same sample preparation temperature (SPT), as this is the only way to ensure the comparability of results.

It has long been known that thermal stress plays a significant role in the ageing of binders. In practice, its dependence on the SPT is evident in the variation in BC values among testing laboratories, which, as mentioned above, use different SPT. The question therefore arises to which temperature sample preparation can take place without altering the polymers contained in the binder and thus preventing artificial ageing of the binder.

The term “ageing” generally refers to the changes that bituminous binders undergo over time. This is because bitumen is an organic material that is constantly subject to chemical changes [3], with oxidation, the loss of highly volatile components and molecular restructuring being the main causes [4] [5] [6]. These chemical changes, in turn, result in alterations to its physical and rheological properties [7] [8]. It has been shown that the ageing of bitumen is closely related to its physical parameters. Penetration and ductility decrease, whilst viscosity, softening point and penetration index (I_P) increase [9] [10] [11]. This hardening and embrittlement leads to the formation of cracks under dynamic loading and exposure to cold, rutting and moisture damage, and reduces resistance to fatigue [3] [8] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18].

One way of delaying the ageing of bitumen and extending its service life is through polymer modification. This involves adding modifiers to the bitumen or incorporating them into the bitumen structure [3] [19], which have a positive influence on the ageing-related, rheological and viscoelastic properties of the bitumen [20] [21]. This method is particularly popular as it is simple and comparatively inexpensive.

The scientific literature contains many studies that have examined the ageing of bitumen. Researchers have various test methods at their disposal to simulate the ageing of bitumen. In these test methods, the investigated material is stored at temperatures ranging from 30 °C to over 100 °C for several hours, days or weeks [3] [22]. Following ageing, various rheological, chemical and morphological analyses can be carried out and the physical properties determined (e.g.: [7] [3] [8] [11] [22] [23] [24] [25] [26] [27]). When studying the scientific literature, the following points are particularly striking:

1. Research about highly modified bitumen remains very limited due to the high polymer content and the high degree of ageing [22].
2. The scientific focus is on long-term ageing, i.e. changes that occur over the 10 to 20-year service life. However, sample preparation in the laboratory concerns short-term ageing.
3. The most common test parameters in laboratory practice, such as penetration, the ring and ball softening point (R+K), the I_P and elastic recovery, are comparatively rarely considered (e.g.: [8]).
4. It is not possible to answer the question of how high PmBs can be heated without causing thermal damage.

This research project addresses these issues. The aim was to determine the maximum temperature to which PmBs can be heated during sample preparation without causing thermal damage or altering the BC. Based on SN EN 14023:2010 «Specification framework for polymer modified bitumens» [28] table 2 and SN EN 13108-1:2022-09 «Bituminous mixtures – Material specifications – Part 1: Asphalt concrete» [29] table 1, eight PmB types were selected, which were provided by five manufacturers. The eight selected PmB types include both highly modified PmBs (H-PmBs) and non-highly modified PmBs (NH-PmBs; see Chapter 3.1). A total of 21 PmBs were examined (Tabelle 6). Abbildung 3 provides an overview of the workflow.

Three samples were analysed from each of these 21 PmBs. During sample preparation, these were heated in the oven to 160 °C, 180 °C or 200 °C respectively. 180 °C and 200 °C were chosen because they are specified in SN EN 12594:2015-09 «Preparation of test samples» [1]. 160 °C was chosen because it is common practice in some

Overview of the PmBs examined

PmB		Producer				
		1	2	3	4	5
NH-PmBs	PmB-E 25/55-65		X	X		(X)
	PmB-E 45/80-65	X	(X)*		X	
	PmB-E 65/105-60		<u>(X)</u>	X		X
	PmB-E 90/150-60	X		(X)		
H-PmBs	PmB 25/55-80		X	<u>(X)</u>		
	PmB 45/80-80	(X)	X			X
	PmB 65/105-80	(X)	X			
	PmB 90/150-80	X		X	(X)	

Tabelle 6: Overview of the PmBs examined. X = Only fresh bitumen tested; (X) = Fresh bitumen and recovery with heating in the oven; *italics* = additional test series that was not heated after recovery; = additional test series that was heated in the rotary evaporator after recovery; * = Additional data from a mixing plant available

laboratories not to reheat PmBs after recovery at 145 °C. 220 °C was not chosen because this temperature is presumably already too high (see Chapter 5.1) and is rarely, if ever, used in practice.

To obtain information on the chemical composition of the PmBs, Fourier-transform-infrared-spectroscopy (FTIR) was carried out on the fresh PmBs in addition to the BC analysis, and the results were compared with the manufacturers' specifications regarding the polymers used.

When selecting the PmBs for recovery, care was taken to ensure that each PmB type and each manufacturer was represented at least once.

After mixing an AC 8 H, the mixture was protected from light and stored at room temperature for at least one week before the PmB was recovered and the same BC as for the fresh PmBs were tested.

To determine whether the method of heating affects the BC of the recovered PmBs, additional laboratory mixtures were prepared for two of the PmBs selected for recovery. In these batches, the recovered PmBs were not heated in the oven but directly in the rotary evaporator during the third phase of recovery to 160 °C, 180 °C or 200 °C.

It was also investigated whether additional heating of the PmBs after recovery is beneficial at all. Therefore, an additional laboratory mixture was prepared for five of the PmBs selected for recovery, and the PmBs were not reheated at 145 °C after recovery. This step not only added a further temperature to the test series but also made it possible to determine whether further heating after recovery causes thermal damage to the PmBs.

Except for the R+K and the Multiple Stress Creep and Recovery Test (MSCR), all tests were carried out according to the standards, respectively. For the R+K, all three individual values in a test series were determined using the same test fluid to ensure better comparability of the results. For the MSCR, based on the scientific literature, the creep stresses for the two test cycles were increased to 3.2 kPa and 10 kPa, although the standard specifies 0.1 kPa and 3.2 kPa (see Chapter 7).

The results were analysed under various aspects. Boxplots of the absolute values were created for a better identification of the differences between the three SPT. Boxplots of the relative deviations were also created by selecting one SPT as the reference temper-

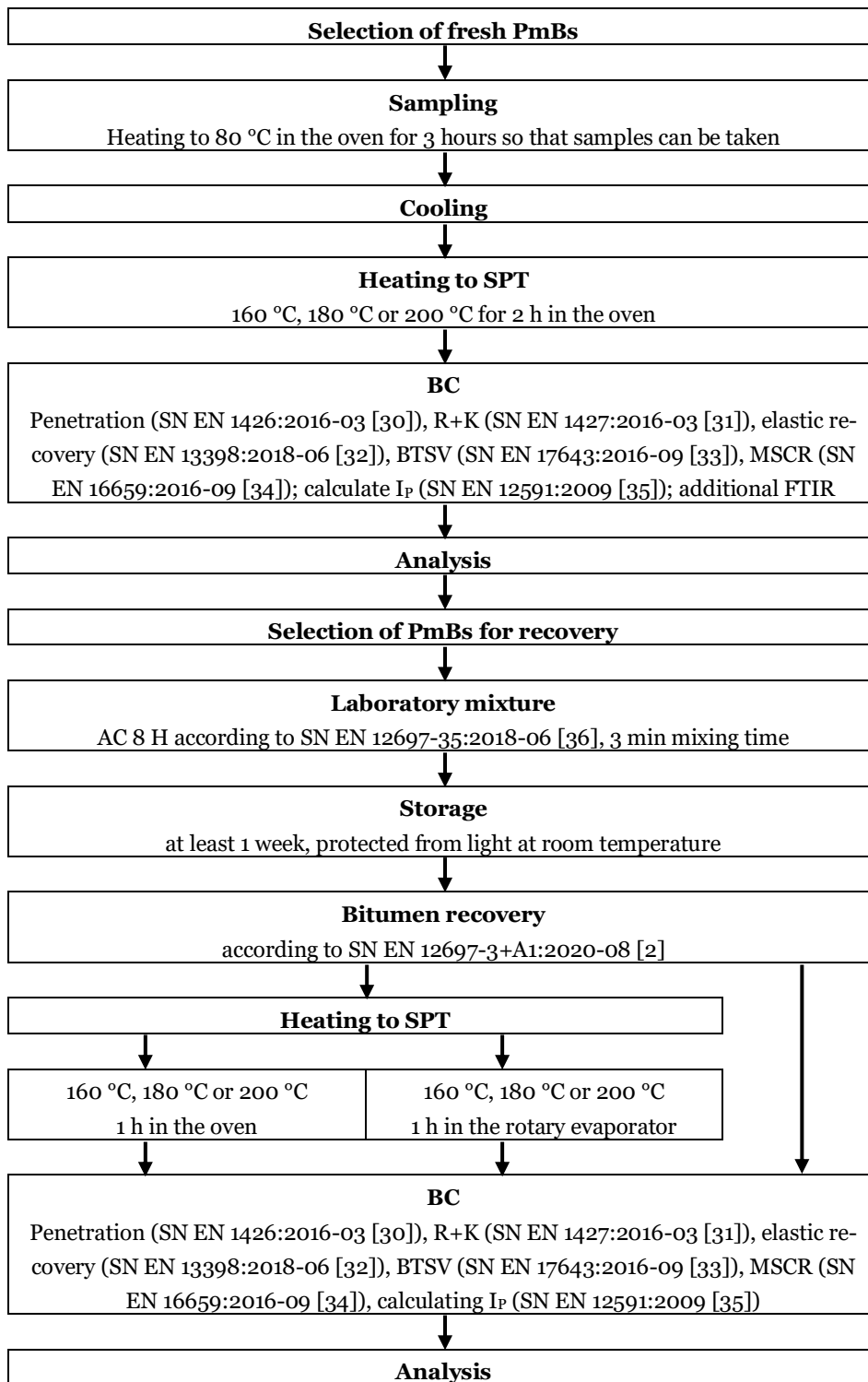


Abbildung 3: Overview of the workflow. BTSV = Binder-Fast-Characterization-Test; I_p = penetration index; MSCR = Multiple Stress Creep and Recovery Test. Cited standards: SN EN 1426:2016-03 «Determination of needle penetration» [30], SN EN 1427:2016-03 «Determination of softening point – Ring and Ball method» [31], SN EN 12591:2009 «Specifications for paving grade bitumens» [35], SN EN 12697-3+A1:2020-08 «Bitumen recovery: Rotary evaporator» [2], SN EN 12697-35:2018-06 «Laboratory mixing» [36], SN EN 13398:2018-06 «Determination of the elastic recovery of modified bitumen» [32], SN EN 16659:2016-09 «Multiple Stress Creep and Recovery Test (MSCRT)» [34], SN EN 17643:2016-09 «Determination of equi-shear modulus temperature and phase angle using a Dynamic Shear Rheometer (DSR) – BTSV test» [33]

ature and comparing it with the other two SPT. The highest individual values measured per test series, trend lines and their slopes were analysed to determine whether there was an increase or decrease in BC towards higher SPT. To ascertain whether these trends were statistically significant, regression analyses were performed using all values from a BC. In addition, further statistical measures such as the standard deviation (SD), the confidence interval (KI) and the z-score were calculated. Using the mean values (MW) of each test series, differences were determined between the fresh and recovered PmBs, and between NH-PmBs and H-PmBs. The maximum difference between the highest and lowest individual values in a test series was used to determine the dispersion of the values, to establish whether there is a difference between NH-PmBs and H-PmBs. Finally, the results were compared with the repeatability values (r) of the standards, respectively, as well as the interlaboratory tests ROBIN from 2024 (ROBIN 2024) and VAB/ALA from 2022 (VAB/ALA 2022).

The investigations showed that only the MSCR results correlate with the SPT. This is evident from the following findings:

- The creep-recovery curves determined at 160 °C show the highest shear strains in most cases. In some cases, these are even significantly higher than at 180 °C and 200 °C SPT.
- The regression analyses of the fresh PmBs yield statistical significance for $R_{3.2 \text{ kPa}}$ and a trend towards statistical significance for $R_{10 \text{ kPa}}$ and $J_{nr 3.2 \text{ kPa}}$.
- Most values lying outside the SD were determined at 160 °C SPT.
- The highest measured individual value was determined in 60–70 % of cases at a SPT of 160 °C.
- The boxplots generally show greater differences at 160 °C SPT.

In contrast, penetration, $R+K$, I_P , elastic recovery, T_{BTSV} and δ_{BTSV} are not affected by SPT. Elastic recovery shows the smallest changes in values.

It has been shown that fresh and recovered PmBs exhibit very similar trends in most cases, and that the individual values for H-PmBs vary slightly more across most BC than those for NH-PmBs.

The number of PmBs falling within the r of the relevant standard, ROBIN 2024 and VAB/ALA 2022 varies significantly depending on the BC. In the case of the MSCR, this can be explained by the fact that the test was not carried out in accordance with the standard. However, most results lie within or just outside the r . It can therefore be concluded that the variation in individual values per test series lies within or only slightly outside the measurement uncertainty of the test method. This suggests that the effects of the SPT are not large enough to significantly alter the BC but do increase the variation in the values to such an extent that repeatability is impacted.

We found out that not all PmBs can be completely melted and homogenised at all SPT. This was particularly problematic for PmBs that were not reheated after recovery at 145 °C. However, the results for these PmBs correspond well with those for the reheated recovered PmBs.

It was also found out that it makes no difference whether the PmBs are heated in the oven after recovery or during the third phase of recovery in the rotary evaporator.

The T_{BTSV} vs. δ_{BTSV} plots clearly illustrate the age-related shifts in T_{BTSV} towards higher values and in δ_{BTSV} towards lower values. The Black diagrams, which were generated using the results of the Binder-Fast-Characterization-Test (BTSV), show on the one hand the effects of ageing due to recovery, as the curves shift towards lower δ_{BTSV}

values. On the other hand, the PmBs can be clearly attributed to their respective manufacturers based on their specific curve profiles.

The FTIR results are consistent with the manufacturers' specifications regarding the used modifications.

Due to the findings, it is proposed that the national annex to standard SN EN 12697-3+A1:2020-08 "Recovery of the binder: Rotary evaporator" [2], section 10, should require a heating of both fresh and recovered PmBs to 185 ± 5 °C for a duration of $1 \text{ h} \pm 10 \text{ min}$. This heating should take place in an oven; however, in the case of recovered PmBs, it may also take place directly in the rotary evaporator. This proposal is justified by the following arguments:

- The BC values determined at 180 °C and 200 °C show only very slight or no differences.
- There is no evidence that the PmBs are thermally damaged at these temperatures and that their BC values are altered.
- It is unlikely that the polymers will be destroyed at this temperature (see Chapter 5.4).
- It makes no significant difference whether the recovered PmBs are heated in an oven or in a rotary evaporator.
- The results of the MSCR suggest that heating the PmBs to 160 °C may not be high enough.
- Not all PmBs could be completely melted and homogenised at 145 °C, and some manufacturers' products are even explicitly designed to be used at temperatures of 180 °C and above.
- The contradiction with SN EN 12594:2015-09 "Preparation of test specimens" [1] would be resolved.
- The undefined term "highly viscous" would be removed.
- The procedure would be standardised and the comparability between laboratories ensured.

Replacing the elastic recovery with the MSCR cannot be recommended now. The reasons for this are, on the one hand, the results of this research project, which suggest that the recovery (R) and the non-recoverable creep compliance (J_{nr}) are dependent on the SPT. On the other hand, the MSCR, as it is to be carried out in accordance with SN EN 16659:2016-09 «Multiple Stress Creep and Recovery Test (MSCRT)» [34] has been criticised in the scientific literature. Heavily modified elastomeric binders can only be characterised to a limited extent using the MSCR, the creep stresses required by the standard do not correspond to actual road conditions, the repeatability of the measurements and reproducibility of the results leave much to be desired, and the test can yield physically impossible results (see Chapter 7). For these reasons, further research is required before any consideration should be given to replacing elastic recovery with the MSCR.

1 Einleitung

In den Schweizer Normen gibt es unterschiedliche Vorgaben, was den Temperaturbereich zur Homogenisierung während der Probenaufbereitung von PmBs betrifft. Die SN EN 12594:2015-09 «Vorbereitung von Untersuchungsproben» [1] legt fest, dass PmBs, egal ob frisch oder rückgewonnen, bei der Probenaufbereitung auf 180 °C bis 200 °C aufgewärmt werden müssen. Die SN EN 12697-3+A1:2020-08 «Rückgewinnung des Bindemittels: Rotationsverdampfer» [2] fordert zwar in Ziffer 8 eine Bitumenvorbereitung gemäss SN EN 12594:2015-09 [1], im Nationalen Anhang wird aber festgelegt, dass die Temperatur bei hochviskosen Bindemitteln erhöht werden kann. Zum einen wird der Begriff «hochviskos» nicht näher definiert, zum anderen entsteht ein Widerspruch mit der SN EN 12594:2015-09 [1] (Tabelle 7). In der Praxis wird mit dieser Problematik unterschiedlich umgegangen, was vor allem bei Lieferanten und Asphaltproduzenten zu Diskussionen führt, sobald die BKW nicht den Anforderungen entsprechen. Von diesem Problem sind sowohl Frischbitumen als auch rückgewonnene PmBs betroffen.

Widerspruch der Normen

SN EN 12594:2015-09

«Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Vorbereitung von Untersuchungsproben» [1]

1 Geltungsbereich: Dieses Nationale Vorwort gilt für Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel. Es gilt ausserdem für Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel, die aus bitumenhaltigen Gemischen gemäss SN EN 12697-3+A1:2020-08 (...) zurückgewonnen wurden (...)

Ziffer 7.1.1: Falls für polymermodifizierte Bitumen (...) keine Anleitung zur Verfügung steht, muss die Temperatur der Wärmekammer unabhängig vom Erweichungspunkt im Bereich von 180 °C bis 200 °C liegen.

SN EN 12697-3+A1:2020-08

«Asphalt – Prüfverfahren – Teil 3: Rückgewinnung des Bindemittels: Rotationsverdampfer» [2]

Ziffer 8: Die Bitumenproben werden nach EN 12594 vorbereitet.

Nationaler Anhang Ziffer 10: Bei hochviskosen Bindemitteln kann eine Erhöhung der Temperatur des rückgewonnenen Bindemittels erforderlich sein.

Widerspruch

Tabelle 7: Übersicht über die sich widersprechenden Normen

Der in den Normen häufig genannte Zusatz «gemäss Angaben Hersteller» wird oft in Bezug auf die Prüfbedingungen bei PmBs genannt. Bei Frischbitumen kann das noch umgesetzt werden, bei rückgewonnenen PmBs gibt es allerdings kaum eine Möglichkeit, an solche Informationen zu kommen. Dementsprechend ist es wichtig, dass Prüflabore immer dieselbe PAT verwenden, damit die Ergebnisse untereinander vergleichbar sind. Die Frage nach der richtigen PAT bei PmBs ist allerdings alles andere als trivial. Generell kann die Erwärmung von Bitumen eine Alterung dessen verursachen, und somit auch die BKW verändern. Die Praxis hat gezeigt, dass die PAT einen massiven Einfluss auf die Prüfergebnisse haben kann, was sich anhand der starken

Variation der BKW unter den Prüflaboratorien zeigt. Somit stellt sich bei PmBs grundsätzlich die Frage, bei welcher Temperatur die Probeaufbereitung durchgeführt werden kann, ohne die Polymere zu verändern und eine thermische Schädigung des Bindemittels zu verhindern.

In diesem Forschungsprojekt wurde versucht, die folgenden zwei Fragen zu beantworten:

1. Hat die PAT einen Einfluss auf die BKW von PmBs, und wenn ja, wie gross ist dieser?
2. Bis zu welcher Temperatur können PmBs während der Probeaufbereitung im Labor erwärmt werden, ohne eine thermische Schädigung, und damit eine Veränderung der BKW zu verursachen?

Um diese Fragen zu beantworten, wurden acht PmB-Sorten geprüft, die von fünf Herstellern zur Verfügung gestellt wurden. Insgesamt wurden 21 Frischbitumen untersucht, von denen jeweils eine Probe während der Probeaufbereitung im Ofen auf 160 °C, 180 °C oder 200 °C aufgewärmt wurde, bevor die BKW ermittelt wurden. Ermittelt wurden die Penetration, der R+K, die elastische Rückstellung, T_{BTSV} , δ_{BTSV} , sowie die R und die J_{nr} . Auch der I_P wurde berechnet.

Im Anschluss wurden acht PmBs ausgewählt, mit denen eine Labormischung für die Rückgewinnung hergestellt wurde. Bei der Auswahl dieser PmBs wurde darauf geachtet, dass jede PmB-Sorte und jeder Hersteller mind. einmal vertreten sind. Nach der Rückgewinnung wurden diese PmBs ebenfalls im Ofen auf 160 °C, 180 °C oder 200 °C erwärmt und dieselben BKW wie bei den frischen PmBs ermittelt und mit diesen verglichen. Bei zwei dieser acht PmBs wurden weitere Labormischungen hergestellt, deren rückgewonnene PmBs nicht im Ofen, sondern während der dritten Phase der Rückgewinnung direkt im Rotationsverdampfer auf 160 °C, 180 °C oder 200 °C erhitzt wurden. Bei fünf dieser PmBs wurde noch eine weitere Labormischung hergestellt, dessen rückgewonnene PmBs nach der Rückgewinnung bei 145 °C nicht nochmal erwärmt, sondern direkt weiterverarbeitet wurden.

Basierend auf den Ergebnissen wurden Vorschläge für eine Normenüberarbeitung und -harmonisierung erarbeitet, um eine Vereinheitlichung unter den Schweizer Prüflaboratorien zu garantieren und um die Genauigkeit und Vergleichbarkeit der Prüfergebnisse zu verbessern.

In den letzten Jahren sind Prüfungen mit dem dynamischen Scherrheometer (DSR) immer häufiger geworden, da es die rheologischen Eigenschaften eines Bindemittels, besonders von PmBs, besser beschreibt als die altbekannten Kennwerte (z.B.: [37] [38] [39] [40] [41]). Manche Wissenschaftler sind sogar der Meinung, dass das DSR in der Lage ist, alle momentan üblichen Prüfmethoden gleichwertig, oder sogar besser, zu ersetzen, da es eine komplette physikalische Bitumenanalyse ermöglicht [42].

Ein Ersetzen des R+K durch das BTSV wird schon seit längerem von Bindemittellieferanten und Belagswerken gefordert, weil bereits diverse Kantone diese Prüfungen bei der Qualitätsüberwachung fordern. Mit dem momentan laufenden VSS-Analysenprojekt 2024_A_312 sollen Anforderungswerte für das BTSV definiert werden.

Eine weitere klassische Prüfmethode, die durch das DSR abgelöst werden könnte, ist die elastische Rückstellung. Mit dem MSCR kann einerseits die R bestimmt werden, mit der das Vorhandensein einer elastischen Reaktion bei bitumenhaltigen Bindemitteln und deren Spannungsabhängigkeit bestimmt werden können. Andererseits kann

mit der J_{nr} auf die Empfindlichkeit eines bitumenhaltigen Bindemittels gegenüber bleibenden Verformungen und deren Spannungsabhängigkeit geschlossen werden [34]. Mit dem (MSCR) kann auch das Vorhandensein und die Kapazität eines Polymernetzwerks festgestellt werden [43], was wiederum Hinweise auf die Änderung des Polymernetzwerks während der Alterung geben könnte. Anforderungswerte für den MSCR wurden bis dato noch nicht festgelegt. Die Ergebnisse dieses Forschungsprojekts sollen eine wichtige Hilfestellung sein, wenn es um die Festlegung von Anforderungswerten für den MSCR geht.

2 Grundlagen

Im Allgemeinen versteht man unter dem Begriff «Alterung» die Veränderung eines bituminösen Bindemittels mit der Zeit. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass es sich bei Bitumen um ein organisches Material handelt, dass ständigen chemischen Veränderungen unterliegt [3]. Diese chemischen Veränderungen führen wiederum zu einer Veränderung der physikalischen und rheologischen Eigenschaften des Bindemittels [7] [8], die zu einer Versprödung und Abnahme der Klebkraft führen [4] [5] [7] [8] [12] [24] [44]. Neben zahlreichen anderen Auslösern dieser Veränderungen (siehe [3] [7] [8] [22] [24] [42] [45] [46] [47]) zählen oxidative Prozesse verursacht durch Wärme und UV-Strahlung, Polymerdegradation und der Verlust leicht flüchtiger Bestandteile und zu den Hauptverursachern, die eine molekulare Umstrukturierung des Bitumens herbeiführen [4] [5] [6] [46], aber auch die Art des Grundbitumens, die Charakteristiken der Polymere und die Bitumenproduktion können einen Einfluss auf die Bindemittelalterung haben [8] [26].

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen der Kurzzeit- und der Langzeitalterung. Die Kurzzeitalterung, zu der auch die Probeaufbereitung im Labor gehört, macht ca. die Hälfte der Gesamtalterung aus. Sie kann schon innerhalb weniger Stunden während der Bitumenproduktion in der Raffinerie, der Lieferung und Lagerung, der Mischgutherstellung, dessen Transport zur Baustelle und während des Einbaus passieren [3] [7] [24] [48]. Die Gründe für die Kurzzeitalterung sind vielfältig. Zum einen hat die Bitumenqualität einen Einfluss darauf, zum anderen aber auch der Umstand, dass das Bitumen hohen Temperaturen ausgesetzt wird, welche die chemischen Modifikationen beschleunigen. Abgesehen davon sorgt die grosse spezifische Oberfläche dafür, dass das Bitumen mit mehr Sauerstoff in Kontakt kommen kann, was wiederum die oxidativen Vorgänge beschleunigt und leicht flüchtige Bestandteile verdampfen lässt [3] [46] [49] [50] [51]. Gegenüber der Kurzzeitalterung steht die Langzeitalterung, die in den folgenden 10 bis 20 Jahren während der Nutzungsdauer des Bitumens in der Strasse stattfindet [3] [7] [24] [46] [51].

Die Gebrauchstauglichkeit des Belags wird erheblich durch die Alterung des Bitumens verringert, weil die Verhärtung und Versprödung des Bitumens die Bildung von Rissen unter dynamischer Belastung und Kälteeinwirkung begünstigt, die Beständigkeit gegen Ermüdung herabsetzt und Furchenbildung und Feuchtigkeitsschäden begünstigt [3] [8] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18].

Die Effekte der Bitumenalterung sind schon lange bekannt und ein zentrales Thema in der Wissenschaft [52] [53] [54]. Es konnte gezeigt werden, dass die Alterung eines Bitumens sehr gut mit seinen physikalischen Parametern, z.B.: der Verringerung der Penetration und Duktilität und der Erhöhung des Erweichungspunkts, der Viskosität und des I_p korreliert [9] [10] [11].

Forschenden, die sich mit der Alterung von Bitumen beschäftigen, stehen verschiedene Testmethoden zur Verfügung, mit denen die Alterung des Bitumens simuliert werden kann. Das Ziel dabei ist es, die oxidativen Vorgänge zu beschleunigen, indem das Material unter erhöhten Temperaturen (30 bis > 100 °C) über mehrere Stunden, Tage oder Wochen gelagert wird [3] [22]. Zu den häufigsten Prüfungen, mit denen die Alterung von Bitumen simuliert wird, gehören das RTFOT-Verfahren (Rolling Thin Film

Oven Test; SN EN 12607-1:2017-09 «RTFOT-Verfahren» [55]), das TFOT-Verfahren (Thin Film Oven Test; SN EN 12607-2:2017-09 «TFOT-Verfahren» [56]), das RFT-Verfahren (Rotating Flask Test; SN EN 12607-3:2017-09 «RFT-Verfahren» [57]), das PAV-Verfahren (Pressure Ageing Vessel; SN EN 14769:2013-09 «Beschleunigte Langzeit-Alterung mit einem Druckalterungsbehälter (PAV)» [58]), das LT RFT-Verfahren (Long Term RFT), das MRTFOT-Verfahren (Modifizierter RTFOT) oder das NRTFOT-Verfahren (Nitrogen Rolling Thin Film Oven Test). Die Dauer der angewendeten Alterungsverfahren der eben genannten Testmethoden ist zum Teil sehr lang. Der Fokus der Wissenschaft liegt also eher auf der Langzeitalterung.

Nach der Alterung werden eine Reihe verschiedenster rheologischer, chemischer und morphologischer Untersuchungen am Bitumen durchgeführt und mit dem Frischbitumen verglichen. Zu diesen Untersuchungen gehören Fluoreszenzmikroskopie, FTIR und verschiedene Arten von Chromatographie (z.B.: [3] [7] [8] [11] [22] [23] [24] [26] [27]). Auch Unterschiede in der Zusammensetzung und den physikalischen Eigenschaften von gealtertem und nicht gealtertem Material wurden untersucht [59]. Die in der Laborpraxis häufigsten Anforderungswerte wie die Penetration, der R+K, der I_p und die elastische Rückstellung werden aber vergleichsweise selten geprüft bzw. verglichen (z.B.: [8]).

Die Polymermodifikation eines Bitumens ist eine von mehreren Möglichkeiten, die Veränderungen während des Alterns zu reduzieren, und die Lebenserwartung des Bitumens zu verlängern. Dieses Verfahren ist besonders beliebt, weil es eine einfache und vergleichsweise kostengünstige Methode ist. Bei einer solchen Modifikation werden dem Bitumen Modifizierungsmittel zugesetzt bzw. in die Bitumenstruktur eingearbeitet [3] [19], die allesamt einen positiven Einfluss auf die alterungsbedingten, rheologischen und viskoelastischen Eigenschaften des Bitumens haben [20] [21]. Die Effekte, die Polymere auf die oxidative Alterung eines Bitumens haben sind nach wie vor unklar [26] [59] [60] [61] [62] [63] [64] [65] [66] [67] [68] [69], da sie vor allem von den Wechselwirkungen zwischen den Polymeren und dem Bitumen abhängen, die wiederum von deren chemischen Zusammensetzung abhängig sind. Das Bitumen und die Polymerphase unterliegen verschiedenen Alterungsmechanismen, daher bleibt es schwierig, einen einzigen Alterungsmechanismus zu identifizieren, der für alle PmBs gültig ist [70]. Erschwerend hinzu kommt, dass die Forschung über hochmodifizierte Bitumen aufgrund des hohen Polymeranteils und des hohen Alterungsgrads immer noch sehr begrenzt ist [22]. Die Frage, wie hoch man PmBs erhitzen darf, ohne eine zusätzliche Alterung zu provozieren, kann durch den aktuellen Stand der Forschung nicht beantwortet werden.

3 Methodik

3.1 Begriffe

Die Einteilung in nicht höhermodifizierte, höhermodifizierte und hochmodifizierte PmBs erfolgte anhand der elastischen Rückstellung. PmBs mit der Bezeichnung -60 und -65 werden als «nicht höhermodifizierte PmBs» (NH-PmBs), und PmBs mit der Bezeichnung -80 als «höhermodifizierte PmBs» (H-PmBs) bezeichnet. Hochmodifizierte PmBs mit der Bezeichnung -85 wurden in diesem Forschungsprojekt nicht behandelt.

Die «Differenz» bezeichnet den Unterschied zwischen dem höchsten und dem tiefsten Einzelwert einer Prüfserie.

Wenn von «rückgewonnenen PmBs» die Rede ist, sind sowohl diejenigen, die im Ofen, also auch diejenigen, die im Rotationsverdampfer erhitzt wurden, gemeint. Wenn im Folgenden nur auf eine dieser beiden Gruppen Bezug genommen wird, wird es explizit erwähnt, z.B.: mit dem Zusatz «Rotationsverdampfer».

Bei der SD spricht man i.d.R. erst dann von einem «Ausreisser», wenn der Wert ausserhalb der zwei- oder dreifachen SD liegt. In diesem Forschungsprojekt wurde aber mit Werten gearbeitet, die ausserhalb der einfachen SD liegen. Da der Begriff «Ausreisser» eine starke Abweichung vom MW impliziert, werden im Folgenden Werte, die ausserhalb der SD liegen, als «Randwerte» bezeichnet. Der Begriff «Ausreisser» bezieht sich nur auf diejenigen Werte, die bei den Boxplots ausserhalb des 1.5-fachen Interquartilabstands, und damit weit weg vom MW, liegen.

Eine «Prüfserie» besteht aus den drei Werten, die bei 160 °C, 180 °C und 200 °C PAT ermittelt wurden, und bezieht sich immer nur auf ein PmB. Die drei Werte werden im Folgenden als «Einzelwerte» bezeichnet.

3.2 Auswahl der PmBs

Die Auswahl der PmBs orientierte sich einerseits an SN EN 14023:2010 «Rahmenwerk für die Spezifikation von polymermodifizierten Bitumen» [28] (Tabelle 2, PmB-Sorten für den Anwendungsbereich «erhöht» CH-E) und SN EN 13108-1:2022-09 «Mischgut-anforderungen – Teil 1: Asphaltbeton» [29] (Tabelle 1, Sorten, die in der Regel zu verwenden sind), andererseits sollten auch H-PmBs untersucht werden. Insgesamt wurden acht PmB-Sorten geprüft, die von fünf Herstellern zur Verfügung gestellt wurden. Im Folgenden werden diese Hersteller als Hersteller 1 bis 5 bezeichnet. Insgesamt wurden 21 PmBs geprüft. Tabelle 8 gibt einen Überblick über die untersuchten PmBs. Hochmodifizierte PmBs mit der Bezeichnung -85 wurden in dieser Forschung nicht berücksichtigt, weil sie in der Arbeit von [71] ausführlich behandelt werden.

Übersicht über die untersuchten PmBs

PmB		Hersteller				
		1	2	3	4	5
NH-PmBs	PmB-E 25/55-65		X	X		(X)
	PmB-E 45/80-65	X	(X)*		X	
	PmB-E 65/105-60		<u>(X)</u>	X		X
	PmB-E 90/150-60	X		(X)		
H-PmBs	PmB 25/55-80		X	<u>(X)</u>		
	PmB 45/80-80	(X)	X			X
	PmB 65/105-80	(X)	X			
	PmB 90/150-80	X		X	(X)	

Tabelle 8: Übersicht über die untersuchten PmBs. X = Nur Frischbitumen geprüft; (X) = Frischbitumen und Rückgewinnung mit Erwärmung im Ofen; *kursiv* = zusätzliche Prüfsérie, die nach der Rückgewinnung nicht erwärmt wurde; = zusätzliche Prüfsérie, die nach der Rückgewinnung im Rotationsverdampfer erwärmt wurde; * = Zusätzliche Daten einer Mischanlage vorhanden

3.3 Probevorbereitung und Prüfung der Bindemittelkennwerte

Abbildung 4 gibt einen Überblick über den Arbeitsablauf und die durchgeführten Prüfungen.

Bei der Auswahl der PmBs für die Rückgewinnung wurde darauf geachtet, dass jede PmB-Sorte und jeder der fünf Hersteller mind. einmal vertreten ist. Ausserdem wurden Proben, bei denen es während der Prüfung der Frischbitumen Probleme gab (z.B.: Klümpchen nach Erwärmung), wenn möglich, nicht in Betracht gezogen.

Mit den acht ausgewählten PmBs wurde ein AC 8 H ohne Recyclingmaterial hergestellt. Auf Recyclingmaterial wurde verzichtet, weil dieser zusätzliche Unsicherheitsfaktor zu einer schlechteren Vergleichbarkeit der Ergebnisse geführt hätte. In Anlehnung an [72] wurde die Mischzeit zuerst auf 4 min und 30 s festgelegt, wurde dann aber wegen den folgenden Punkten auf 3 min verkürzt:

- Das Material war bereits nach 3 min vollständig umhüllt.
- Die Mischzeiten in den Anlagen sind normalerweise ebenfalls kürzer.
- Eine zusätzliche thermische Belastung der PmBs sollte vermieden werden.

Im Gegensatz zu den frischen PmBs, die 2 h lang auf die PAT erwärmt wurden, wurden die rückgewonnen PmBs nur 1 h lang erhitzt, weil sie im Gegensatz zu den frischen PmBs bereits bei der Rückgewinnung einer Temperatur von 145 °C ausgesetzt waren, und eine weitere thermische Belastung verhindert werden sollte.

An allen rückgewonnen PmBs wurden dieselben Prüfungen unter denselben Bedingungen wie an den Frischbitumen durchgeführt.

Bei zwei PmBs wurde jeweils eine zusätzliche Prüfsérie nach der Rückgewinnung nicht im Ofen, sondern bereits während der dritten Phase im Rotationskolben, erwärmt. Die Erwärmung im Rotationsverdampfer dauerte ebenfalls 1 h, um die Werte mit denen der PmBs, die im Ofen erwärmt wurden, zu vergleichen.

Um die Frage zu klären, ob ein Erwärmen des PmBs nach der Rückgewinnung grundsätzlich nötig ist oder nicht, wurde bei fünf PmBs, die für die Rückgewinnung ausgewählt wurden, eine zusätzliche Probe nach der Rückgewinnung bei 145 °C nicht nochmal erwärmt, bevor die oben genannten Bindemittleigenschaften ermittelt wurden.

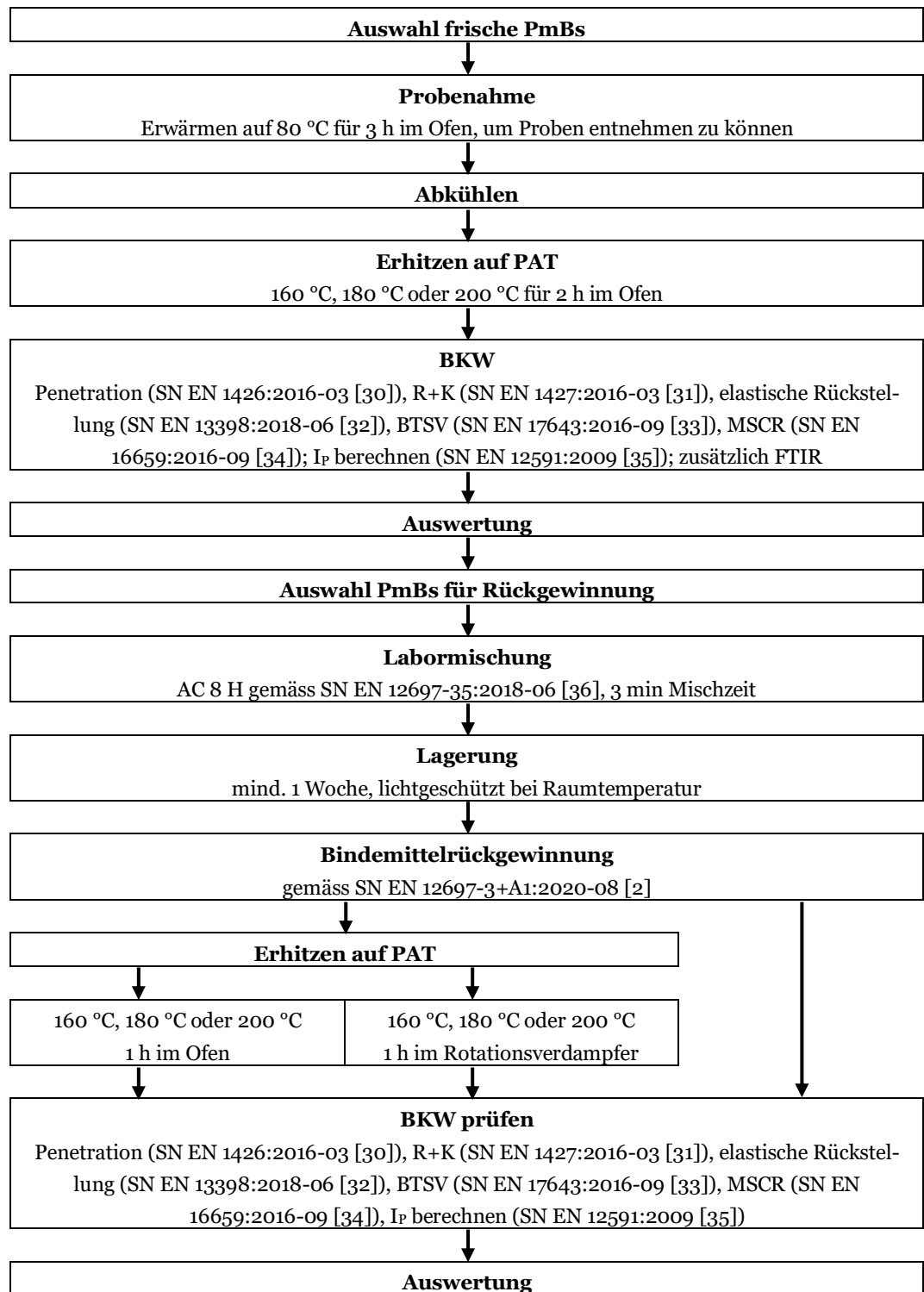


Abbildung 4: Übersicht über den Arbeitsablauf. BTSV = Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahren; I_P = Penetrationsindex; MSCR = Multiple Stress Creep and Recovery Test. Zitierte Normen: SN EN 1426:2016-03 «Bestimmung der Nadelpenetration» [30], SN EN 1427:2016-03 «Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren» [31], SN EN 12591:2009 «Anforderungen an Strassenbaubitumen» [35], SN EN 12697-3+A1:2020-08 «Rückgewinnung des Bindemittels: Rotationsverdampfer» [2], SN EN 12697-35:2018-06 «Labormischung» [36], SN EN 13398:2018-06 «Bestimmung der elastischen Rückstellung von modifiziertem Bitumen» [32], SN EN 16659:2016-09 «MSCR-Prüfung (Multiple Stress Creep and Recovery Test)» [34], SN EN 17643:2016-09 «Bestimmung der Äqui-Scherrmodultemperatur und des Phasenwinkels im Dynamischen Scherrheometer (DSR) – BTSV-Prüfung [33]

Bei diesen fünf PmBs war jeder der fünf Hersteller vertreten.

Chemische Analysen waren für dieses Projekt nicht vorgesehen, da die genaue chemische Zusammensetzung im Laboralltag keine Rolle spielt. Um dennoch Aussagen über die Zusammensetzung und die Modifikationen der geprüften PmBs zu erhalten, wurden an den frischen PmBs FTIR durchgeführt.

Bis auf den R+K und den MSCR wurden die Prüfungen gemäss Norm durchgeführt. Beim R+K, wurden für eine bessere Vergleichbarkeit alle drei Einzelwerte einer Prüfs-erie entweder mit Wasser oder Glycerin ermittelt, auch wenn gemäss Norm die andere Prüf-liquidität hätte benutzt werden müssen. Dies war bei den frischen PmBs bei fünf Einzelwerten aus fünf PmBs von Hersteller 2 der Fall. Bei den rückgewonnenen PmBs betrifft das jeweils eine Prüfserie von Hersteller 1 und Hersteller 2 und zwei Einzelwerte von Hersteller 4 (Tabelle 29). Beim MSCR wurde in Anlehnung an frühere Forschung (e.g. [71] [73] [74]) die Kriechspannungen auf 3.2 kPa in den Zyklen 1 bis 10, und auf 10.0 kPa in den Zyklen 11 bis 20 erhöht.

Bei PmBs, bei denen Prüfungen aufgrund von unplausiblen Ergebnissen wiederholt werden mussten, wurde die in Abbildung 4 beschriebene Prozedur komplett wiederholt. Das bedeutet, dass jede Probe nur einmal auf die entsprechende PAT gebracht wurde.

Zu Vergleichszwecken wurden vom PmB 45/80-65 von Hersteller 2 Daten einer Misch-anlage hinzugezogen, sowohl von Frischbitumen als auch von rückgewonnenen Bitu-men.

3.4 Auswertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse wurden unter folgenden Aspekten ausgewertet:

1. Boxplots der absoluten Werte

Von jedem BKW wurden Boxplots mit allen Einzelwerten der frischen und rückge-wonnenen PmBs erstellt. Mit diesen Boxplots können eine Reihe von Informatio-nen visualisiert werden, z.B.: die Position des MW und des Medians, die Streuung und Ausreisser (Abbildung 5).

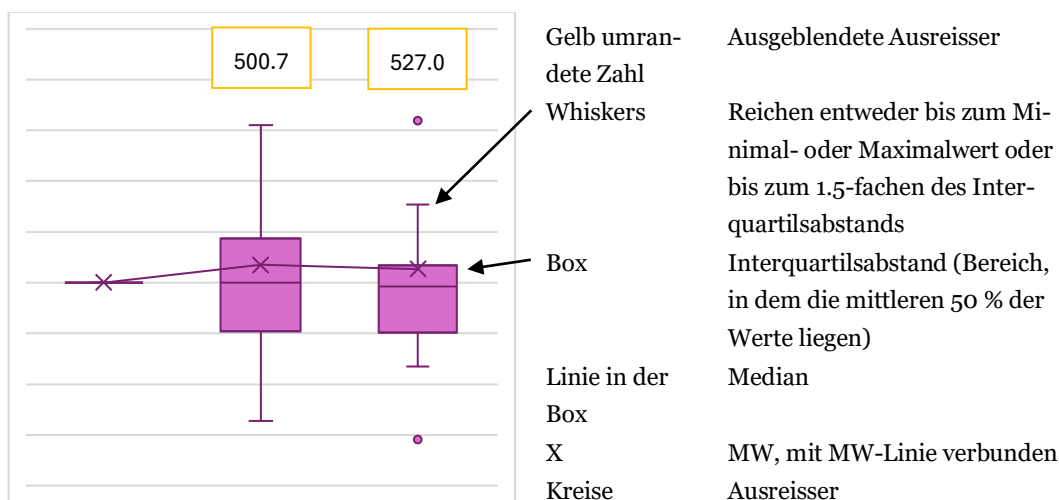


Abbildung 5: Interpretation der Boxplots

Vor allem auf die Lage der Boxen und Änderungen der MW und der Mediane wurde geachtet. Da die verschiedenen PmBs verschiedene Anforderungen erfüllen müssen, und sich die Werte dadurch natürlich voneinander unterscheiden, wurde auf die Streuung der Werte in den Boxplots weniger geachtet und wird nur bei besonderen Auffälligkeiten erwähnt. Die Quartile (Q) wurden inklusive des Medians berechnet.

2. Boxplots der relativen Abweichungen

Um die relativen Abweichungen nachvollziehen zu können, wurde jeweils eine PAT als Referenztemperatur festgelegt, und die relative Abweichung der anderen beiden Werte zu dieser Referenztemperatur bestimmt. Für eine bessere Visualisierung wurden die Ergebnisse als Boxplots dargestellt.

3. Höchster gemessener Einzelwert in Bezug auf die PAT, Trendlinien, ihre Steigungen und Regressionsanalysen

Um Hinweise darauf zu bekommen, ob es generelle Trends hin zu höheren oder niedrigeren Werten mit steigender PAT gibt, wurde ermittelt, bei welcher PAT der jeweils höchste Einzelwert der Prüfserie bestimmt wurde. Um diese Trends besser erkennen zu können, wurde für jede Prüfserie die Steigung ihrer Trendlinie berechnet. Da drei Datenpunkte pro Prüfserie statistisch gesehen sehr wenig sind, wurden zusätzlich alle Daten eines BKW zusammengekommen. Damit erhöhte sich die Anzahl Datenpunkte von drei Einzelwerte pro Prüfserie auf 63 Einzelwerte für alle frischen PmBs und 30 Einzelwerte für alle rückgewonnenen PmBs. Bei diesem vergrößerten Datensatz wurden Regressionsanalysen durchgeführt und die p-Werte berechnet, um einen möglichen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen den ermittelten Werten und der PAT festzustellen.

4. Standardabweichung SD

Mit der SD sollte überprüft werden, ob die Werte einer PAT häufiger ausserhalb der SD liegen, im Vergleich zu den anderen beiden PAT. Dafür wurden die Einzelwerte betrachtet, die ausserhalb der einfachen SD liegen, da diese Methode geeignet ist, um Gruppen miteinander zu vergleichen. Diese Gruppen entsprechen den drei PAT. Die SD wurde mit folgender Formel berechnet:

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

5. Konfidenzintervall KI

Um die Präzision der Mittelwertschätzung und die Variabilität der Daten anzugeben, wurde ein 95 %-Konfidenzintervall mit folgender Formel berechnet:

$$KI = \bar{x} \pm t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} * \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

$t_{\alpha/2, n-1}$ = kritischer t-Wert (zweiseitig), aus der t-Verteilung mit n-1 Freiheitsgraden

α = Signifikanzniveau (0.05 für 95 % Konfidenz)

6. z-score

Mit dem z-score sollten statistische Ausreisser erkannt werden. Statistische Ausreisser liegen vor, wenn der z-score < -2 oder > 2 ist. Der z-score wurde gemäss DIN EN ISO 13528:2025-07 «Statistische Verfahren für Eignungsprüfungen durch Laborvergleichsuntersuchungen» [75] mit folgender Formel berechnet:

$$\text{z-score} = \frac{(x_i - \bar{x})}{s} \quad (3)$$

7. Mittelwert MW

Die MW jeder Prüfsreihe wurden berechnet, um einerseits Unterschiede zwischen den frischen und den jeweiligen rückgewonnenen PmBs zu ermitteln. Andererseits sollte gezeigt werden, ob die Unterschiede zwischen den frischen und den rückgewonnenen PmBs in NH-PmBs grösser oder kleiner sind als in H-PmBs. Der MW wurde mit folgender Formel berechnet:

$$MW = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4)$$

n = Anzahl der Werte

x_i = einzelne Werte

8. Maximale Differenz zwischen dem höchsten und dem tiefsten Einzelwert einer Prüfsreihe

Mit diesem Wert sollte gezeigt werden, in welchem Bereich sich die Werte zwischen 160 °C und 200 °C PAT bewegen. Je grösser die Differenz, desto höher die Streuung. Mit den Differenzen wurden NH-PmBs und H-PmBs miteinander verglichen, um festzustellen, ob die Werte der einen Gruppe mehr oder weniger stark streuen als die Werte der anderen.

9. Wiederholpräzision r

Um herauszufinden, ob die PAT evtl. einen Einfluss auf die Streuung der Ergebnisse hat, wurden die ermittelten Werte mit der r aus der jeweiligen Norm verglichen. Zusätzlich wurden die Werte mit dem ROBIN 2024 verglichen, bei dem ein PmB 90/150-80 untersucht wurde. Aus den Ergebnissen des Ringversuchs wurde die r gemäss DIN EN ISO 5725-1:2023-07 «Allgemeine Grundlagen und Begriffe» [76] mit der Formel

$$r = 2.8 * s_r \quad (5)$$

berechnet. Bei s_r handelt es sich um die Wiederholstandardabweichung. Da die Messungen in verschiedenen Labors durchgeführt wurden, von denen aber nur manche Wiederholmessungen durchführten, wurde s_r gemäss DIN EN ISO 5725-2:2022-05 «Verfahren zur Schätzung der Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit eines standardisierten Messverfahrens» [77] mit der folgenden Formel berechnet:

$$s_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^p (n_i - 1) s_i^2}{\sum_{i=1}^p (n_i - 1)}} \quad (6)$$

p = Anzahl der Labore

n_i = Anzahl der Messwerte in Labor i

s_i = SD der Messwerte in Labor i

Zusätzlich wurden für die T_{BTSV} und den δ_{BTSV} die r aus dem VAB/ALA 2022 hinzugezogen, in dem ein PmB 45/80-65 untersucht wurde. Dieses PmB wurde aus einem Bohrkern mit SDA 8-12 rückgewonnen.

10. Black-Diagramme

Die Black-Diagramme wurden mit den Ergebnissen des BTSV erstellt.

3.5 Interpretation der Grafiken

Tabelle 9, Tabelle 10 und Tabelle 11 listen die verwendeten Farben und Symbole auf, die in den Abbildungen der Ergebnisse verwendet werden.

Farbcode der Ergebnisse der BKW

Hersteller	Farbe
1	Hellblau
2	Grün
3	Violette
4	Grau
5	Orange

Tabelle 9: Farbcode der Ergebnisse der BKW. Wenn in einer Grafik mehrere Daten eines Herstellers dargestellt sind, ändert sich die Helligkeit der Farbe

Farbcode der Ergebnisse der einzelnen PmBs

PmB	Farbe
PmB-E 25/55-65	Hellblau
PmB-E 45/80-65	Grün
PmB-E 65/105-60	Violette
PmB-E 90/150-60	Grau
PmB 25/55-80	Orange
PmB 45/80-80	Dunkelblau
PmB 65/105-80	Rot
PmB 90/150-80	Gelb

Tabelle 10: Farbcode der Ergebnisse der einzelnen PmBs. Wenn mehrere Daten eines PmBs in einer Grafik dargestellt werden, ändert sich die Helligkeit der Farbe

3.6 Verwendete Geräte

Die Penetration wurde mit einem Penetrometer PNR 12 von Anton Paar bestimmt. Der R+K wurde mit einem digitalen Ring- und Kugelautomaten von BeraTest oder einem Ring- und Kugelautomaten vom Typ 1.640 von Fröhlich + Wagner GmbH bestimmt. Für die Bestimmung der elastischen Rückstellung wurde ein Duktilometer 20-2350 von Infratest benutzt. Das BTSV wurde in einem DSR vom Typ SmartPave 102 von

Übersicht über die in den Grafiken verwendeten Symbole

Symbol	Beschreibung	Erklärung
	Gefüllter Datenpunkt	Frisches PmB
	Leerer Datenpunkt	Rückgewonnenes PmB, im Ofen erhitzt
	Datenpunkt	Rückgewonnenes PmB, im Rotationsverdampfer erhitzt
	Datenpunkt	Probe von Anlage
	Rot umrandeter Datenpunkt	Anforderungen nicht erfüllt
	Heller oder grau gefüllter Datenpunkt	Rückgewonnenes PmB, dass nach der Rückgewinnung bei 145 °C nicht weiter erwärmt wurde
	Vergrosserter Datenpunkt	Keine besondere Bedeutung, nur grösser für bessere Sichtbarkeit
	Datenlinie	
	Trendlinie	

Tabelle 11: Übersicht über die in den Grafiken verwendeten Symbole

Anton Paar durchgeführt, der MSCR in einem DSR vom Typ SmartPave 92, ebenfalls von Anton Paar. Die FTIR wurde mit einem FTIR-Spektrometer vom Typ Lyza 7000 von Anton Paar durchgeführt.

4 Ergebnisse

4.1 Anlieferungszustand

Die angelieferten PmBs besaßen alle eine saubere und glänzende Oberfläche. Manche von Ihnen zeigten eine Orangenhautstruktur, andere Schaumbildung am Rand. Wieder andere hatten Löcher, die wahrscheinlich durch Luftblasen oder kondensierenden Wasserdampf während der Abkühlung des Bitumens entstanden sind. Selten waren Risse zu erkennen. Anhand der Oberflächenbeschaffenheit lässt sich nicht auf die BKW schließen. Bei PmBs mit glatter Oberfläche gab es nicht erfüllte Werte, genauso wie bei PmBs mit unregelmässiger Oberfläche. Umgekehrt gab es PmBs mit unregelmässiger Oberfläche, deren Werte den Anforderungen entsprachen. Für einen kleinen Überblick siehe Abbildung 6.

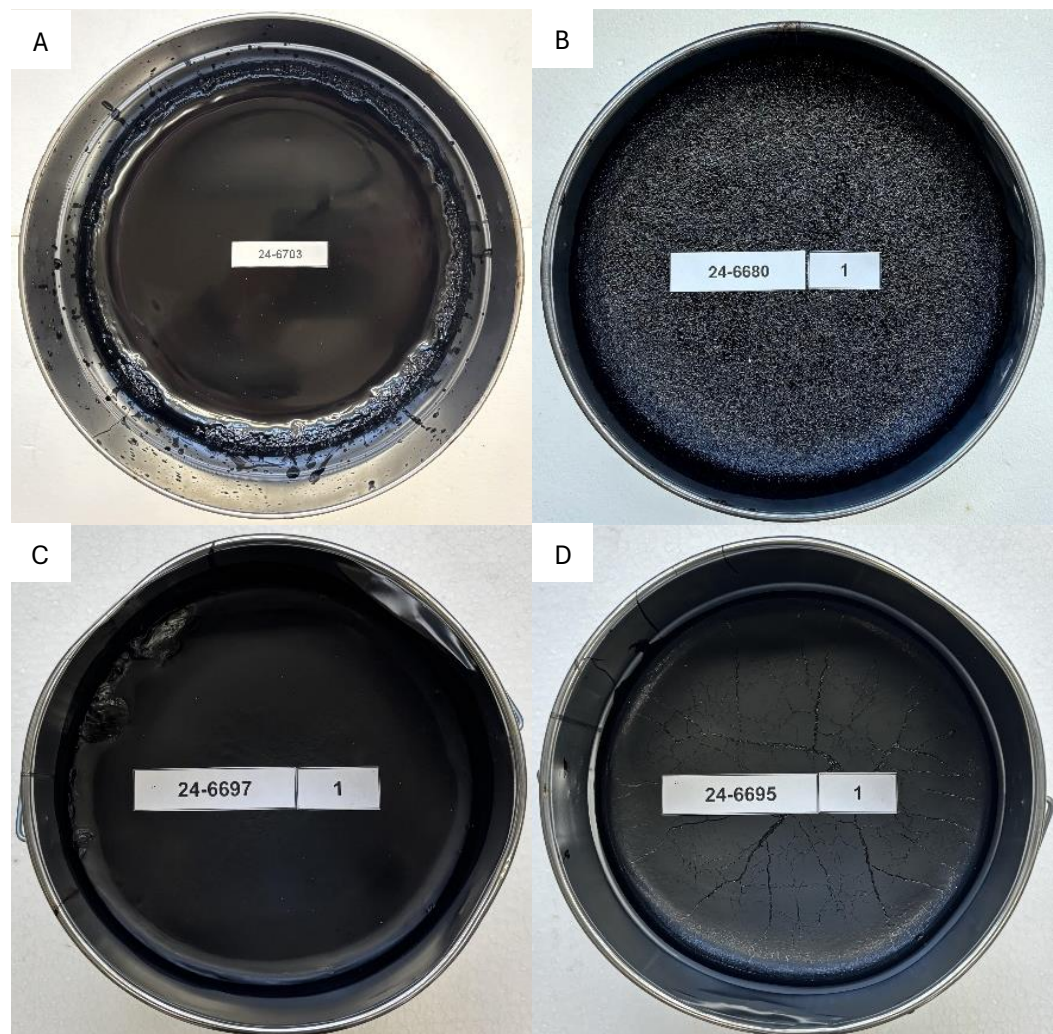


Abbildung 6: Beispiele des Anlieferungszustands verschiedener PmBs. (A) PmB-E 90/150-60 von Hersteller 1. (B) PmB 25/55-80 von Hersteller 2. (C) PmB 45/80-80 von Hersteller 5. Der R+K hat beim frischen PmB die Anforderungen nicht erfüllt. (D) PmB 25/55-65 von Hersteller 5

4.2 Aufschmelzen und Homogenisieren

Nicht alle PmBs konnten bei allen PAT komplett aufschmelzen und homogenisieren werden. Tabelle 12 gibt einen entsprechenden Überblick. Bei manchen der entsprechenden PmBs wurden die Prüfungen wiederholt, aber auch beim zweiten Versuch konnten die PmBs nicht komplett aufgeschmolzen werden. Die Ergebnisse haben sich aber nicht wesentlich geändert und unterscheiden sich auch wenig von den Ergebnissen der anderen PAT. Letzteres gilt auch für PmBs, bei denen die Prüfungen nicht wiederholt wurden. Da die Ergebnisse nach der Wiederholung sehr ähnlich bzw. unauffällig waren, wurden diese Ergebnisse in die weiteren Auswertungen integriert.

Auf Nachfrage zeigte sich Hersteller 3 überrascht, dass sein PmB-E 65/105-60 bei 180 °C PAT Klümpchen aufwies, da das Polymer durch ihren Anlagenprozess einschliesslich der Vernetzungsphase normalerweise gut in der Bitumenmatrix verteilt wird.

Bei drei der fünf PmBs, die nach der Rückgewinnung bei 145 °C nicht weiter erwärmt wurden, gab es Schwierigkeiten beim Homogenisieren und Abfüllen der Probebehälter. Betroffen waren das PmB-E 25/55-65 von Hersteller 5, das PmB 25/55-80 von Hersteller 3 und das PmB 90/150-80 von Hersteller 4 (Abbildung 7 und Tabelle 12).

Übersicht über nicht vollständig homogenisierbare PmBs

PmB	Hersteller	PAT	Beobachtung	Zeitpunkt
PmB-E 25/55-65	5	145 °C	Unregelmässige Oberfläche im Prüfgefäss für Penetration (Abbildung 7C)	Nach Rückgewinnung
PmB-E 65/105-60	3	180 °C	Klümpchen und Verdickungen	Nach Erwärmen auf PAT
PmB-E 90/150-60	1	200 °C	Klümpchen und Verdickungen	Nach Erwärmen auf PAT
PmB 25/55-80	3	145 °C	Um alle Prüfgefässe abfüllen zu können, musste das PmB zwischendurch nochmal für 15 min auf 150 °C erwärmt werden (Abbildung 7A)	Nach Rückgewinnung
PmB 90/150-80	1	200 °C	Klümpchen und Verdickungen	Nach Erwärmen auf PAT
	4	160 °C (frisch)	Klümpchen und Verdickungen	Nach Erwärmen auf PAT
		145 °C	Homogenisierung nicht möglich (Abbildung 7B)	Nach Rückgewinnung
		160 °C 180 °C 200 °C (rückgew.)	Klümpchen und Verdickungen	Beim Homogenisieren vorm Mischen des Mischguts
			Körnige Struktur	Beim Trimmen im DSR

Tabelle 12: Übersicht über die PmBs, die nicht vollständig homogenisiert werden konnten



Abbildung 7: PmBs, die nach der Rückgewinnung bei 145 °C nicht weiter erhitzt wurden. (A) PmB 25/55-80 von Hersteller 3. Das PmB war sehr dickflüssig und die Prüfgefäße schwer zu befüllen. (B) PmB 90/150-80 von Hersteller 4. Homogenisierung nicht möglich. (C) PmB-E 25/55-65 von Hersteller 5. Unregelmässige Oberfläche. Siehe auch Tabelle 12

4.3 Vergleich zwischen den im Ofen und den im Rotationsverdampfer erwärmten, rückgewonnenen PmBs

Beim PmB-E 65/105-60 von Hersteller 2 und beim PmB 25/55-80 von Hersteller 3 wurde jeweils eine zusätzliche Prüfserien geprüft, bei der die PmBs während der dritten Phase der Rückgewinnung im Rotationsverdampfer auf 160 °C, 180 °C oder 200 °C erwärmt wurden. Da die Einzelwerte der Prüfserien sehr ähnlich sind, wurden nicht die Einzelwerte, sondern die MW verglichen. Tabelle 13 zeigt, dass die MW der im Ofen erwärmten PmBs keine grossen Unterschiede zu den im Rotationsverdampfer erwärmten PmBs zeigen. Aus diesem Grund wurden die Ergebnisse der im Rotationsverdampfer erwärmten PmBs ohne Bedenken in die Auswertungen der rückgewonnenen PmBs integriert und werden im Folgenden auch nicht separat betrachtet.

Vergleich zwischen im Ofen oder im Rotationsverdampfer erwärmten rückgewonnenen PmBs

BKW	PmB-E 65/105-60 von Hersteller 2	PmB 25/55-80 von Hersteller 3
Penetration [$1/_{10}$ mm]	3	5
R+K [°C]	2.5	1.8
I _P [-]	0.3	0.5
Elastische Rückstellung [%]	2	2
T _{BTSV} [°C]	0.2	1.6
δ _{BTSV} [°]	0.2	0.4
R _{3,2} kPa [%]	4.81	1.11
R ₁₀ kPa [%]	133.33	0.79
R _{diff} [%]	12.28	0.36
J _{nr 3,2} kPa [$1/kPa$]	0.0634	0.0018
J _{nr 10} kPa [$1/kPa$]	0.2307	0.0014
J _{nr diff} [%]	15.70	1.78

Tabelle 13: Vergleich der rückgewonnenen PmBs die im Ofen aufgewärmt wurden, mit denen die im Rotationsverdampfer erwärmt wurden. Die Tabelle zeigt die Differenzen der MW, die aus den drei Einzelwerten ermittelt wurden

4.4 Vergleich mit nach der Rückgewinnung nicht erwärmten Proben

Beim PmB-E 25/55-56 von Hersteller 5, dem PmB-E 65/105-60 von Hersteller 2, dem PmB 25/55-80 von Hersteller 3, dem PmB 45/80-80 von Hersteller 1 und dem PmB 90/150-80 von Hersteller 4 wurde zusätzlich noch eine Prüfserie geprüft, bei denen die Proben nach der Rückgewinnung bei 145 °C nicht nochmal erwärmt wurden (Tabelle 8). Diese Proben zeigen generell sehr ähnliche Ergebnisse zu denjenigen, die nach der Rückgewinnung auf 160 °C, 180 °C oder 200 °C erwärmt wurden.

Beim PmB-E 25/55-65, PmB-E 65/105-60 und beim PmB 25/55-80 liegen die ermittelten Werte in den meisten Fällen im Bereich der übrigen Werte. Beim PmB 45/80-80 bilden die Werte dieser Prüfserie bei den meisten Bindemittleigenschaften die höchsten oder tiefsten Werte, unterscheiden sich aber von den Werten der erwärmten Proben nur minimal.

Beim PmB 90/150-80 bilden diese Werte bei allen Bindemittleigenschaften den höchsten oder tiefsten Wert, der sich in den meisten Fällen auch deutlich von den Werten der Proben, die nach der Rückgewinnung erwärmt wurden, unterscheidet. Dieses PmB zeigt aber generell eine viel höhere Streuung der Einzelwerte und die Werte passen recht gut in die ermittelten Trends dieses PmBs.

In den Black-Diagrammen sieht man bei den 145 °C-Kurven vom PmB 65/105-60, PmB 25/55-80 und PmB 45/80-80 keine Unterschiede zu den anderen Kurven, die nach der Rückgewinnung mit anschließender Erwärmung ermittelt wurden. Beim 25/55-65 von Hersteller 5 liegen die beiden 145 °C-Kurven genau zwischen den Kurven des frischen PmBs und den anderen rückgewonnenen Proben. Beim PmB 90/150-80 von Hersteller 4 ist die Form der 145 °C-Kurve nicht vergleichbar mit den anderen Kurven dieses PmBs, die aber generell sehr variabel sind.

In den T_{BTSV} vs. δ_{BTSV} -Diagrammen sind die ermittelten Werte in gleichen oder sehr ähnlichen Bereichen wie die der erwärmten rückgewonnenen PmBs.

Bei den Kriech-Erholungskurven sind beim PmB-E 25/55-65, beim PmB 45/80-80 und beim PmB 90/150-80 die 145 °C-Kurven die höchsten Kriech-Erholungskurven.

4.5 Penetration

Bei den frischen PmBs erfüllen alle Werte bis auf diejenigen des PmB-E 25/55-65 von Hersteller 3 die Anforderungen. Der Hersteller kann sich nicht erklären, warum die Werte die Anforderungen nicht erfüllen. Bei den rückgewonnenen PmBs liegen alle Werte innerhalb der Anforderungen (Abbildung 8 und Tabelle 28).

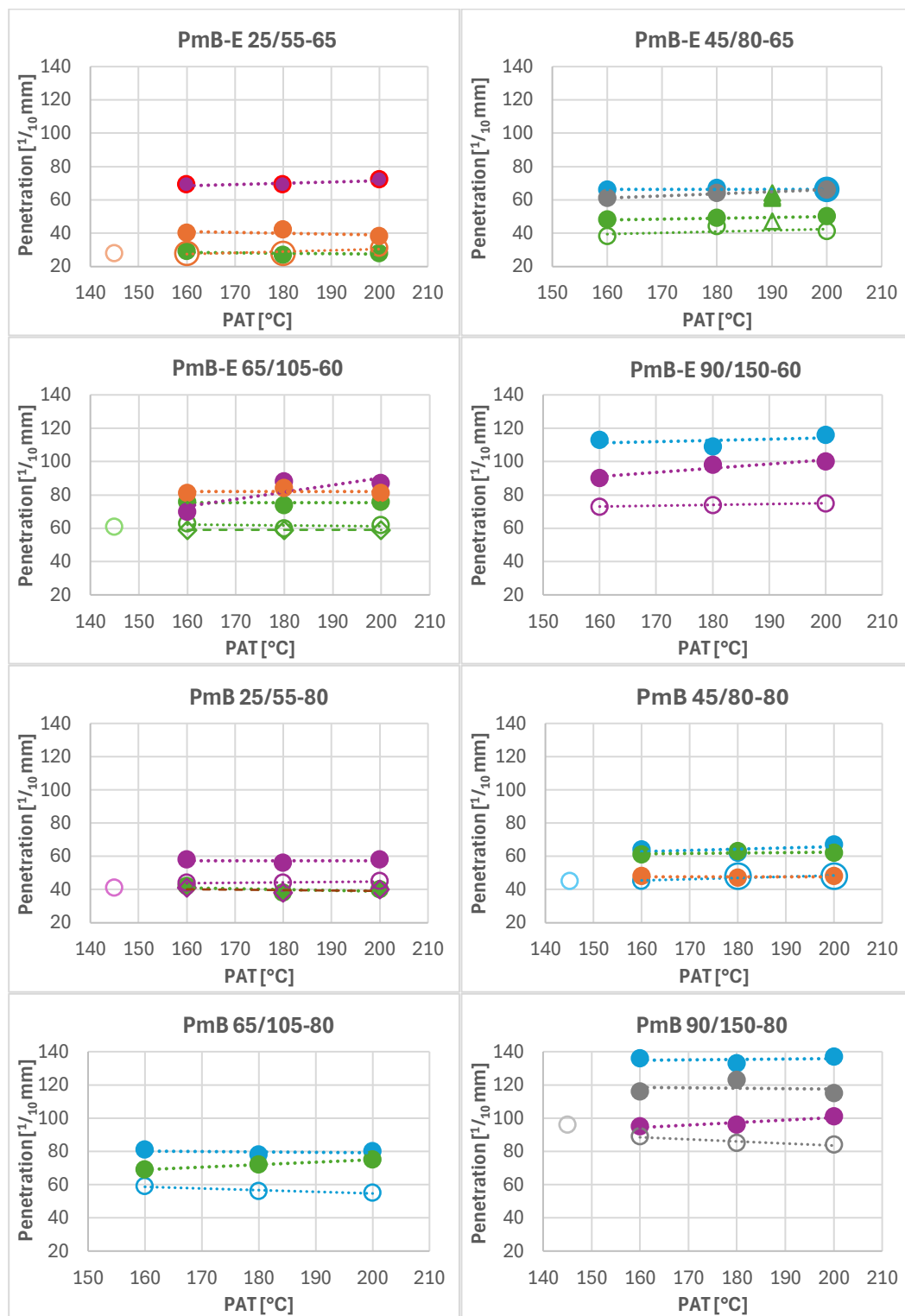
Bei den Boxplots der absoluten Werte sieht man bei 160 °C, 180 °C und 200 °C wenige bis keine Unterschiede. Bei den frischen PmBs ist der Interquartilsabstand bei 160 °C geringer im Vergleich zu den beiden anderen PAT. Die Ausreisser sind im Vergleich zu den anderen Einzelwerten der entsprechenden Prüfserie unauffällig (Abbildung 9 und Tabelle 40).

Bei der relativen Abweichung sieht man bei den frischen PmBs einen Anstieg der MW hin zu höheren PAT. Auch die Lagen der Boxen verschieben sich mit steigender PAT hin zu höheren Abweichungen. Die Ausreisser gehören allesamt zum PmB-E 65/105-60 von Hersteller 3, dessen Werte im Vergleich zu anderen PmBs etwas mehr streuen, ansonsten aber unauffällig sind. Bei den rückgewonnenen PmBs sieht man, dass die Mediane und MW bei 200 °C geringfügig höher liegen als bei 160 °C und 180 °C PAT. Bei 160 °C Referenztemperatur ist die Lage der 180 °C- und der 200 °C-Box deutlich unterschiedlicher im Vergleich zu den anderen beiden Referenztemperaturen. Mehrere Ausreisser gehören zum PmB-E 45/80-65 von Hersteller 2, die Werte an sich sind aber unauffällig. Auch die restlichen Ausreisser sind unauffällig (Abbildung 10, Tabelle 41, Tabelle 42 und Tabelle 43).

Die höchsten Einzelwerte der frischen PmBs zeigen keinen eindeutigen Trend bzgl. der PAT (Tabelle 17). Auch bei den rückgewonnenen PmBs lässt sich kein Trend erkennen (Tabelle 18).

Bei den Steigungen der Trendlinien der einzelnen Prüfserien lässt sich sowohl bei den frischen, als auch bei den rückgewonnenen PmBs kein Trend erkennen (Abbildung 8, Tabelle 19 und Tabelle 20). Wenn man alle Werte der frischen PmBs zusammennimmt, ergibt sich eine Steigung der Trendlinie von 0.06 mm/10 °C. Alle rückgewonnenen PmBs haben keine Steigung (Abbildung 11). Die Regressionsanalyse mit allen Werten der frischen PmBs ergab einen p-Wert von 0.777. Bei den rückgewonnenen PmBs wurde ein p-Wert von 0.978 ermittelt. Die Steigung ist also nicht statistisch signifikant (Tabelle 21).

Nur bei vier der 63 Einzelwerte (6 %), liegt jeweils ein Einzelwert ausserhalb der entsprechenden SD. Bezüglich der Aufteilung auf die PAT lässt sich kein Trend erkennen (Tabelle 22 und Tabelle 28). NH-PmBs und H-PmBs sind im gleichen Ausmass



Hersteller 1

Hersteller 2

Hersteller 3

Hersteller 4

Hersteller 5

● Frisches PmB

○ Rückgewonnenes PmB

◆ Rückgewonnenes PmB, dass im Rotationsverdampfer erhitzt wurde

○ Rückgewonnenes PmB, dass nach der Rückgewinnung nicht nochmal erhitzt wurde

▲ Frisches PmB einer Anlage

△ Rückgewonnenes PmB einer Anlage

Abbildung 8: Die Ergebnisse der Penetration

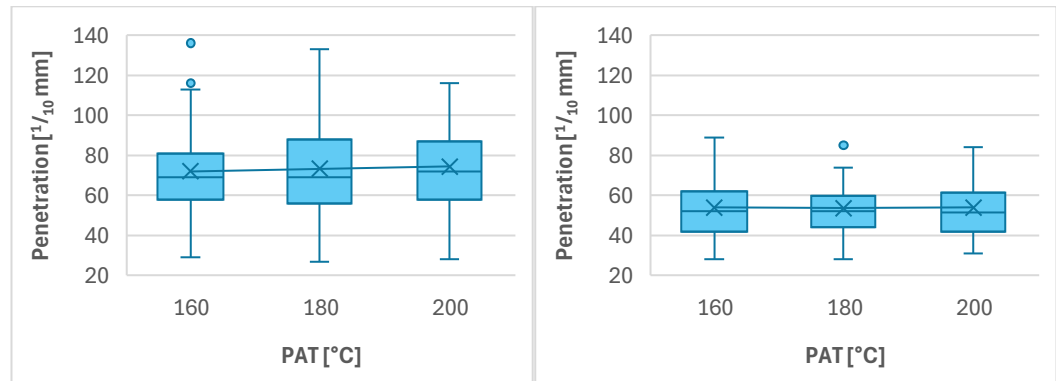


Abbildung 9: Die Boxplots der absoluten Werte der Penetration der frischen (links) und rückgewonnenen PMBs (rechts)

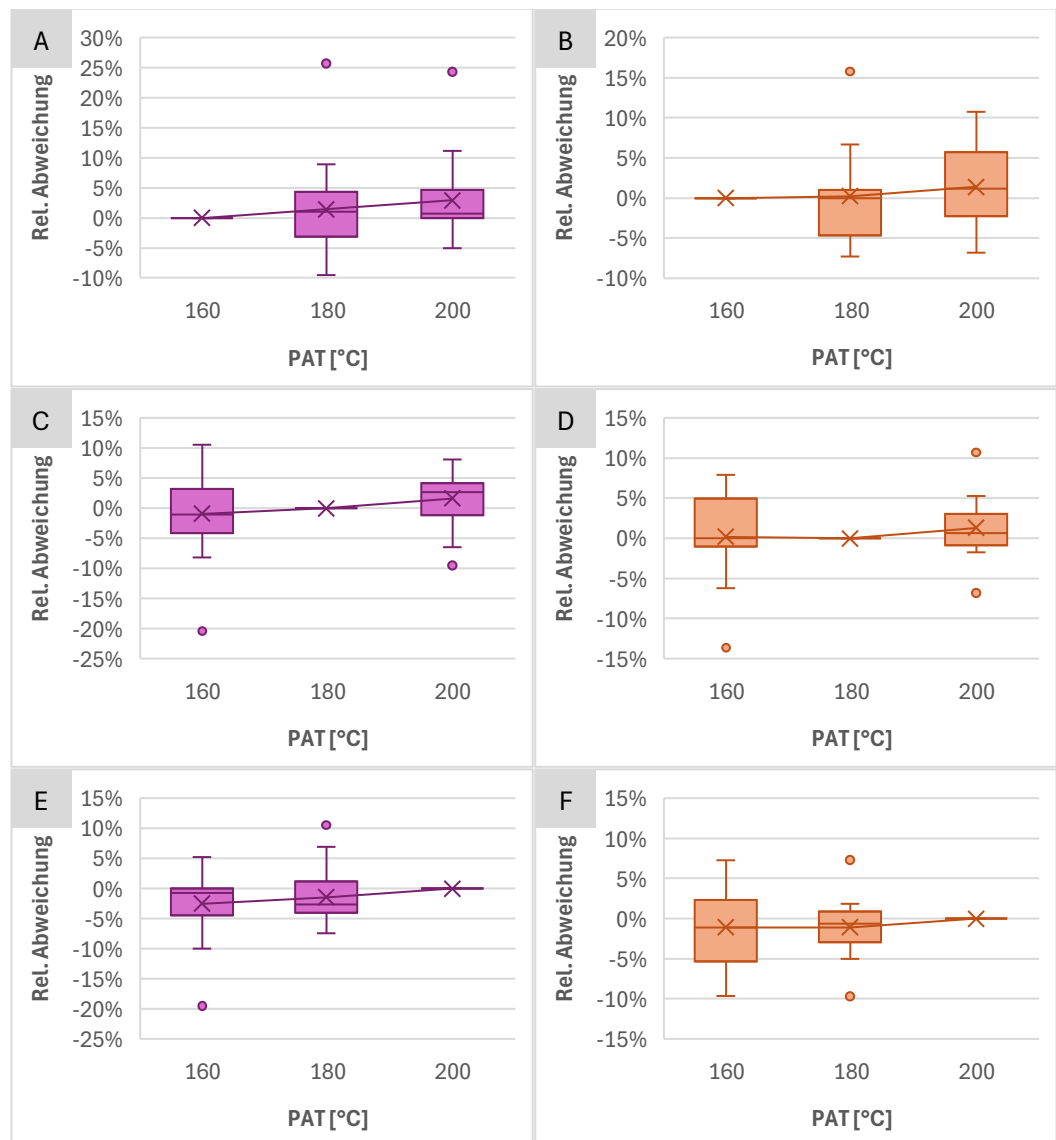


Abbildung 10: Die Boxplots der relativen Abweichungen der Penetration bei 160 °C Referenztemperatur der frischen (A) und rückgewonnenen PMBs (B), bei 180 °C Referenztemperatur der frischen (C) und rückgewonnenen PMBs (D) und bei 200 °C Referenztemperatur der frischen (E) und rückgewonnenen PMBs (F)

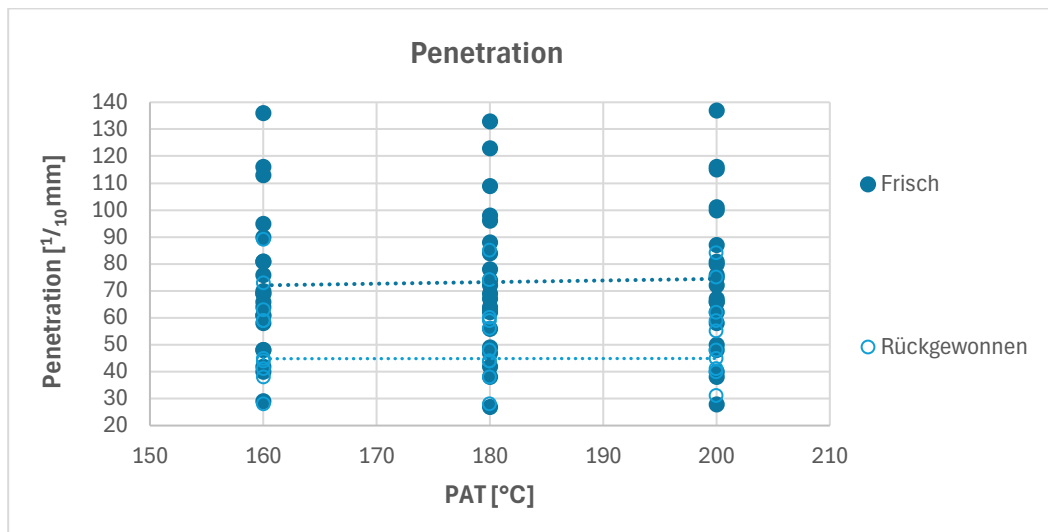


Abbildung 11: Alle Werte der Penetration und die Trendlinien, die für die Regressionsanalysen benutzt wurden

betroffen. Bei den rückgewonnenen PmBs liegen alle Werte innerhalb der entsprechenden SD (Tabelle 23 und Tabelle 28).

Sowohl bei den frischen als auch bei den rückgewonnenen PmBs liegen alle Einzelwerte innerhalb des entsprechenden KI und die z-scores liegen im Bereich zwischen -2 und +2 (Tabelle 28).

Die MW der frischen PmBs liegen im Durchschnitt $17.40 \frac{1}{10}$ mm über denen der jeweiligen rückgewonnenen PmBs. Bei NH-PmBs liegen die MW etwas näher beieinander, bei den H-PmBs liegen sie weiter auseinander (Tabelle 24).

Bei den frischen PmBs liegt die Differenz zwischen dem höchsten und dem tiefsten Wert bei durchschnittlich $4.67 \frac{1}{10}$ mm und bei den rückgewonnenen bei $3.00 \frac{1}{10}$ mm. Die NH-PmBs streuen bei den frischen PmBs stärker als der Durchschnitt, H-PmBs streuen weniger stark. Bei den rückgewonnenen PmBs ist es genau umgekehrt. (Tabelle 25).

Die Norm SN EN 1426:2016-03 «Bestimmung der Nadelpenetration» [30] (Tabelle 3) gibt für PmBs eine r von 2 bei einer Penetration $< 50 \frac{1}{10}$ mm an, und 4 % des MW, bei einer Penetration $\geq 50 \frac{1}{10}$ mm. Von den 21 frischen PmBs liegen 13 innerhalb dieser r , also 62 %. Von den zehn rückgewonnenen PmBs waren es fünf (50 %). Abbildung 12 zeigt, dass PmBs, deren Streuung grösser als r ist, relativ nahe an der r liegen, mit Ausnahme des frischen PmB-E 65/105-60 von Hersteller 3. Beim ROBIN 2024 wurde ein PmB 90/150-80 untersucht, mit einer Penetration $> 50 \frac{1}{10}$ mm. Mit den Daten des ROBIN 2024 wurde eine r von 6 berechnet. Von den 16 frischen PmBs, deren Penetration $> 50 \frac{1}{10}$ mm ist, liegen zwölf (75 %) innerhalb der r von ROBIN 2024. Von den fünf rückgewonnenen PmBs, die ebenfalls eine Penetration > 50 haben, liegen alle (100 %) innerhalb der r von ROBIN 2024. Auch hier sind die PmBs, die ausserhalb der r liegen nicht weit von ihr entfernt, mit Ausnahme des frischen PmB-E 65/105-60 von Hersteller 3 (Abbildung 12, Tabelle 26 und Tabelle 27).

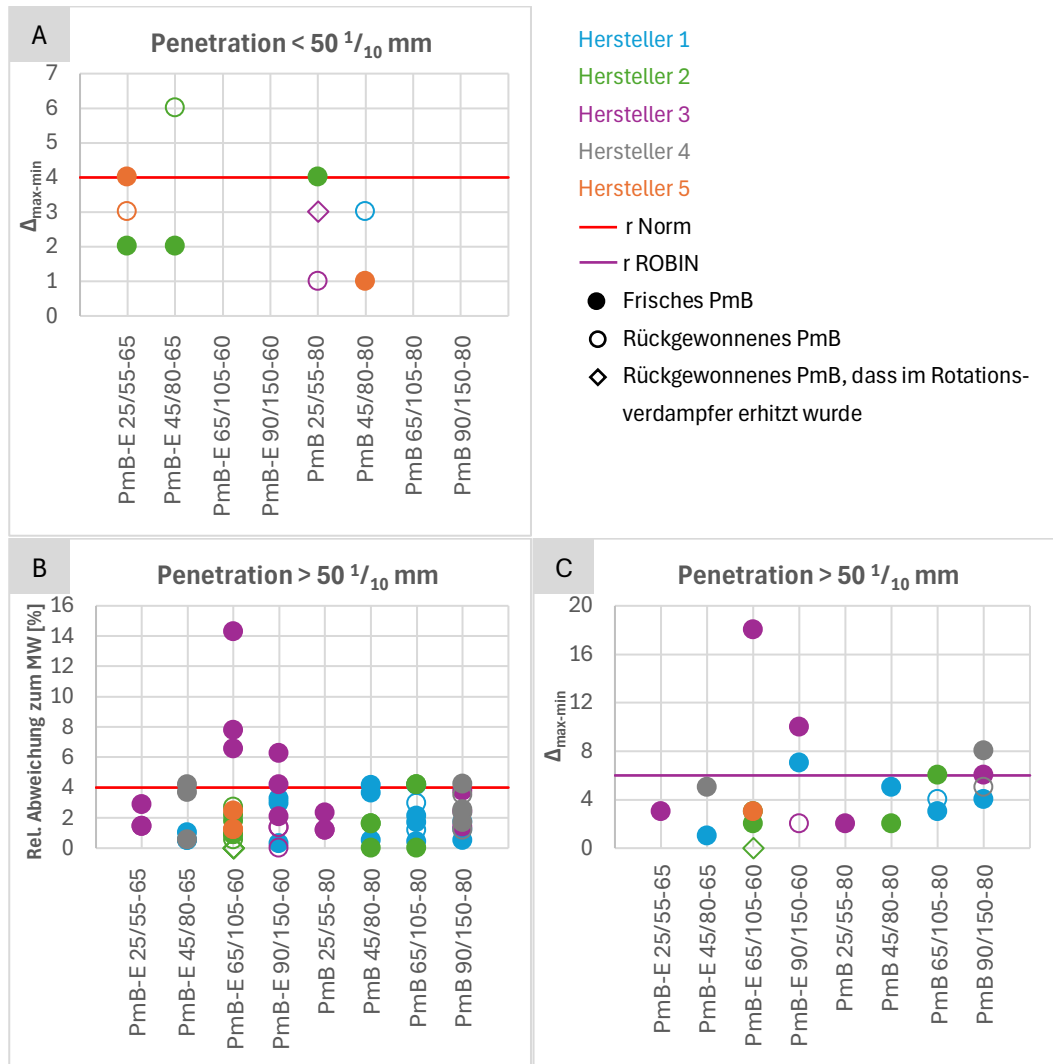
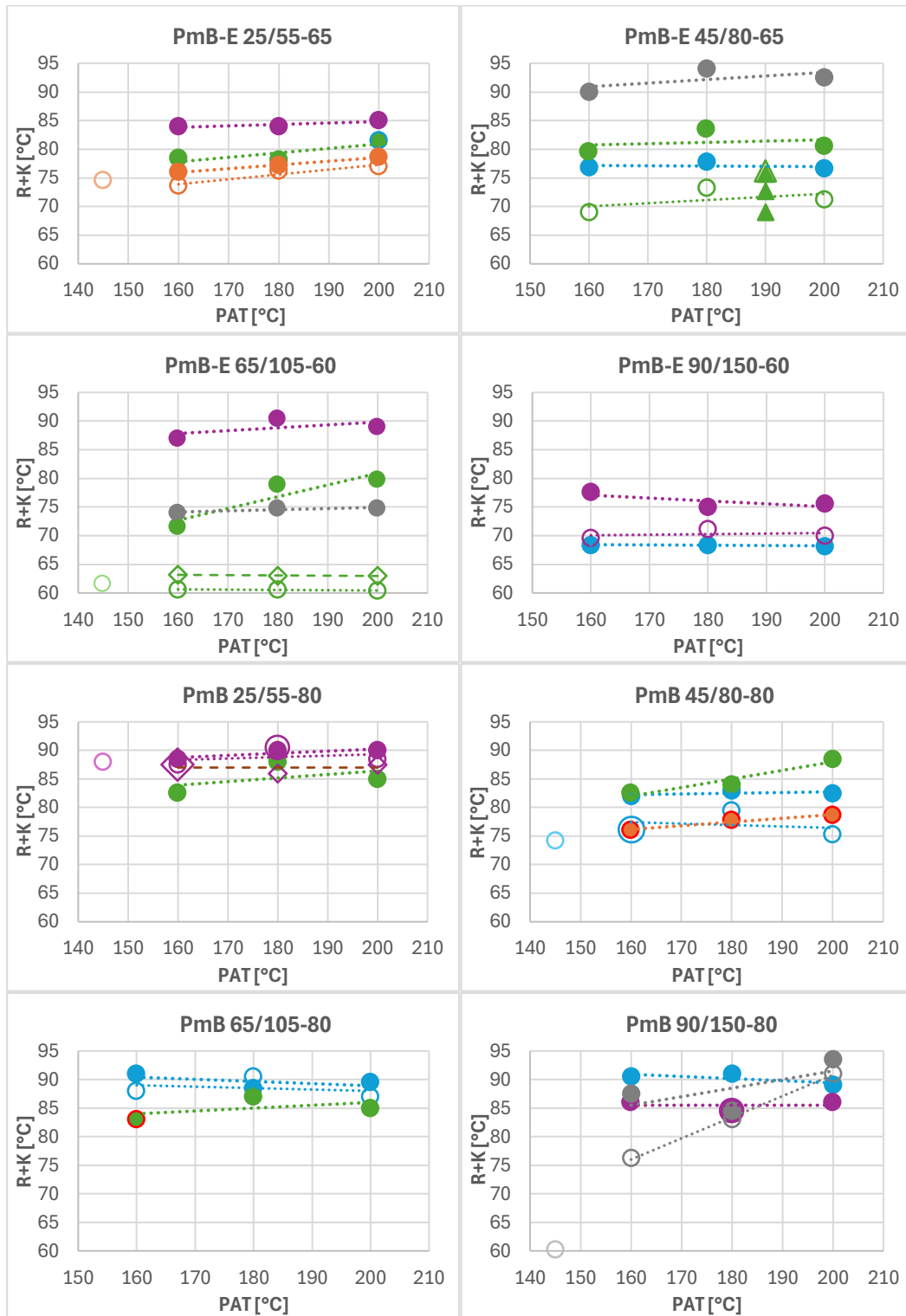


Abbildung 12: Übersicht über die PmBs, deren Werte der Penetration innerhalb oder ausserhalb der r der SN EN 1426:2016-03 «Bestimmung der Nadelpenetration» [30] (A und B) oder des ROBIN 2024 (C) liegen.

4.6 Erweichungspunkt Ring & Kugel R+K

Alle drei Einzelwerte des frischen PmB 45/80-80 von Hersteller 5 liegen ausserhalb der Anforderungen. Der Hersteller hat sich dazu nicht geäussert. Die restlichen frischen PmBs und alle rückgewonnenen PmBs erfüllen die Anforderungen (Abbildung 13 und Tabelle 29).

Die Boxplots der absoluten Werte zeigen, dass es zwischen den drei PAT nur geringe Unterschiede gibt. Der Median und der MW sind bei den frischen PmBs bei 160 °C etwas niedriger im Vergleich zu 180 °C und 200 °C. Dasselbe gilt für die rückgewonnenen PmBs, bei denen die Streuung bei 160 °C allerdings deutlich geringer ist als bei 180 °C und 200 °C. Bemerkenswert ist, dass es keine Ausreisser gibt (Abbildung 14 und Tabelle 40).



- | | |
|--------------|---|
| Hersteller 1 | ● Frisches PmB |
| Hersteller 2 | ○ Rückgewonnenes PmB |
| Hersteller 3 | ◇ Rückgewonnenes PmB, dass im Rotationsverdampfer erhitzt wurde |
| Hersteller 4 | ○ Rückgewonnenes PmB, dass nach der Rückgewinnung nicht nochmal erhitzt wurde |
| Hersteller 5 | ▲ Frisches PmB einer Anlage |
| | △ Rückgewonnenes PmB einer Anlage |

Abbildung 13: Die Ergebnisse des R+K

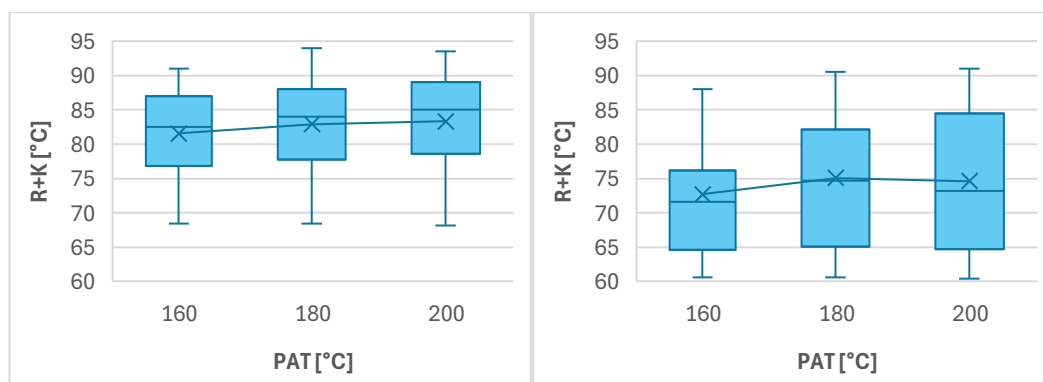


Abbildung 14: Die Boxplots der absoluten Werte des R+K der frischen (links) und rückgewonnenen PmBs (rechts)

Bei den relativen Abweichungen lässt sich erkennen, dass sowohl bei den frischen als auch bei den rückgewonnenen PmBs die Mediane und die MW bei 160 °C PAT deutlich niedriger sind. Die meisten Ausreißer bei den frischen PmBs gehören zum PmB-E 65/105-60 von Hersteller 2, bei dem sich der Wert bei 160 °C deutlich von denen bei 180 °C und 200 °C PAT unterscheidet. Der andere Ausreißer bei den frischen PmBs ist unauffällig. Bei den rückgewonnenen PmBs gehören alle Ausreißer zum PmB 90/150-80 von Hersteller 4, bei dem während des Homogenisierens vor dem Mischen des Mischguts Klümpchen und Verdickungen vorhanden waren (Abbildung 15, Tabelle 41, Tabelle 42 und Tabelle 43).

Bei den frischen PmBs lässt sich bei den höchsten Einzelwerten einer Prüfserie kein eindeutiger Zusammenhang mit der PAT erkennen (Tabelle 17). Bei den rückgewonnenen PmBs haben fünf (50 %) ihren höchsten Einzelwert bei 180 °C, die restlichen PmBs verteilen sich gleichmässig über die anderen beiden PAT (Tabelle 18).

Bei den frischen PmBs zeigt der Grossteil der Trendlinien eine positive Steigung hin zu höheren PAT, nämlich 15 der 21 PmBs (71 %; Abbildung 13 und Tabelle 19). Bei den rückgewonnenen PmBs ist derselbe Trend wie bei der Penetration zu sehen, denn fünf PmBs (50 %) steigen an (Abbildung 13 und Tabelle 20). Die Steigung aller ermittelten Einzelwerte beträgt bei den frischen PmBs 0.04 und bei den rückgewonnenen 0.05 (Abbildung 16). Der p-Wert der Regressionsanalyse beträgt 0.381 bei allen frischen PmBs und 0.623 bei den rückgewonnenen PmBs. Beide p-Werte zeigen keine statistische Signifikanz (Tabelle 21).

Bei den frischen PmBs liegen 13 der 63 Einzelwerte (21 %) ausserhalb der SD. Bei der Verteilung der Randwerte auf die PAT lässt sich kein Trend erkennen (Tabelle 22 und Tabelle 29). Es gibt auch keinen nennenswerten Unterschied zwischen NH-PmBs und H-PmBs. Bei den rückgewonnenen PmBs sind es sieben Einzelwerte (23 %) die ausserhalb der SD liegen (Tabelle 23 und Tabelle 29). Fünf dieser sieben Einzelwerte gehören zu H-PmBs.

Die Einzelwerte aller frischen und rückgewonnenen PmBs liegen innerhalb des entsprechenden KI und ihre z-scores liegen im Bereich zwischen -2 und +2 (Tabelle 29).

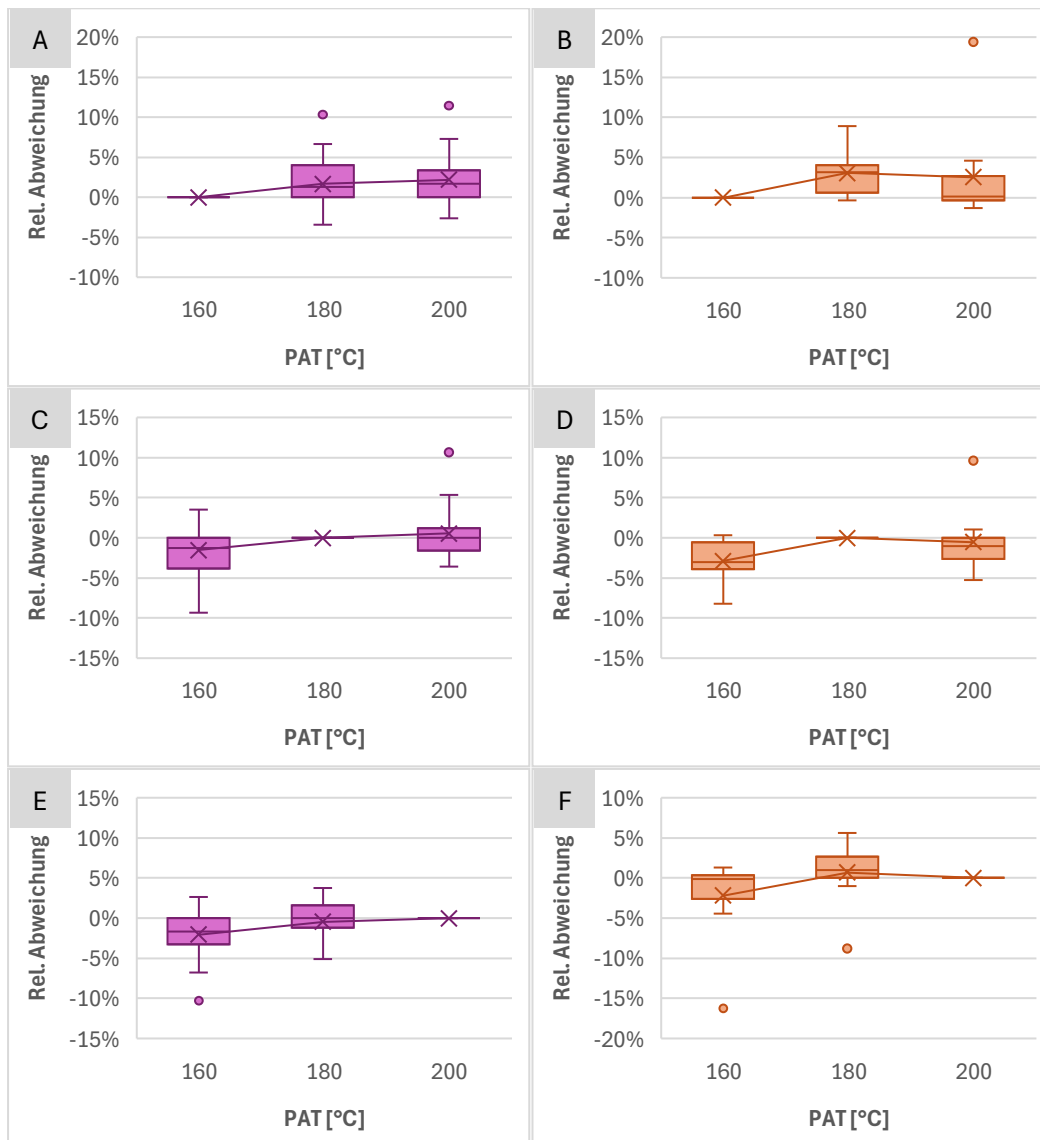


Abbildung 15: Die Boxplots der relativen Abweichungen des R+K bei 160 °C Referenztemperatur der frischen (A) und rückgewonnenen PMBs (B), bei 180 °C Referenztemperatur der frischen (C) und rückgewonnenen PMBs (D) und bei 200 °C Referenztemperatur der frischen (E) und rückgewonnenen PMBs (F)

Die MW der frischen PMBs liegen durchschnittlich 6.19 °C über denen der rückgewonnenen PMBs. Die MW der NH-PMBs sind höher, und die MW bei den H-PMBs sind tiefer als der Durchschnitt (Tabelle 29).

Bei den frischen PMBs liegt die Differenz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Einzelwert durchschnittlich bei 3.19 °C. Dabei ist die Differenz bei H-PMBs etwas höher als bei den NH-PMBs. Bei den rückgewonnenen PMBs ist die Differenz mit 3.66 °C etwas höher als bei den frischen PMBs. NH-PMBs streuen weniger stark als H-PMBs (Tabelle 24).

Ein Vergleich mit der r aus SN EN 1427:2016-03 «Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren» [31] ist nicht für alle untersuchten PMBs möglich, da die Norm nur für PMBs, deren R+K bei Wasser bestimmt wurde, eine r angibt. Diese

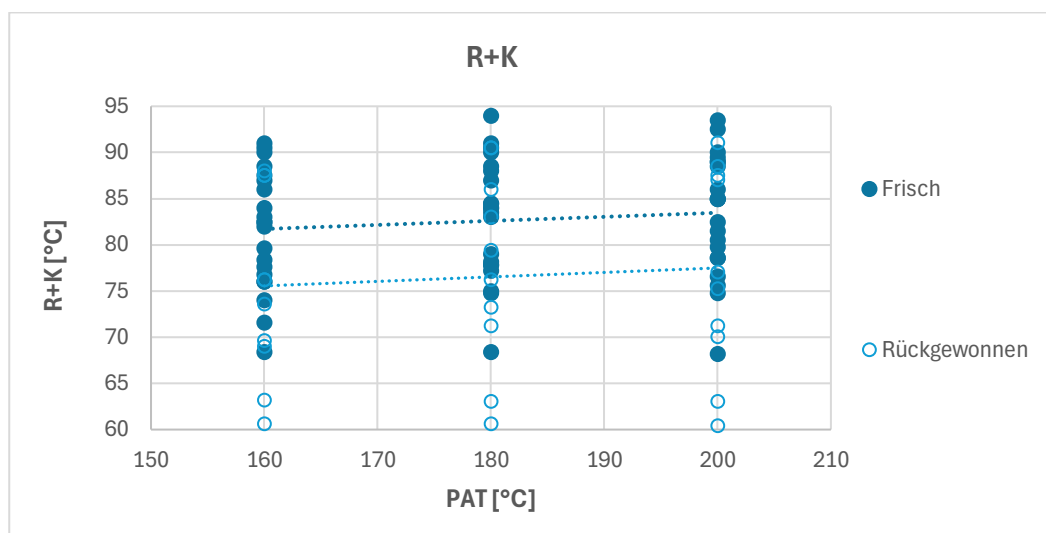


Abbildung 16: Alle Werte des R+K und die Trendlinien, die für die Regressionsanalysen benutzt wurden

liegt bei 1.5 °C (SN EN 1427:2016-03 [31], Tabelle 1). Von den acht frischen PmBs, deren R+K mit Wasser bestimmt wurde, liegen drei (38 %) innerhalb der r . Bei den rückgewonnenen PmBs wurde bei vier PmBs der R+K mit Wasser bestimmt, von denen zwei (50 %) innerhalb der r liegen. Die PmBs ausserhalb der r befinden sich, mit Ausnahme des frischen PmB 65/105-60 von Hersteller 2, noch relativ nah an der r (Abbildung 17, Tabelle 26 und Tabelle 27). Beim ROBIN 2024 wurde das PmB 90/150-80 mit Glycerin untersucht, und die aus den Ergebnissen berechnete r beträgt 1.0. Von den 13 frischen PmBs, die ebenfalls mit Glycerin gemessen wurden, liegen nur zwei (15 %) innerhalb der r vom ROBIN 2024. Bei den rückgewonnenen PmBs können fünf mit der r vom ROBIN 2024 verglichen werden, von denen aber keines (0 %) innerhalb der berechneten r liegt (Tabelle 26 und Tabelle 27). Die PmBs, die ausserhalb der r liegen, sind etwas deutlicher von der r entfernt. Die grösste Streuung haben das frische und das rückgewonnene PmB 90/150-80 von Hersteller 4 (Abbildung 17, Tabelle 26 und Tabelle 27).

4.7 Penetrationsindex I_P

Abbildung 18 zeigt die berechneten I_P .

Die Boxen in den Boxplot-Diagrammen der absoluten Werte sehen sich sehr ähnlich. Nur bei den frischen PmBs liegt die 160 °C-Box etwas tiefer als die anderen beiden. Die Mediane und MW sind ähnlich, nur die bei 160 °C liegen beide etwas tiefer als bei den anderen beiden PAT. Der Ausreisser bei 160 °C bei den frischen PmBs ist im Vergleich zu den anderen Werten derselben Prüfserie unauffällig (Abbildung 19 und Tabelle 30).

Bei den relativen Abweichungen lässt sich bei den frischen PmBs ein Aufwärtstrend sowohl bei den Medianen als auch bei den MW erkennen. Bei den rückgewonnenen PmBs haben die Mediane bei 180 °C PAT die höchsten Abweichungen, bei den MW sind die Abweichungen bei 160 °C PAT am geringsten. Bei den frischen PmBs gehören die meisten Ausreisser zu PmBs, bei denen der entsprechende Wert im Vergleich zu

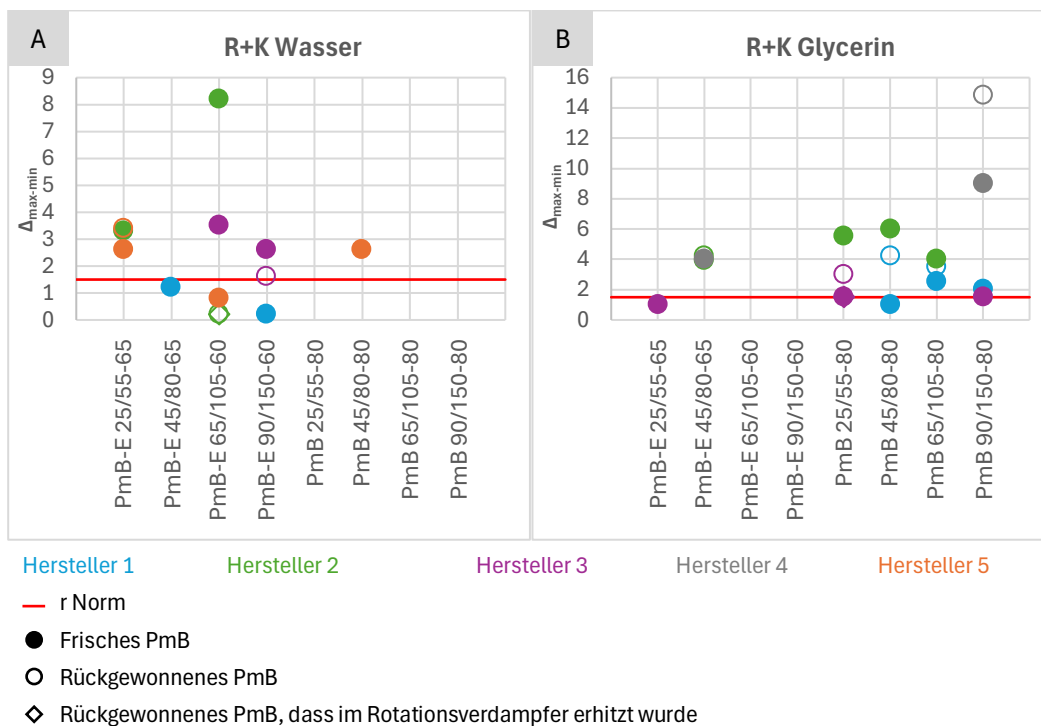


Abbildung 17: Übersicht über die PmBs, deren Werte des R+K innerhalb oder ausserhalb der r der SN EN 1427:2016-03 «Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren» [31] (A) oder des ROBIN 2024 (B) liegen.

den anderen beiden Werten derselben Prüferie deutlich höher oder tiefer ist. Nur bei einem Ausreisser handelt es sich um einen Wert, bei dem nach dem Erwärmen noch Klümpchen und Verdickungen vorhanden waren. Bei einem Ausreisser ist der dazugehörige Wert unauffällig. Bei den rückgewonnenen PmBs gehören alle Ausreisser zum PmB-E 45/80-65 von Hersteller 2, die Werte sind aber unauffällig (Abbildung 20, Tabelle 41, Tabelle 42 und Tabelle 43).

Bei zwölf der 21 frischen PmBs (57 %) wurden die höchsten I_P bei einer PAT von 200 °C berechnet und bei sechs weiteren (29 %) bei 180 °C (Tabelle 17). Bei den rückgewonnenen PmBs haben fünf PmBs (50 %) ihren höchsten Einzelwert bei 180 °C, die restlichen PmBs verteilen sich über die anderen beiden PAT (Tabelle 18).

Bei den Trendlinien zeigen 14 der frischen PmBs (67 %) einen Anstieg hin zu höheren PAT (Abbildung 18 und Tabelle 19). Bei den rückgewonnenen PmBs haben sechs (60 %) keine Steigung (Abbildung 18 und Tabelle 20). Die Trendlinie über alle Einzelwerte der frischen PmBs beträgt 0.02 1/°C, bei den rückgewonnenen PmBs beträgt sie 0.01 1/°C (Abbildung 21). Die Regressionsanalyse aller frischen PmBs ergab einen p-Wert von 0.194 und bei den rückgewonnenen PmBs wurde ein p-Wert von 0.821 ermittelt (Tabelle 21). Die Steigungen der Trendlinien sind also statistisch nicht signifikant.

Bei den frischen PmBs liegen sechs der 63 Einzelwerte (10 %) ausserhalb der entsprechenden SD. Von diesen sechs Werten betreffen fünf die PAT 160 °C (Tabelle 22 und Tabelle 30). Sowohl bei den NH-PmBs als auch den H-PmBs betrifft es jeweils drei Einzelwerte. Bei den rückgewonnenen PmBs liegt nur ein Einzelwert (3 %) eines

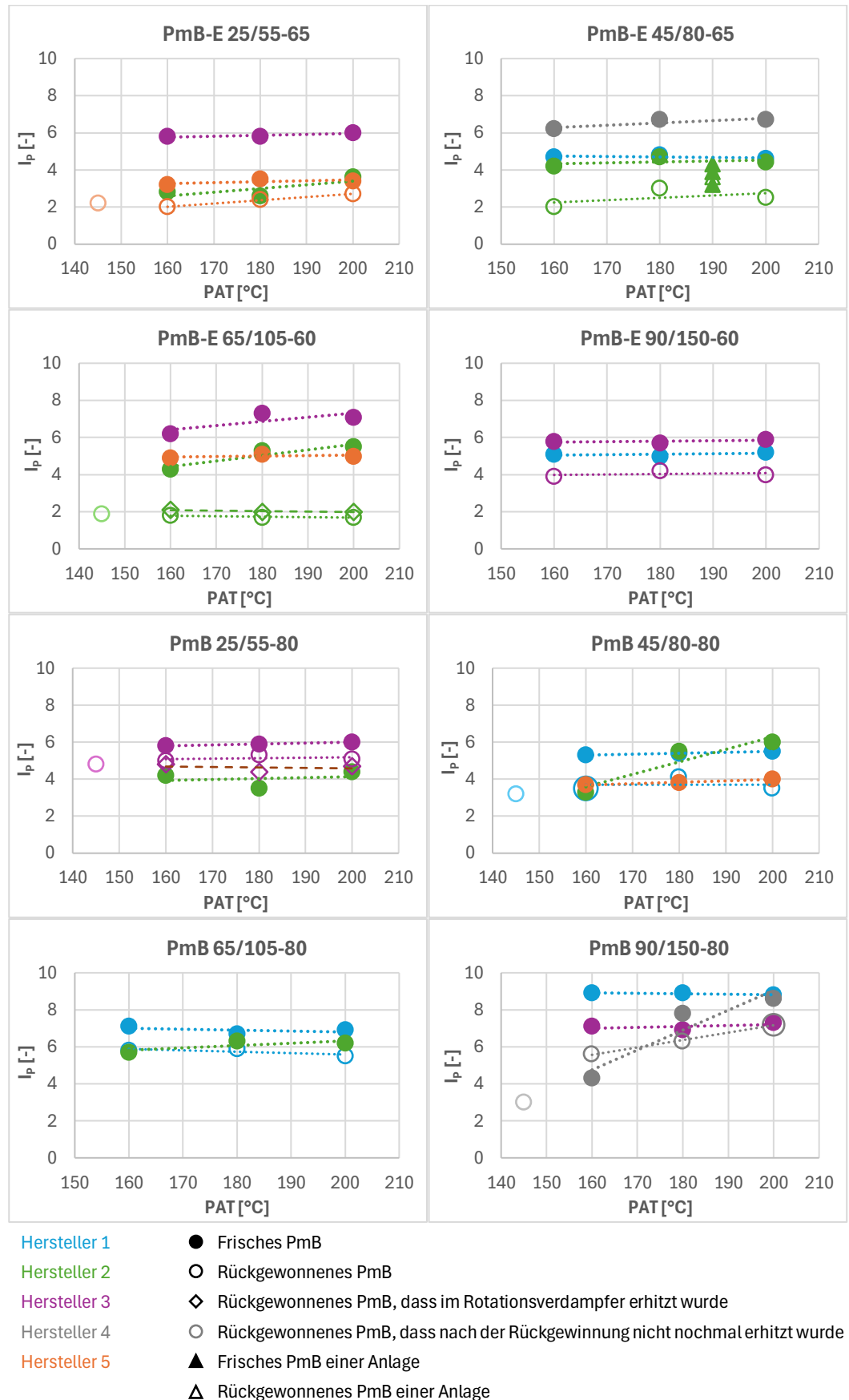


Abbildung 18: Die Werte des berechneten I_p

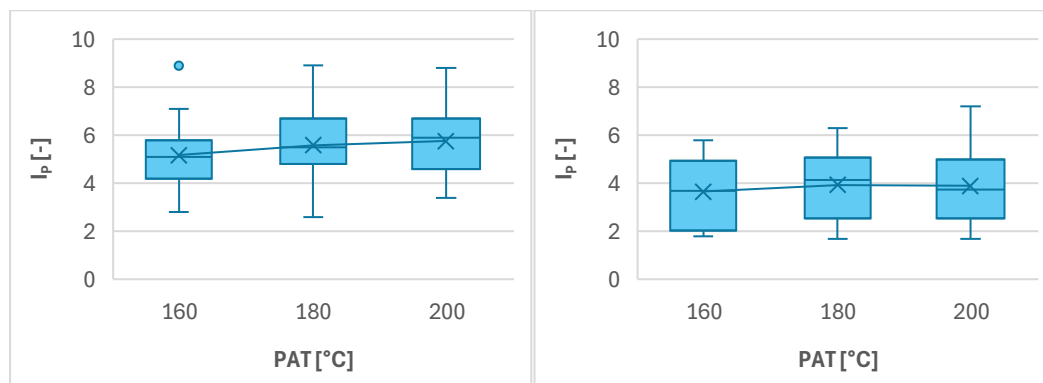


Abbildung 19: Die Boxplots der absoluten Werte des I_p der frischen (links) und rückgewonnenen PmBs (rechts)

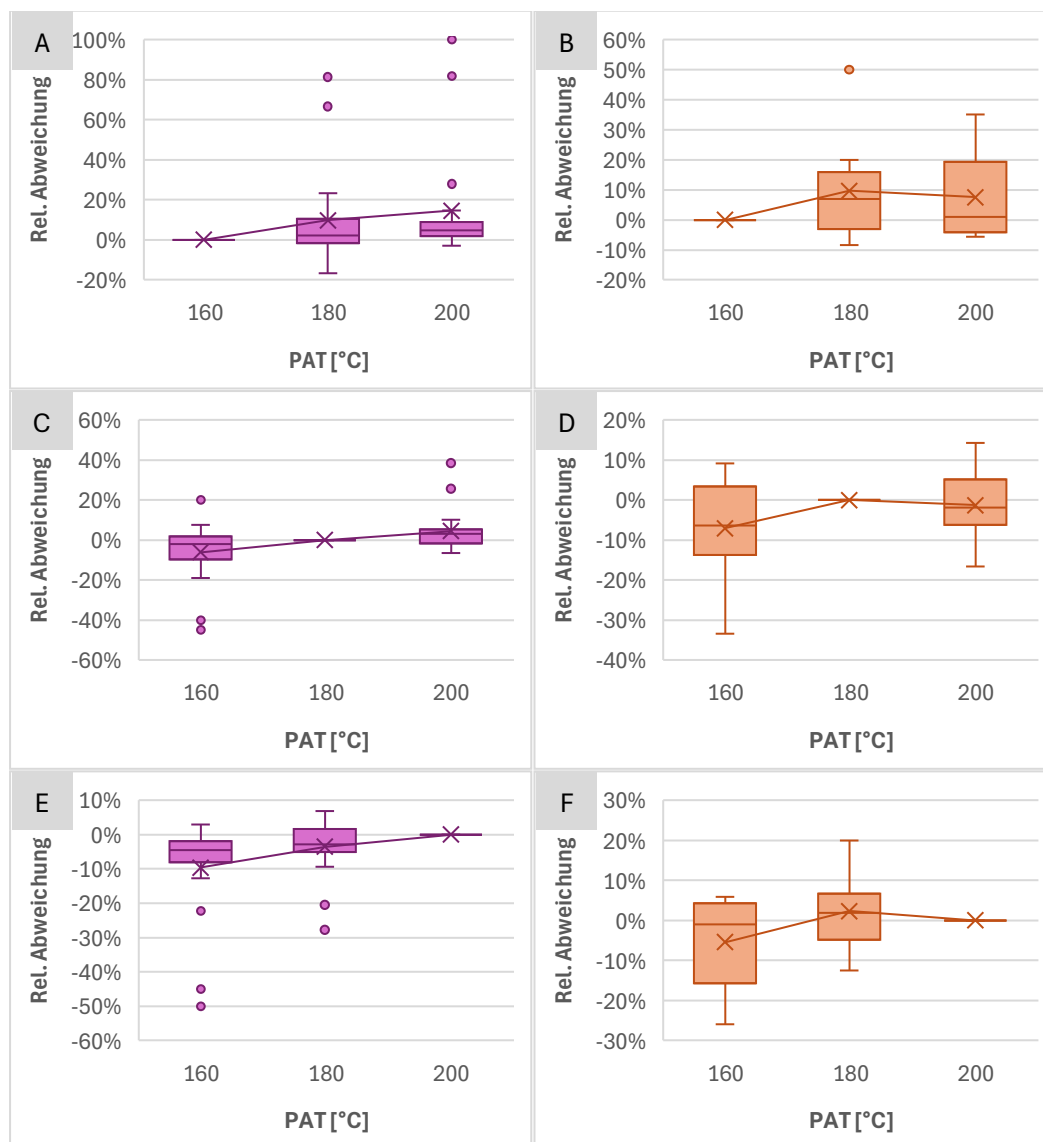


Abbildung 20: Die Boxplots der relativen Abweichungen des I_p bei 160 °C Referenztemperatur der frischen (A) und rückgewonnenen PmBs (B), bei 180 °C Referenztemperatur der frischen (C) und rückgewonnenen PmBs (D) und bei 200 °C Referenztemperatur der frischen (E) und rückgewonnenen PmBs (F)

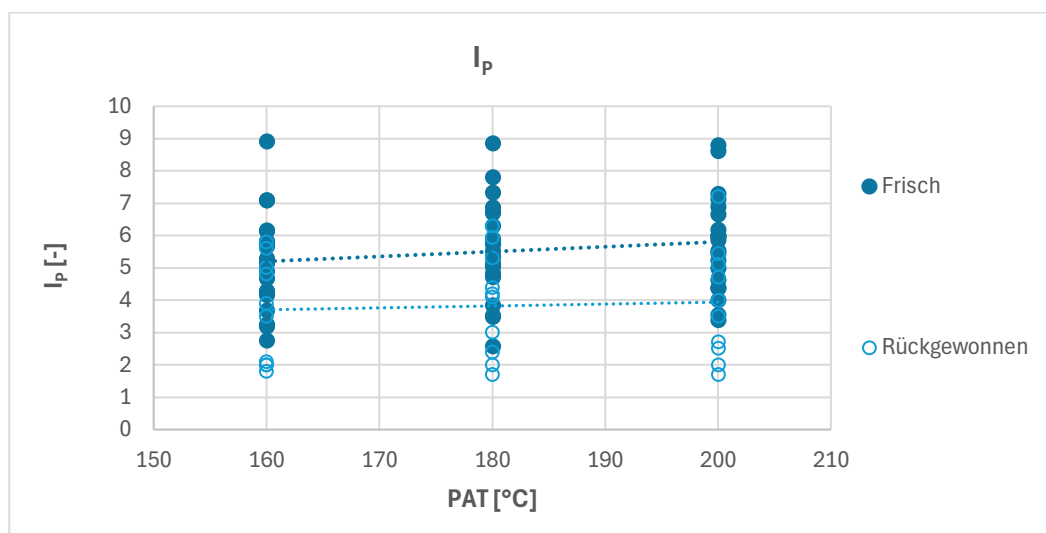


Abbildung 21: Alle Werte des I_p und die Trendlinien, die für die Regressionsanalysen benutzt wurden

H-PmBs bei 180 °C ausserhalb der SD (Tabelle 23 und Tabelle 30).

Sämtliche Einzelwerte, sowohl bei den frischen als auch bei den rückgewonnenen PmBs, liegen innerhalb des entsprechenden KI. Ausserdem liegen alle z-scores im Bereich zwischen -2 und +2 (Tabelle 30).

Die MW der frischen PmBs liegen im Durchschnitt 1.64 höher als die der jeweiligen rückgewonnenen PmBs. Bei den NH-PmBs ist dieser Unterschied grösser, bei den H-PmBs ist er kleiner als der Durchschnitt (Tabelle 24).

Die I_p der frischen PmBs zeigen eine durchschnittliche Differenz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten I_p von 0.75. Bei den NH-PmBs ist die Differenz tiefer und bei den H-PmBs höher als der Durchschnitt. Die durchschnittliche Differenz beträgt bei allen rückgewonnenen PmBs 0.55. Genau wie bei den frischen PmBs streuen NH-PmBs weniger stark als H-PmBs (Tabelle 25).

Mit den Daten des ROBIN 2024 konnte eine r von 0.4 berechnet werden. Von den 21 frischen PmBs liegen zwölf (57 %) innerhalb dieser r , von den zehn rückgewonnenen PmBs sind es sechs (60 %; Tabelle 26 und Tabelle 27). Die PmBs, deren Streuung grösser als die r ist, liegen relativ nahe an der r . Nur das frische PmB 45/80-80 von Hersteller 2 und das frische und rückgewonnene PmB 90/150-80 von Hersteller 4 liegen weiter weg (Abbildung 22).

4.8 Elastische Rückstellung

Sowohl bei den frischen als auch bei den rückgewonnenen PmBs erfüllen alle Werte die Anforderungen (Abbildung 23 und Tabelle 31). Die elastische Rückstellung ist der BKW, bei denen sich die Werte in Anhängigkeit der PAT am wenigsten verändern.

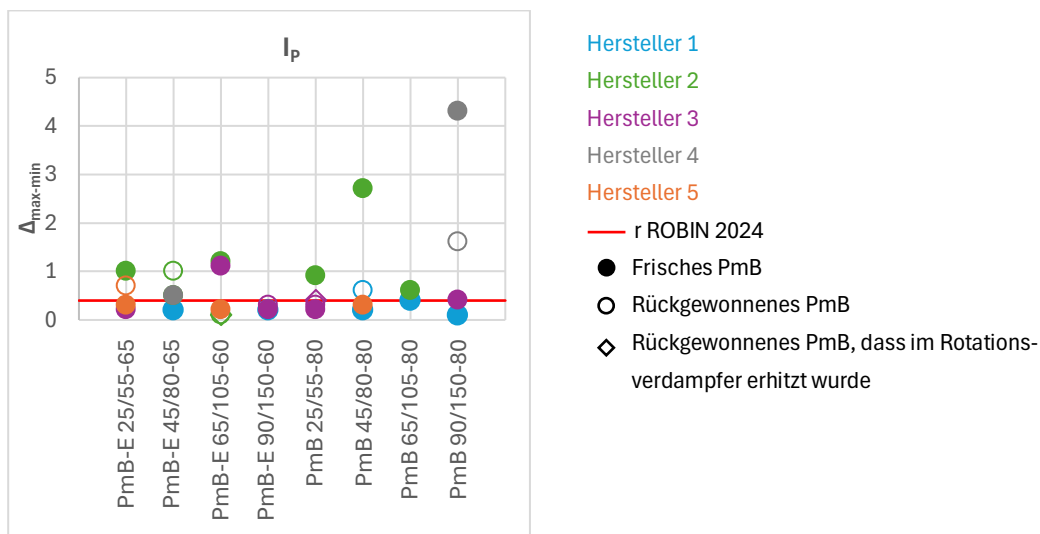


Abbildung 22: Übersicht über die PmBs, deren Werte des I_p innerhalb oder ausserhalb der r des ROBIN 2024 liegen.

Bei den Boxplots der frischen PmBs sieht man, dass sich die Lage der Boxen etwas unterscheidet, bei den rückgewonnenen PmBs sind sie allerdings sehr ähnlich. Der Median und die MW ändern sich minimal bis gar nicht. Die Streuung ist bei 200 °C am höchsten. Die Ausreisser sind im Vergleich zu den anderen Werten der entsprechenden Prüfserie unauffällig (Abbildung 24 und Tabelle 40).

Bei den relativen Abweichungen zeigt sich bei den frischen PmBs, dass sich der Median überhaupt nicht ändert und immer 0,0 % beträgt. Bei den rückgewonnenen PmBs ist das nicht so, ein Trend lässt sich aber nicht erkennen. Bei den MW ist sowohl bei den frischen als auch bei den rückgewonnenen PmBs die Abweichung bei 160 °C PAT tiefer als bei 180 °C und 200 °C. Bei den frischen PmBs fallen die vielen Ausreisser auf. Diese sind auf mehrere PmBs verteilt und kommen wahrscheinlich daher, dass die Werte bei der elastischen Rückstellung generell wenig streuen und grössere Unterschiede direkt zu Ausreissern führen. Nur bei zwei Ausreissern handelt es sich um Datenpunkte, bei denen das entsprechende PmB nach dem Erwärmen Klümpchen und Verdickungen aufwies. Bei den rückgewonnenen PmBs gehören die beiden Ausreisser zum PmB 90/150-80 von Hersteller 4, bei dem solche Klümpchen und Verdickungen vorhanden waren (Abbildung 25, Tabelle 41, Tabelle 42 und Tabelle 43).

Die Einzelwerte bei der elastischen Rückstellung streuen sehr wenig. Bei sieben der 21 frischen PmBs (33 %) wurde kein Unterschied in den drei Einzelwerten der jeweiligen Prüfserie festgestellt. Bei den übrigen PmBs lässt sich kein Zusammenhang zwischen dem höchsten Einzelwert einer Prüfserie und der PAT feststellen (Tabelle 17). Auch die rückgewonnenen PmBs zeigen keinen Trend hin zu höheren Einzelwerten bei höheren oder tieferen PAT (Tabelle 18).

Die geringe Streuung der Einzelwerte zeigt sich auch bei den Trendlinien. Zehn der 21 frischen PmBs (48 %) zeigen keine Steigung (Abbildung 23 und Tabelle 19). Bei den Trendlinien der rückgewonnenen PmBs lässt sich kein Trend erkennen (Abbildung 23 und Tabelle 20). Die Trendlinie, die sich aus den Einzelwerten aller frischen PmBs ergibt, hat eine Steigung von 0,01 %/°C. Die durchschnittliche Trendlinie aller

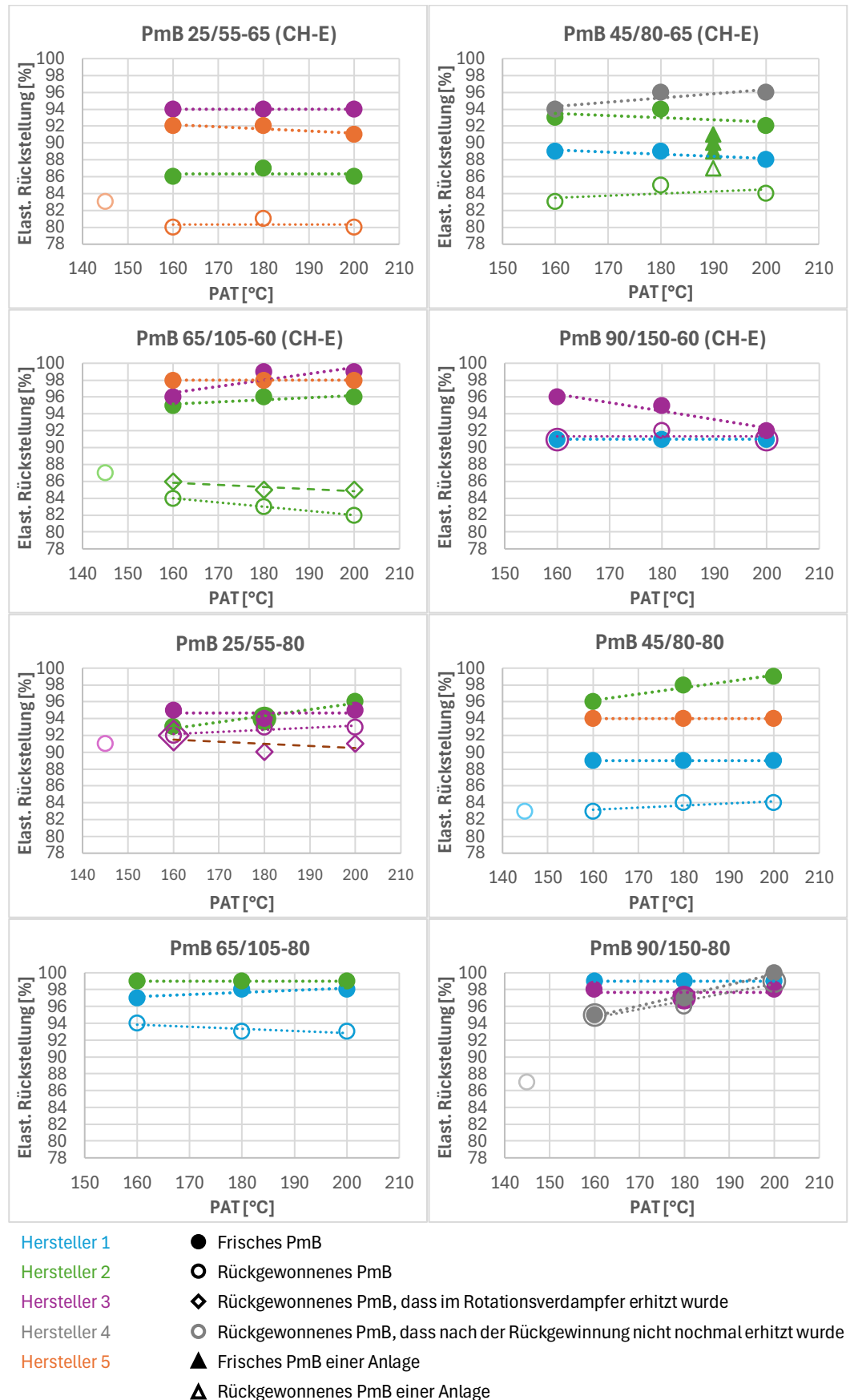


Abbildung 23: Die Ergebnisse der elastischen Rückstellung

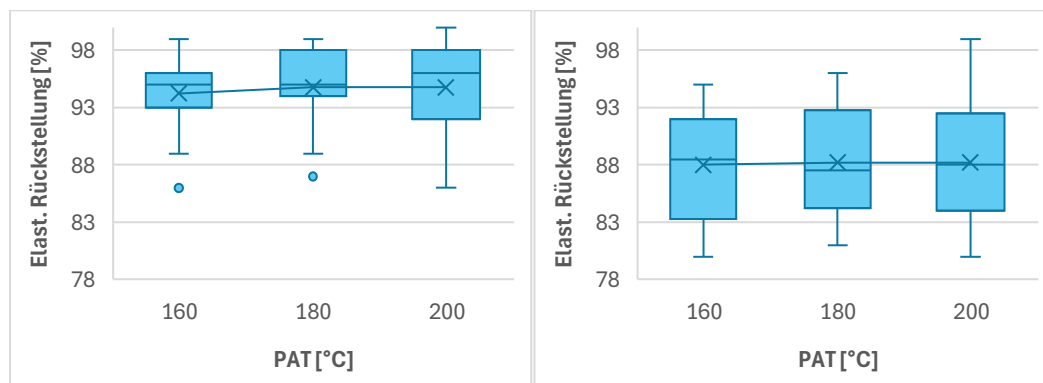


Abbildung 24: Die Boxplots der absoluten Werte der elastischen Rückstellung der frischen (links) und rückgewonnenen PmBs (rechts)

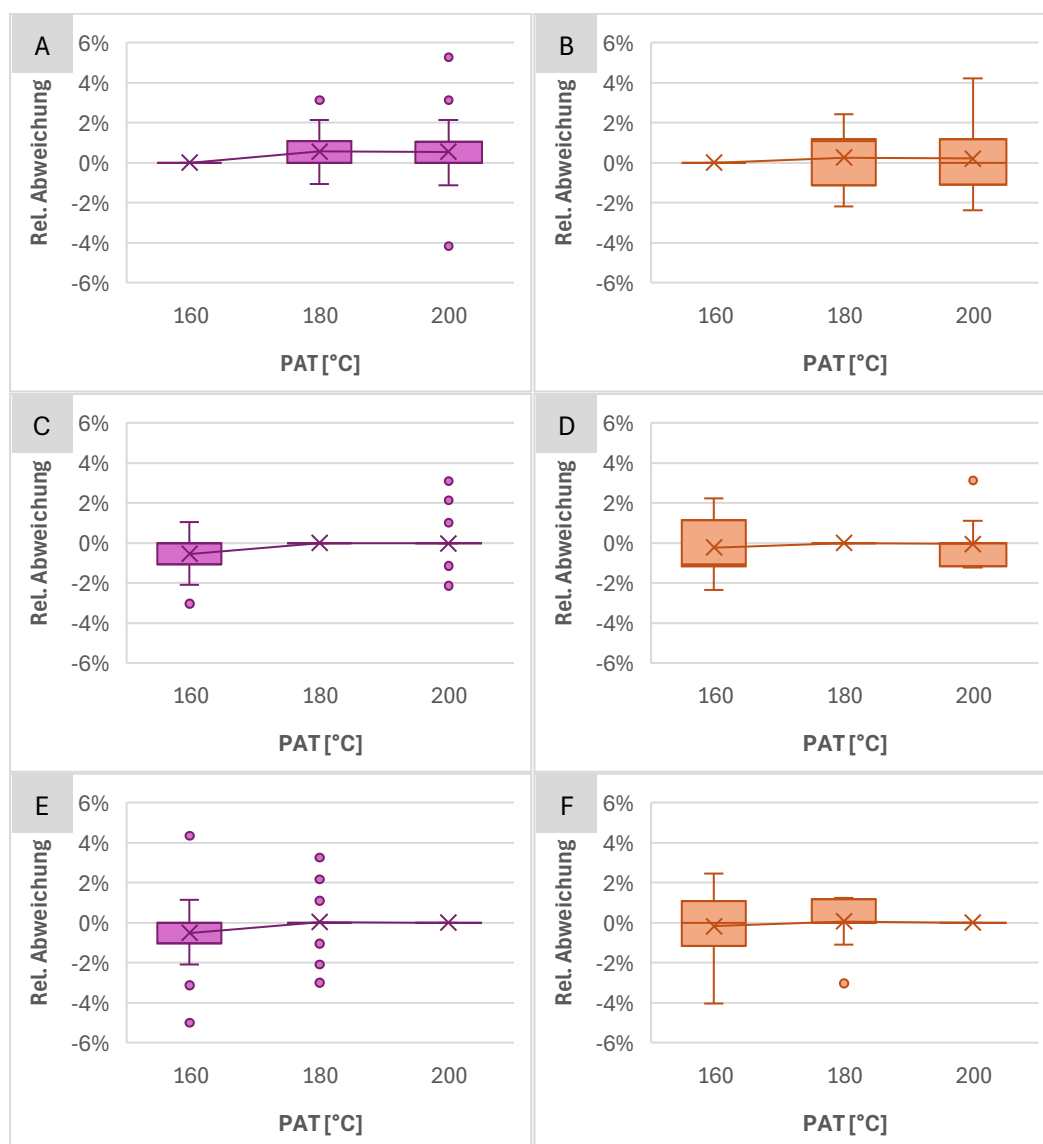


Abbildung 25: Die Boxplots der relativen Abweichungen der elastischen Rückstellung bei 160 °C Referenztemperatur der frischen (A) und rückgewonnenen PmBs (B), bei 180 °C Referenztemperatur der frischen (C) und rückgewonnenen PmBs (D) und bei 200 °C Referenztemperatur der frischen (E) und rückgewonnenen PmBs (F)

rückgewonnenen PmBs steigt ebenfalls um 0.01 %/°C an (Abbildung 26). Bei den Werten aller frischen PmBs ergab die Regressionsanalyse einen p-Wert von 0.645, bei den rückgewonnenen PmBs wurde ein p-Wert von 0.935 ermittelt (Tabelle 21). Beide ermittelten p-Werte zeigen keine statistische Signifikanz.

Die Einzelwerte aller frischen und aller rückgewonnenen PmBs liegen innerhalb der entsprechenden SD (Tabelle 22, Tabelle 23 und Tabelle 31).

Keiner der Einzelwerte liegt ausserhalb des entsprechenden KI und die z-scores liegen zwischen -2 oder +2 (Tabelle 31).

Der durchschnittliche Unterschied zwischen den MW der frischen PmBs und des jeweiligen rückgewonnenen PmBs beträgt 6.23 %. Bei den NH-PmBs ist dieser Unterschied grösser und bei den H-PmBs kleiner als der Durchschnitt (Tabelle 24).

Die Differenz der frischen PmBs liegt im Durchschnitt bei 1.38 %. Bei den NH-PmBs ist die Differenz geringfügig niedriger und die Differenz bei H-PmBs geringfügig höher als der Durchschnitt. Bei den rückgewonnenen PmBs beträgt die Differenz zwischen dem höchsten und dem tiefsten Einzelwert 1.60 %. Genau wie bei den frischen PmBs streuen die NH-PmBs weniger stark als die H-PmBs (Tabelle 25).

Die Norm SN EN 13398:2018-06 «Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der elastischen Rückstellung von modifiziertem Bitumen» [32] gibt für die r eine zulässige Toleranz von 4 % des MW an. Bei allen frischen und allen rückgewonnenen PmBs liegen alle Einzelwerte innerhalb der r (Abbildung 27, Tabelle 26 und Tabelle 27).

4.9 Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahren BTSV

4.9.1 Temperatur T_{BTSV}

Abbildung 28 und Tabelle 32 zeigen die ermittelten Werte der T_{BTSV} .

Die Boxplots der absoluten Werte zeigen keine nennenswerten Unterschiede zwischen den drei PAT. Der Ausreisser bei 160 °C betrifft den Wert des frischen PmB 90/150-80, der 5.1 °C bzw. 6.2 °C unterhalb der anderen beiden Werte liegt. Der andere Ausreisser bei 160 °C bei den frischen PmBs ist im Vergleich zu den anderen Werten seiner Prüfsérie unauffällig (Abbildung 29 und Tabelle 40).

Bei den relativen Abweichungen lassen sich keine grossen Änderungen oder Trends erkennen. Die Ausreisser bei den frischen PmBs gehören, bis auf einen, zu PmBs, die Klümpchen und Verdickungen aufwiesen. Die Einzelwerte dieser PmBs sind aber im Vergleich mit den übrigen Werten der entsprechenden Prüfsérie unauffällig. Nur bei einem der Ausreisser handelt es sich um einen Wert, der sich deutlicher von den anderen beiden ermittelten Werten unterscheidet. Die restlichen Ausreisser bei den frischen PmBs sind unauffällig. Bei den rückgewonnenen PmBs gehören die beiden Ausreisser zum PmB 65/105-80 von Hersteller 1, die Werte sind aber unauffällig (Abbildung 30, Tabelle 41, Tabelle 42 und Tabelle 43).

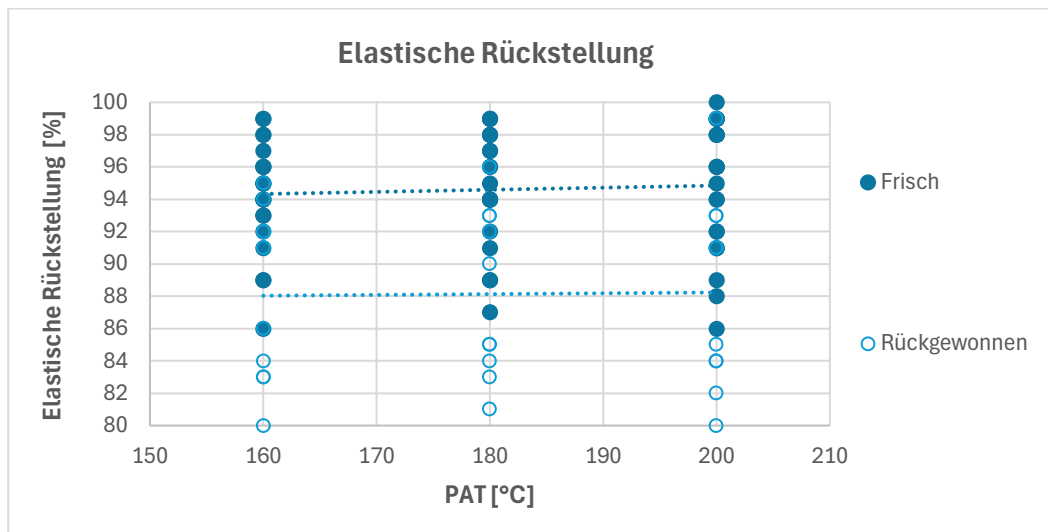


Abbildung 26: Alle Werte der elastischen Rückstellung und die Trendlinien, die für die Regressionsanalysen benutzt wurden

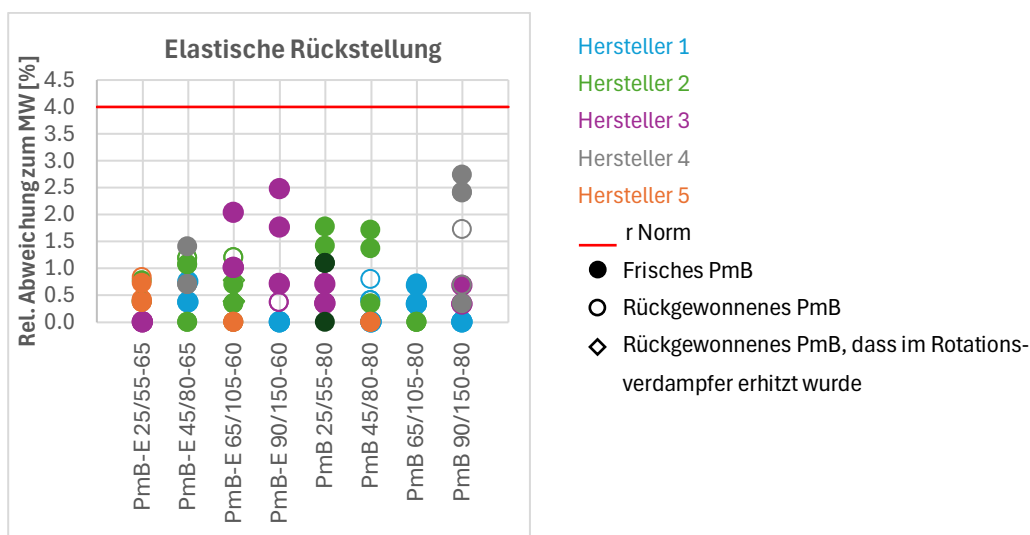


Abbildung 27: Übersicht über die PmBs, deren Werte der elastischen Rückstellung innerhalb oder ausserhalb der r der SN EN 13398:2018-06 «Bestimmung der elastischen Rückstellung von modifiziertem Bitumen» [32] liegen.

Bei den höchsten Einzelwerten der frischen PmBs ist kein klarer Trend der T_{BTSV} erkennbar (Tabelle 17). Auch die höchsten Einzelwerte der rückgewonnenen PmBs zeigen keinen Trend hinsichtlich der PAT. Bemerkenswert ist, dass bei einem rückgewonnenen PmB alle Einzelwerte identisch waren (Tabelle 18).

Auch bei den Trendlinien lässt sich kein klarer Trend erkennen, weder bei den frischen noch bei den rückgewonnenen PmBs (Abbildung 28, Tabelle 19 und Tabelle 20). Sowohl die Trendlinie der Einzelwerte aller frischen PmBs als auch die aller rückgewonnenen PmBs hat keine Steigung. Die Regressionsanalyse aller frischen PmBs ergab einen p-Wert von 0.962 (

Abbildung 31). Bei den rückgewonnenen PmBs wurde ein p-Wert von 0.958 ermittelt (Tabelle 21). Somit zeigt keiner der ermittelten p-Werte statistische Signifikanz.

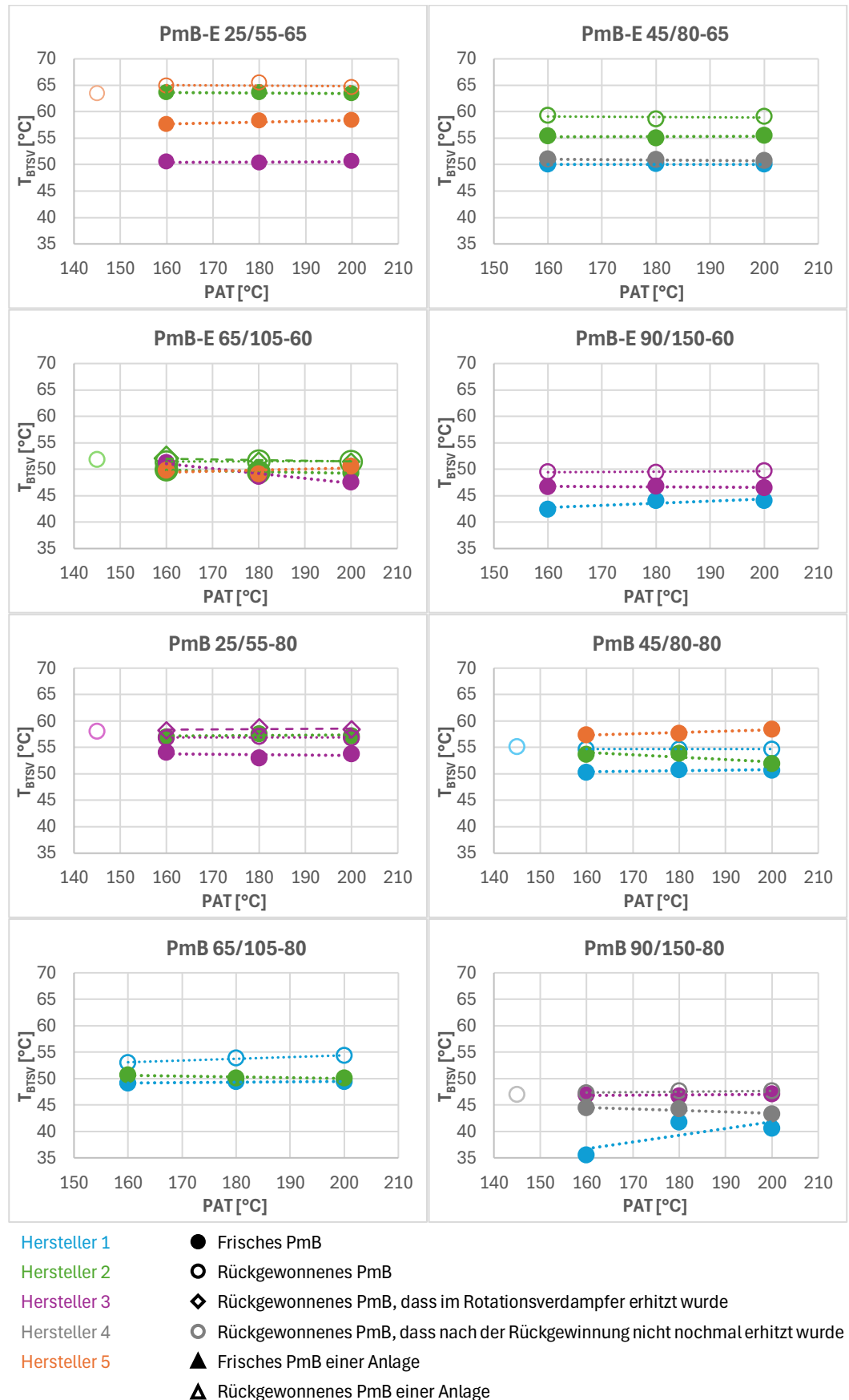


Abbildung 28: Die Ergebnisse des T_{BTSV}

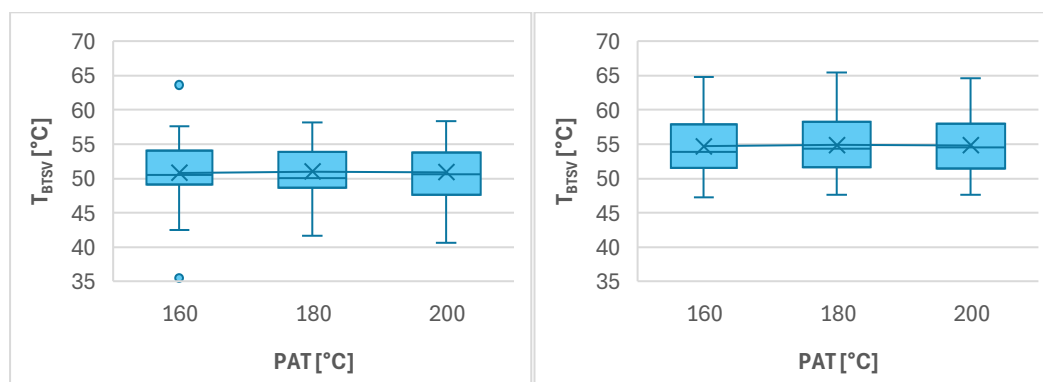


Abbildung 29: Die Boxplots der absoluten Werte der T_{BTSV} der frischen (links) und rückgewonnenen PmBs (rechts)

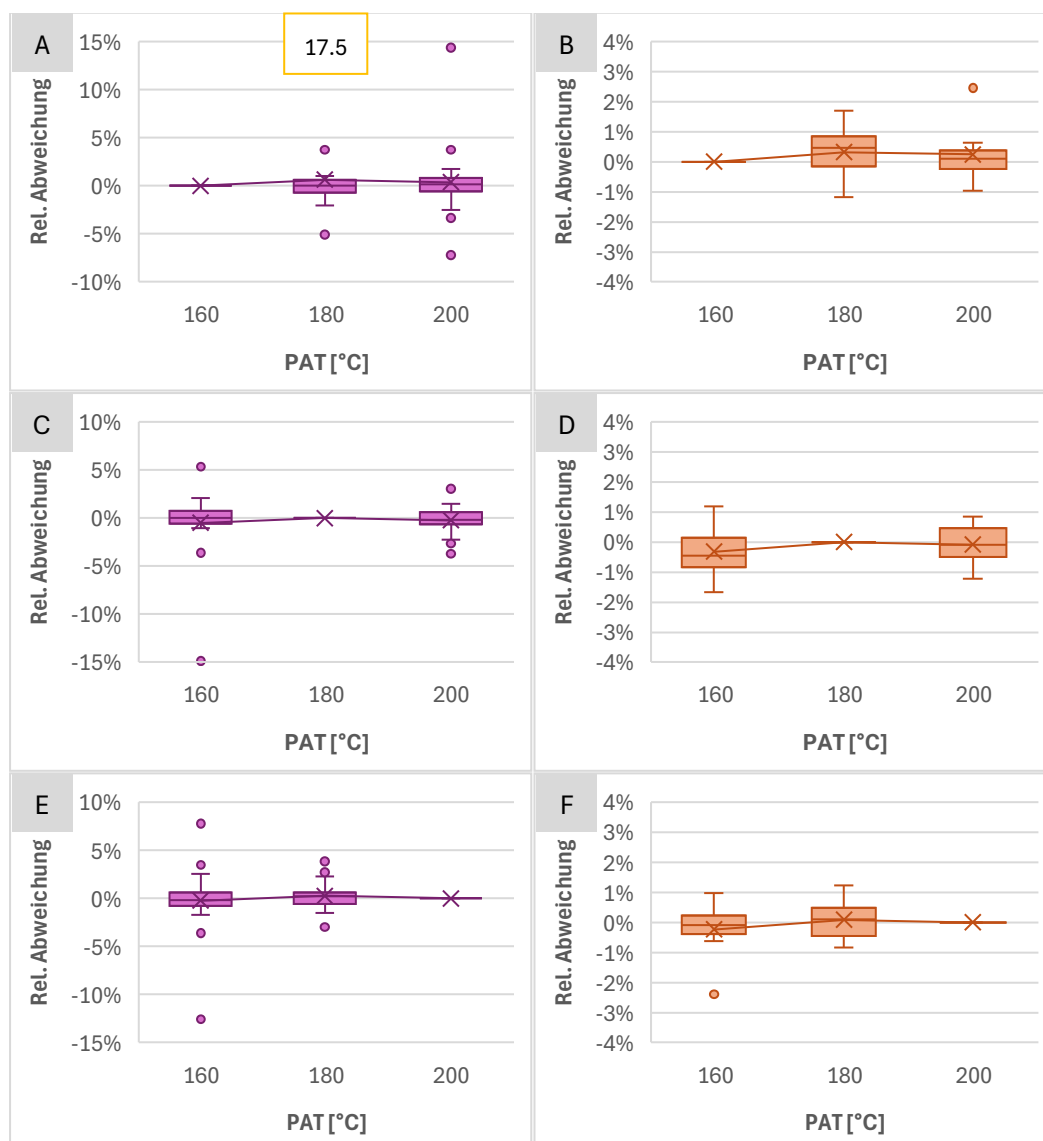


Abbildung 30: Die Boxplots der relativen Abweichungen der T_{BTSV} bei 160 °C Referenztemperatur der frischen (A) und rückgewonnenen PmBs (B), bei 180 °C Referenztemperatur der frischen (C) und rückgewonnenen PmBs (D) und bei 200 °C Referenztemperatur der frischen (E) und rückgewonnenen PmBs (F)

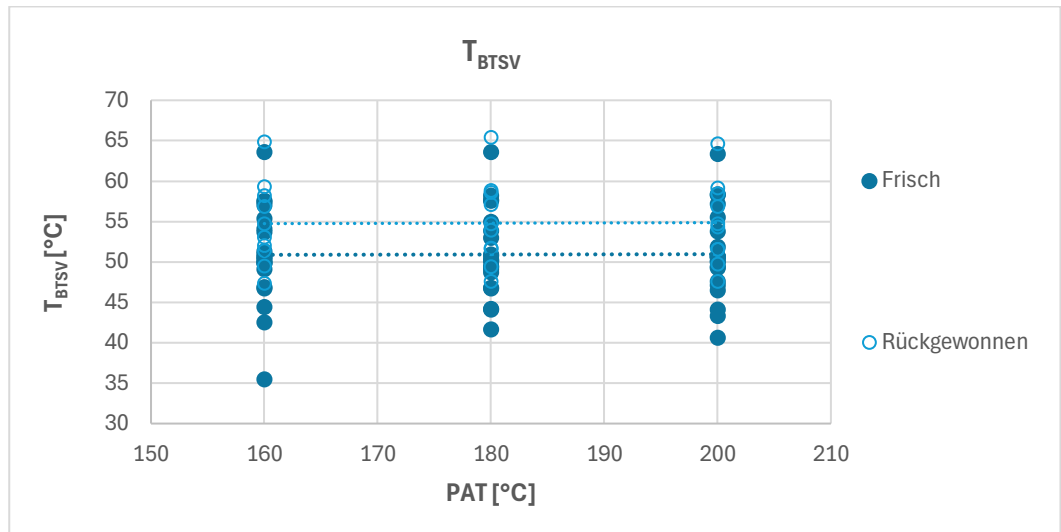


Abbildung 31: Alle Werte der T_{BTSV} und die Trendlinien, die für die Regressionsanalysen benutzt wurden

Bei den frischen PmBs liegen acht der 63 Einzelwerte (13 %) ausserhalb der entsprechenden SD. Fünf dieser Einzelwerte betreffen die PAT 160 °C (Tabelle 22 und Tabelle 32). Ebenfalls fünf dieser Einzelwerte gehören zu NH-PmBs. Bei den rückgewonnenen PmBs liegt ein Einzelwert (3 %) bei 180 °C ausserhalb der SD. Dies betrifft ein NH-PmB (Tabelle 23 und Tabelle 32).

Sowohl bei den frischen als auch bei den rückgewonnenen PmBs liegen alle Einzelwerte innerhalb des entsprechenden KI und alle z-scores liegen im Bereich zwischen -2 und +2 (Tabelle 32).

Die MW der frischen PmBs liegen durchschnittlich um 3.78 °C unter den MW der jeweiligen rückgewonnenen PmBs. Bei den NH-PmBs ist dieser Unterschied kleiner, bei den H-PmBs ist er grösser als der Durchschnitt (Tabelle 24).

Die Differenz der T_{BTSV} liegt bei durchschnittlich 1.12 °C. Bei den NH-PmBs liegt die Differenz unterhalb des Durchschnitts, bei den H-PmBs liegt sie darüber. Die Differenz beträgt bei allen rückgewonnenen PmBs, den H-PmBs und den NH-PmBs jeweils 0.50 °C (Tabelle 25).

SN EN 17643:2016-09 «Bestimmung der Äqui-Schermodultemperatur und des Phasenwinkels im Dynamischen Scherrheometer (DSR) – BTSV-Prüfung» [33] (Tabelle 2) gibt für die T_{BTSV} eine r von 0.5 °C an. Von den 21 frischen PmBs liegen neun (42 %) innerhalb dieser r . Bei den zehn rückgewonnenen PmBs sind es sechs (60 %). Bei den PmBs, die ausserhalb der r liegen, ist ihre Streuung in den meisten Fällen nicht viel grösser als die r , mit Ausnahme des frischen PmB 65/105-60 von Hersteller 3 und des frischen PmB 90/150-80 von Hersteller 1 (Abbildung 32, Tabelle 26 und Tabelle 27). Beim VAB/ALA 2022 wurde für die T_{BTSV} eine r von 4.08 berechnet. 20 der 21 frischen PmBs (95 %) und alle rückgewonnenen PmBs liegen innerhalb dieser r (Abbildung 32, Tabelle 26 und Tabelle 27). Das PmB 90/150-80 von Hersteller 1 liegt relativ deutlich über der r .

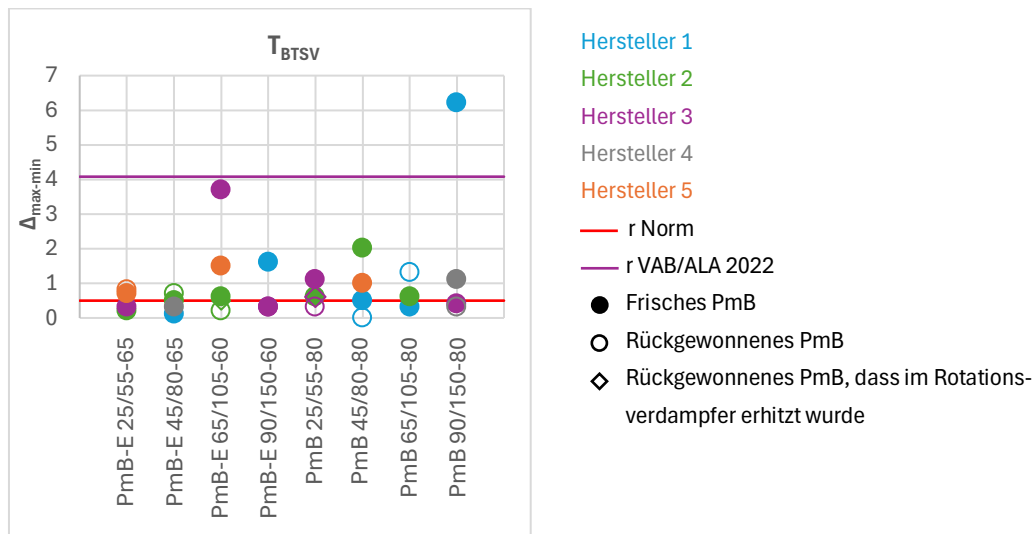


Abbildung 32: Übersicht über die PmBs, deren Werte der T_{BTSV} innerhalb oder ausserhalb der r der SN EN 17643:2016-09 «Bestimmung der Äqui-Schermoduletemperatur und des Phasenwinkels im Dynamischen Scherrheometer (DSR) – BTSV-Prüfung [33] oder des VAB/ALA 2022 liegen

4.9.2 Phasenwinkel δ_{BTSV}

Abbildung 33 und Tabelle 33 zeigt die Ergebnisse des δ_{BTSV} .

Wie schon bei der T_{BTSV} zeigen die Boxplots des δ_{BTSV} keine nennenswerten Unterschiede zwischen den drei PAT. Auffällig ist, dass es keine Ausreisser gibt und dass die Boxen der rückgewonnenen PmBs eine linksschiefe Asymmetrie zeigen (Abbildung 34 und Tabelle 40).

Die relativen Abweichungen zeigen, dass bei den frischen PmBs die MW bei 160 °C geringfügig höher sind als bei den anderen beiden PAT. Bei den rückgewonnenen PmBs sind die Mediane und MW bei 200 °C geringfügig höher. Die Ausreisser bei den frischen PmBs stammen hauptsächlich von PmBs, bei denen die Werte im Vergleich zu den anderen PmBs etwas mehr streuen. Die Werte an sich sind aber unauffällig. Wenige Ausreisser gehören zu Proben, bei denen entweder nach dem Erwärmen noch Klümpchen und Verdickungen vorhanden waren oder bei denen ein Wert etwas höher oder tiefer war als bei den beiden anderen. Bei den rückgewonnenen PmBs betreffen alle Ausreisser das PmB 90/150-80 von Hersteller 4, bei dem nach dem Erwärmen noch Klümpchen und Verdickungen vorhanden waren, die Werte an sich sind aber unauffällig (Abbildung 35, Tabelle 41, Tabelle 42 und Tabelle 43).

Die höchsten Einzelwerte des δ_{BTSV} zeigen ein ebenso unklares Bild wie die der T_{BTSV} (Tabelle 17). Auch bei den rückgewonnenen PmBs ist kein klarer Zusammenhang zwischen dem höchsten Einzelwert einer Prüfserie und der PAT erkennbar (Tabelle 18). Bemerkenswert ist, dass sowohl bei den frischen als auch den rückgewonnenen PmBs jeweils bei einem PmB alle drei ermittelten Einzelwerte identisch waren.

Interessanterweise ist sowohl bei den frischen als auch bei den rückgewonnenen PmBs die Verteilung der Steigung der Trendlinien genau gleich wie bei der T_{BTSV} (Abbildung 33 und Tabelle 19), es sind aber andere PmBs betroffen. Die durchschnittliche Steigung

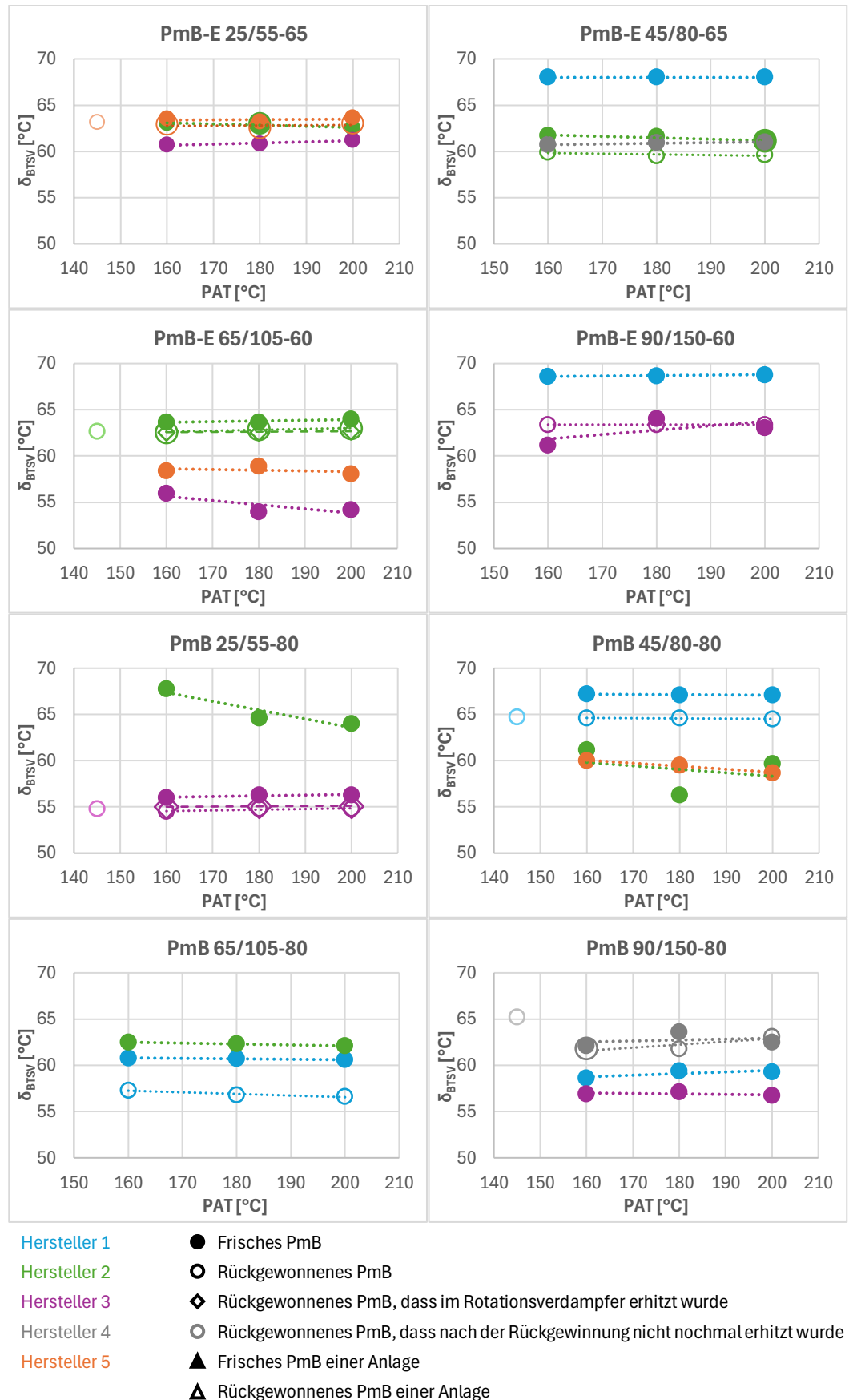


Abbildung 33: Die Ergebnisse des δ_{BTSV}

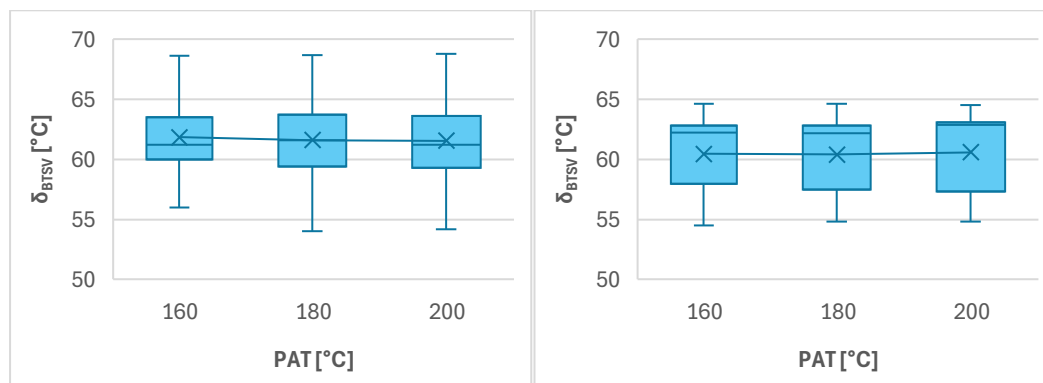


Abbildung 34: Die Boxplots der absoluten Werte des δ_{BTSV} der frischen (links) und rückgewonnenen PMBs (rechts)

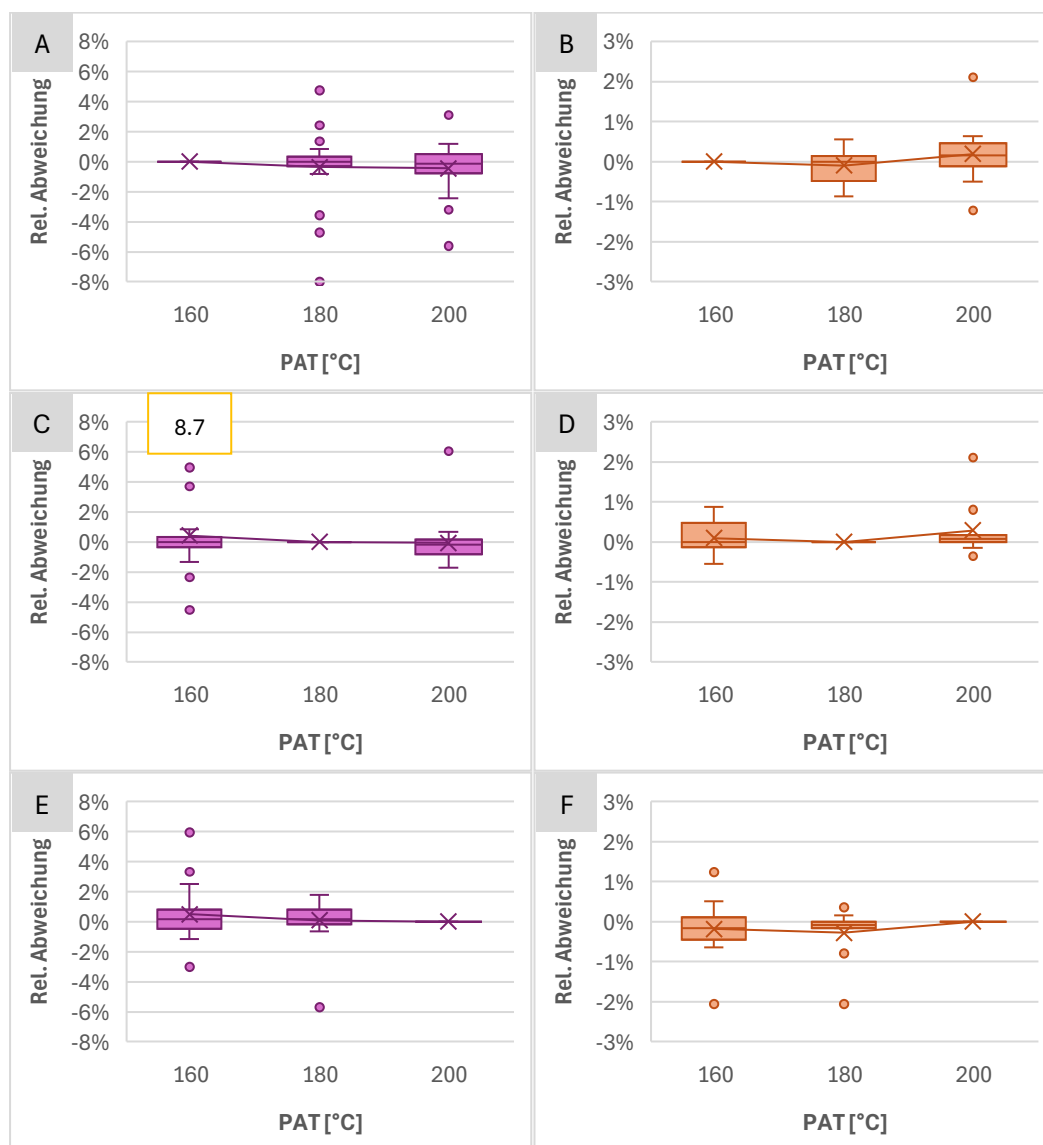


Abbildung 35: Die Boxplots der relativen Abweichungen des δ_{BTSV} bei 160 °C Referenztemperatur der frischen (A) und rückgewonnenen PMBs (B), bei 180 °C Referenztemperatur der frischen (C) und rückgewonnenen PMBs (D) und bei 200 °C Referenztemperatur der frischen (E) und rückgewonnenen PMBs (F)

der Trendlinien aller frischen PmBs liegt bei $-0.01 \text{ }^{\circ}/^{\circ}\text{C}$, bei den rückgewonnenen PmBs hat die Trendlinie keine Steigung (Abbildung 36 und Tabelle 20). Der p-Wert liegt bei allen frischen PmBs bei 0.806 und bei den rückgewonnenen PmBs bei 0.941 (Tabelle 21). Die Steigungen der Trendlinien sind nicht statistisch signifikant.

Bei den frischen PmBs liegen sieben der 63 Einzelwerte (11 %) ausserhalb der entsprechenden SD. Bei der Verteilung dieser Randwerte lässt sich in Bezug auf die PAT kein Trend erkennen (Tabelle 22 und Tabelle 33). Bei zwei PmBs liegen sowohl die T_{BTSV} als auch der δ_{BTSV} bei $160 \text{ }^{\circ}\text{C}$ PAT ausserhalb der SD. Was die Verteilung auf NH-PmBs und H-PmBs angeht, lässt sich ebenfalls kein Trend erkennen. Bei den rückgewonnenen PmBs liegt nur ein Einzelwert (3 %) eines H-PmBs bei $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ PAT ausserhalb der SD (Tabelle 23 und Tabelle 33).

Jeder Einzelwert der frischen und rückgewonnenen PmBs liegt innerhalb des entsprechenden KI. Alle z-scores, liegen innerhalb von -2 und +2 (Tabelle 33).

Die MW der frischen PmBs liegen durchschnittlich um 1.47 ° über denen der jeweiligen rückgewonnenen PmBs. Bei NH-PmBs ist dieser Unterschied geringer, bei H-PmBs ist dieser Unterschied grösser als der Durchschnitt (Tabelle 24).

Die Differenz liegt bei den frischen PmBs im Durchschnitt bei 1.06 ° . Dieser Wert ist bei NH-PmBs etwas geringer, wohingegen H-PmBs eine höhere Differenz als der Durchschnitt haben. Derselbe Trend ist bei den rückgewonnenen PmBs zu beobachten, bei denen die Differenz im Durchschnitt bei 0.39 ° liegt. NH-PmBs streuen etwas weniger als der Durchschnitt und H-PmBs etwas stärker (Tabelle 25).

Für den δ_{BTSV} ist in SN EN 17643:2016-09 «Bestimmung der Äqui-Scherrmodultemperatur und des Phasenwinkels im Dynamischen Scherrheometer (DSR) – BTSV-Prüfung» [33] (Tabelle 3) eine r von $0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ angegeben. Von den 21 frischen PmBs liegen sieben (33 %) innerhalb dieser r , bei den zehn rückgewonnenen PmBs sind es fünf (50 %). Bei den meisten PmBs, bei denen die Streuung grösser als r ist, ist sie nur wenig grösser als r . Die Ausnahme bilden die frischen PmBs PmB-E 65/105-60 und

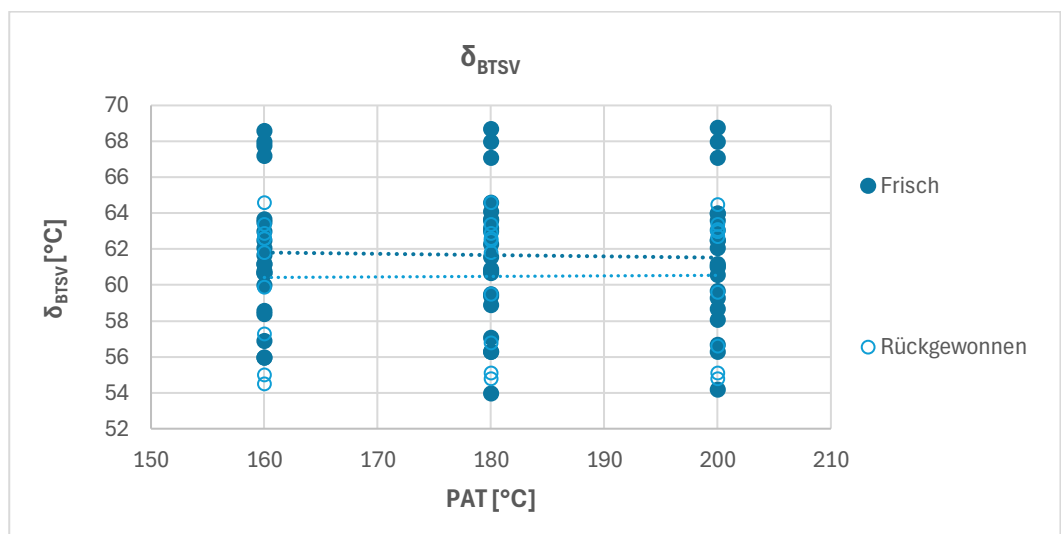


Abbildung 36: Alle Werte des δ_{BTSV} und die Trendlinien, die für die Regressionsanalysen benutzt wurden

PmB-E 90/150-60 von Hersteller 3 und PmB 25/55-80 und PmB 45/80-80 von Hersteller 2 (Abbildung 37, Tabelle 26 und Tabelle 27). Beim VAB/ALA 2022 wurde für den δ_{BTSV} eine r von 1.62 ermittelt. 17 der 21 frischen PmBs (81 %) und alle rückgewonnenen PmBs liegen innerhalb dieser r . Auch im Vergleich mit der r vom VAB/ALA 2022 liegen die frischen PmBs PmB 25/55-80 und PmB 45/80-80 von Hersteller 2 recht deutlich über der r (Abbildung 37, Tabelle 26 und Tabelle 27).

4.9.3 Black-Diagramme

Sowohl bei den frischen als auch den rückgewonnenen PmBs sind sich die meisten Black-Kurven bei 160 °C, 180 °C und 200 °C PAT sehr ähnlich, vor allem im Bereich von $G^* > 10$ kPa. Bei kleineren G^* lassen sich bei manchen PmBs Unterschiede erkennen. Wenn man die frischen PmBs mit den rückgewonnenen vergleicht, sieht man, dass es bei den rückgewonnenen PmBs eine Verschiebung hin zu kleineren Phasenwinkeln gibt (Abbildung 38, Abbildung 39, Abbildung 40, Abbildung 41, Abbildung 42, Abbildung 43, Abbildung 44 und Abbildung 45).

Die frischen PmBs von Hersteller 2 sind auffällig, da sich die 160 °C-Kurve meist deutlich von den anderen beiden Black-Kurven unterscheidet. Viele Black-Kurven zeigen auch einen zweiten, zusätzlichen Schwung im Bereich $G^* < 10$ kPa, der bei den PmBs der anderen Hersteller nicht zu sehen ist. Diese beiden Beobachtungen sind allerdings bei den rückgewonnenen PmBs nicht zu erkennen. Hersteller 2 kann sich die Verläufe seiner Black-Diagramm-Kurven nur über einen höheren Polymergehalt erklären (Abbildung 38, Abbildung 39, Abbildung 40, Abbildung 42, Abbildung 43 und Abbildung 44).

Einige Black-Kurven zeigen deutlich, dass die entsprechenden PmBs viele reaktive Polymere enthalten. Bei den PmBs von Hersteller 1, 2 und 3 ist das besonders gut zu sehen (Abbildung 38, Abbildung 39, Abbildung 40, Abbildung 41, Abbildung 42, Abbildung 43, Abbildung 44 und Abbildung 45).

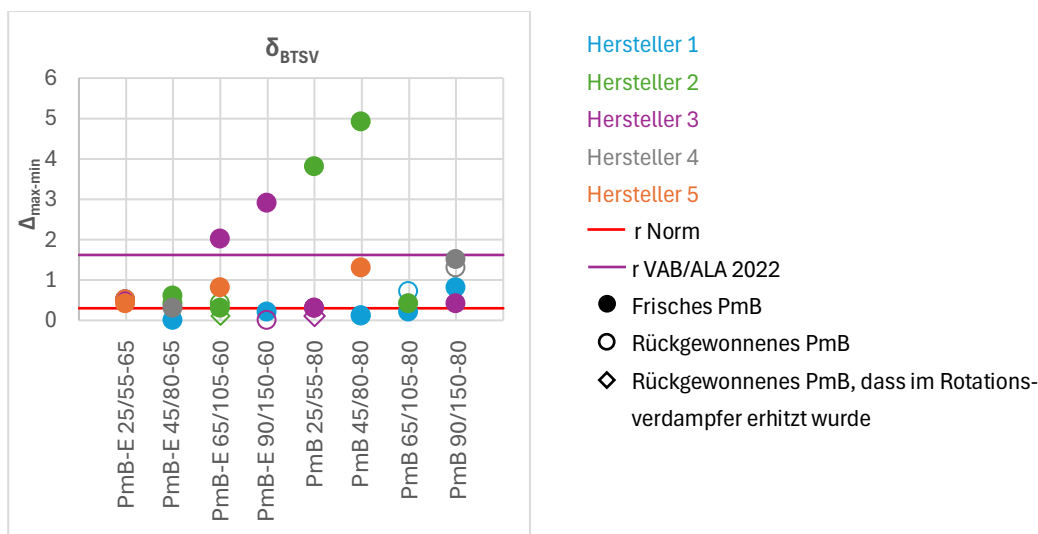


Abbildung 37: Übersicht über die PmBs, deren Werte des δ_{BTSV} innerhalb oder ausserhalb der r der SN EN 17643:2016-09 «Bestimmung der Äqui-Scherrmodultemperatur und des Phasenwinkels im Dynamischen Scherrheometer (DSR) – BTSV-Prüfung [33] oder des VAB/ALA 2022 liegen

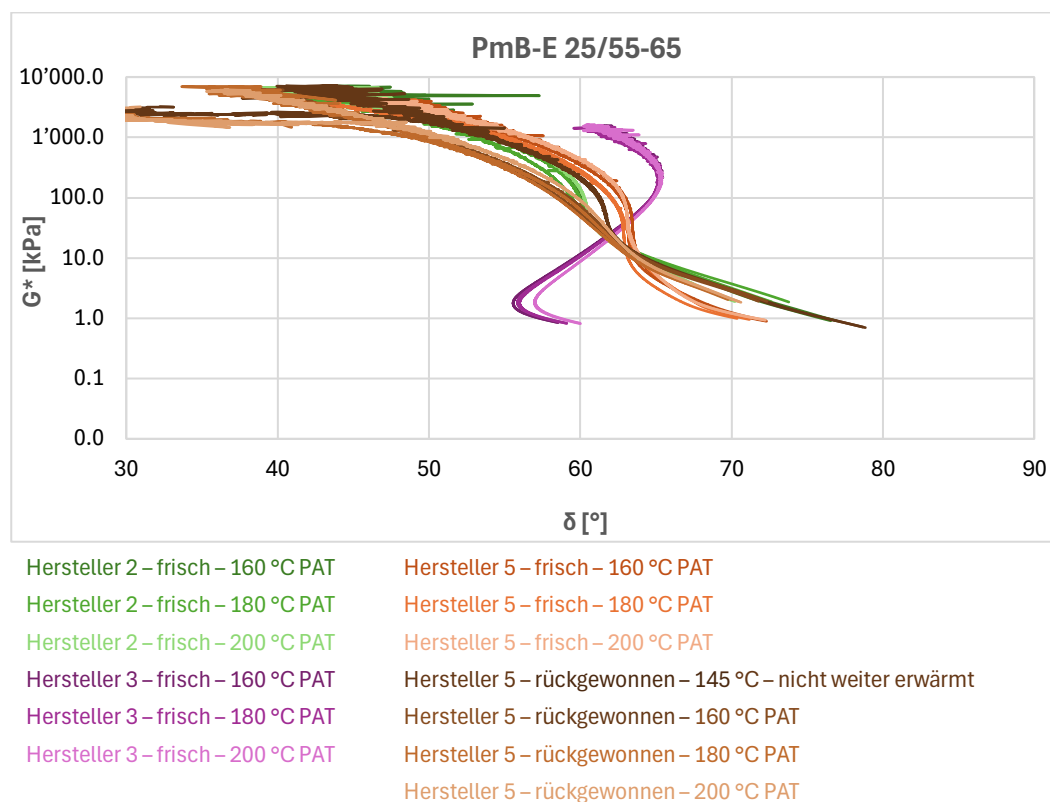


Abbildung 38: Black-Diagramm des PmB-E 25/55-65. G^* = komplexer Schermodul

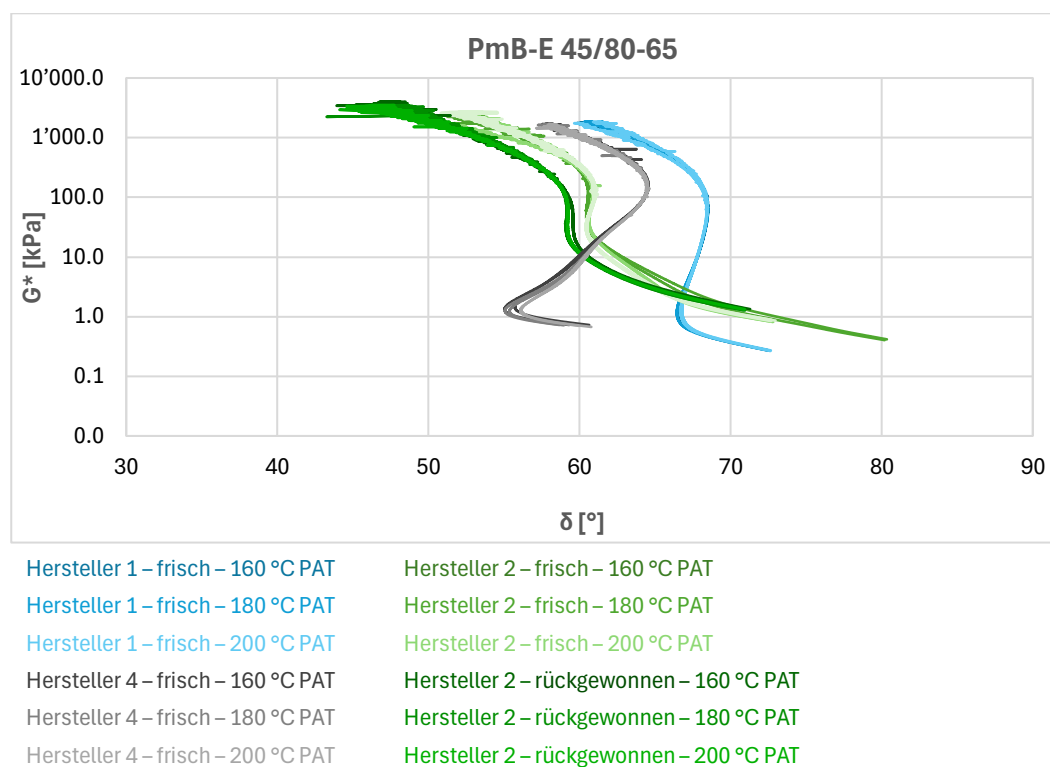


Abbildung 39: Black-Diagramm des PmB-E 45/80-65. G^* = komplexer Schermodul

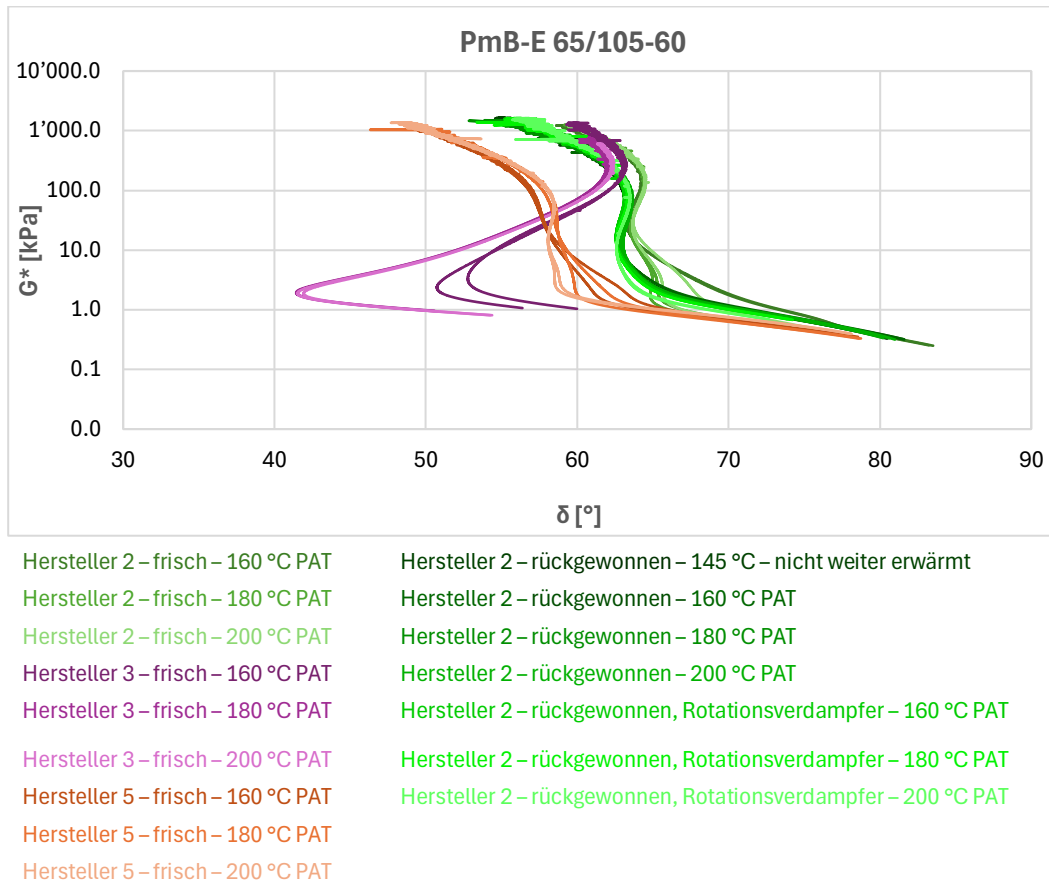


Abbildung 40: Black-Diagramm des PmB-E 65/105-60. G^* = komplexer Schermodul

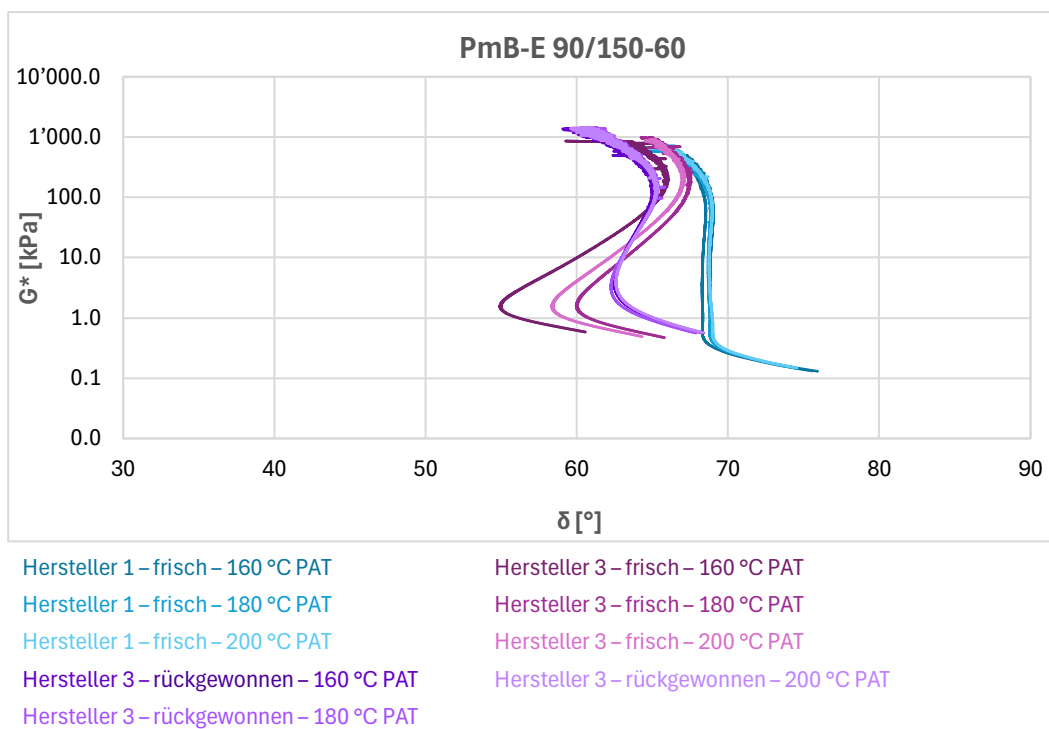


Abbildung 41: Black-Diagramm des PmB-E 90/150-60. G^* = komplexer Schermodul

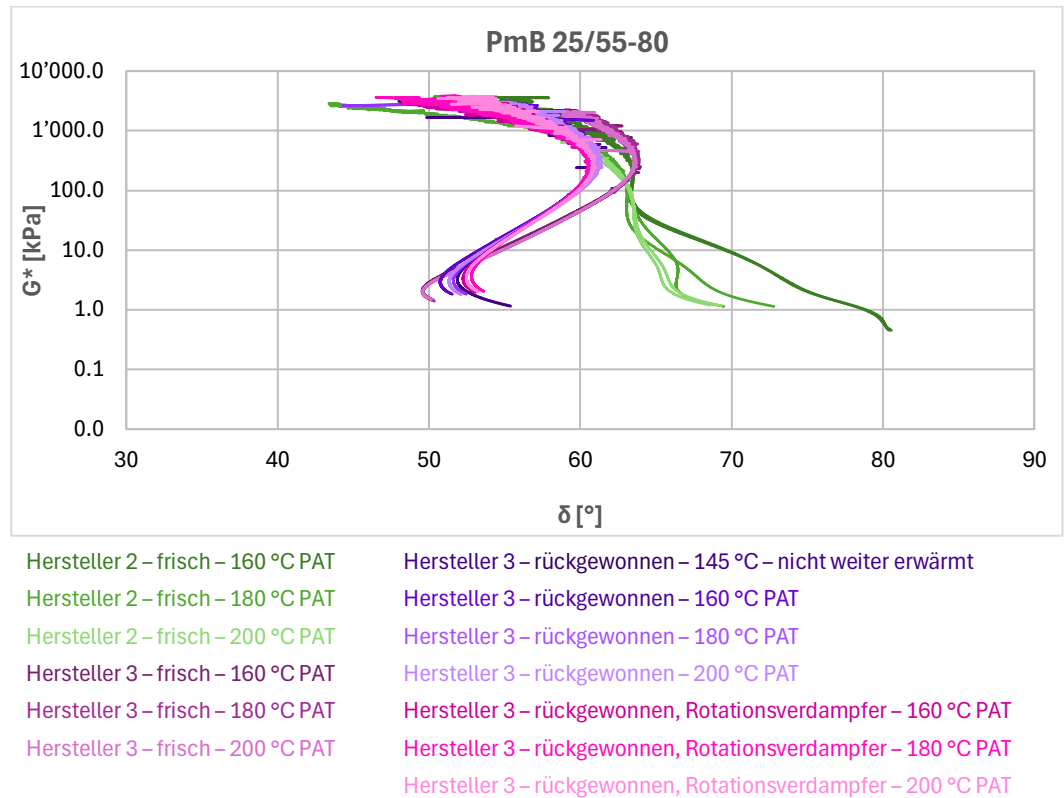


Abbildung 42: Black-Diagramm des PmB 25/55-80. G^* = komplexer Schermodul

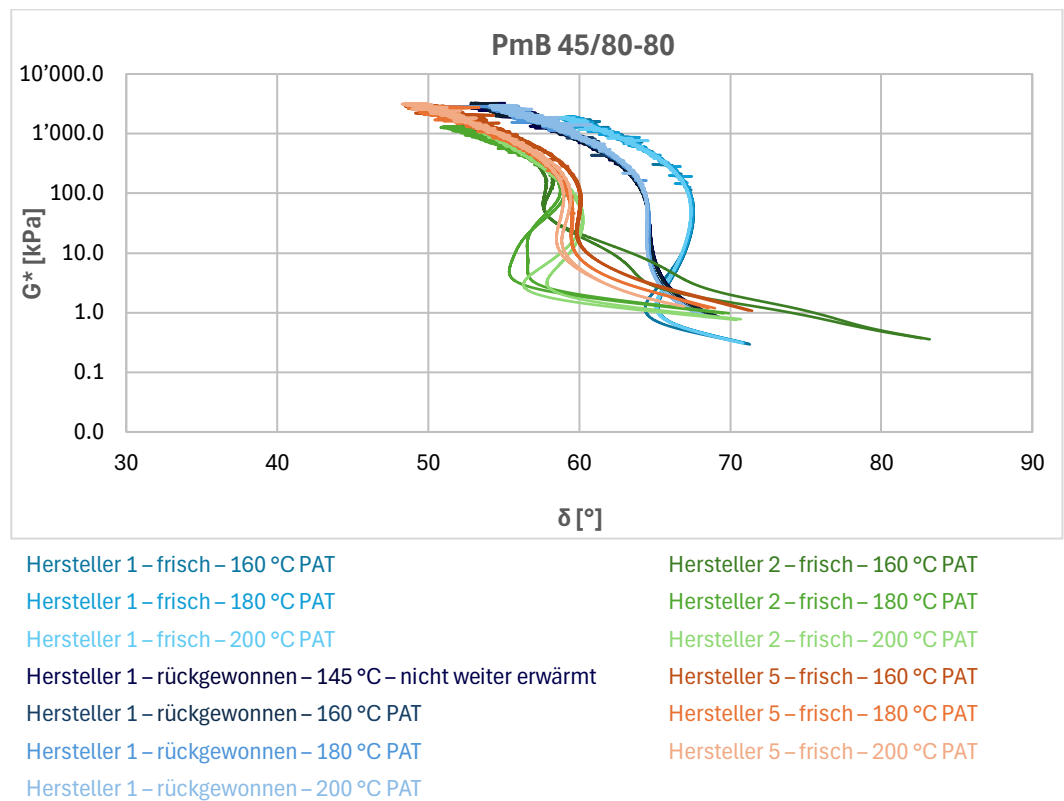


Abbildung 43: Black-Diagramm des PmB 45/80-80. G^* = komplexer Schermodul

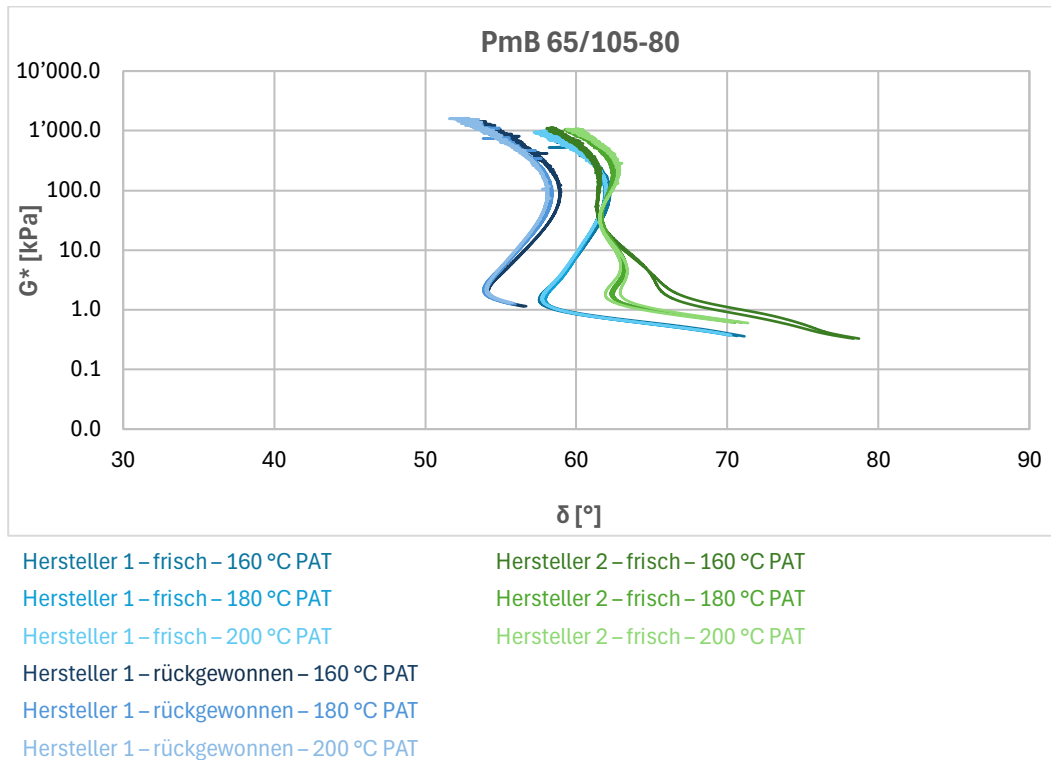


Abbildung 44: Black-Diagramm des PmB 65/105-80. G^* = komplexer Schermodul

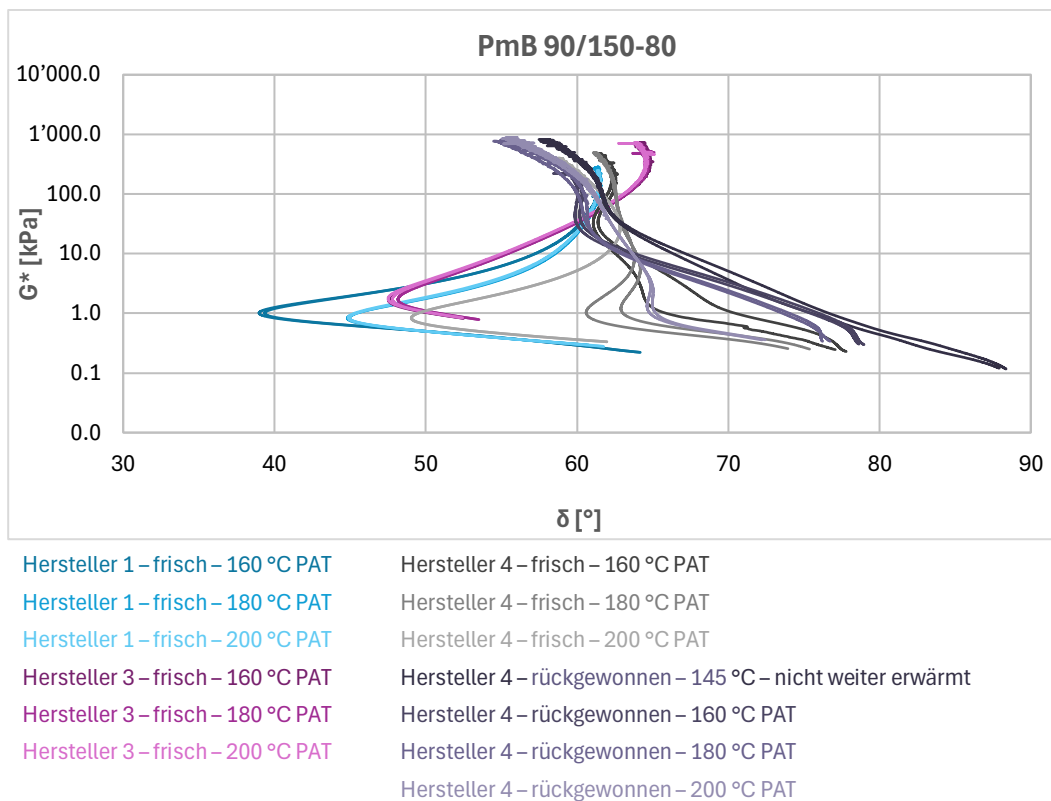


Abbildung 45: Black-Diagramm des PmB 90/150-80. G^* = komplexer Schermodul

Auf Nachfrage bestätigten Hersteller 1 und 2, dass unsere ermittelten Black-Kurven repräsentativ sind. Die übrigen Hersteller haben entweder das BTSV an ihren PmBs noch nicht angewandt, oder keine Auskunft erteilt.

4.9.4 T_{BTSV} vs. δ_{BTSV}

Eine beliebte Art die Ergebnisse des BTSV grafisch darzustellen, ist die Werte der T_{BTSV} und des δ_{BTSV} in einem Punktdiagramm zu plotten. In Abbildung 46, Abbildung 47 und Abbildung 48 sieht man sehr gut, dass es eine generelle Verschiebung hin zu niedrigeren T_{BTSV} -Werten gibt, je weicher das PmB ist. Bei den δ_{BTSV} -Werten lässt sich kein eindeutiger Trend erkennen. Ebenfalls gut zu erkennen ist, dass es bei den rückgewonnenen PmBs eine mehr oder weniger gut ausgebildete Verschiebung hin zu höheren T_{BTSV} -Werten und kleineren δ_{BTSV} -Werten gibt.

4.10 Multiple Stress Creep and Recovery Test MSCR

4.10.1 Rückformung R

Abbildung 49, Abbildung 50, Abbildung 51, Tabelle 34, Tabelle 35 und Tabelle 36 zeigen die Ergebnisse der R.

Die Boxplots der durchschnittlichen R bei 3.2 kPa ($R_{3.2 \text{ kPa}}$) und der durchschnittlichen R bei 10 kPa ($R_{10 \text{ kPa}}$) zeigen, dass der Median bei 160 °C deutlich tiefer ist als bei den anderen beiden PAT. Bei der Differenz zwischen $R_{3.2 \text{ kPa}}$ und $R_{10 \text{ kPa}}$ (R_{diff}) ist es umgekehrt, dort ist der Median bei den frischen PmBs bei 160 °C am höchsten und zeigt einen Abwärtstrend hin zu höheren PAT. Bei den rückgewonnenen PmBs sind die Mediane von 160 °C und 200 °C nahezu identisch und der Median bei 180 °C ist nur geringfügig kleiner.

Der MW ist bei der $R_{3.2 \text{ kPa}}$ bei den frischen PmBs ebenfalls deutlich tiefer im Vergleich zu den beiden anderen PAT. Bei den rückgewonnenen PmBs sieht man bei der $R_{3.2 \text{ kPa}}$, dass die Mediane und die MW von 160 °C und 180 °C sehr ähnlich sind und der Median und der MW von 200 °C deutlich höher ist. Bei der $R_{10 \text{ kPa}}$ lässt sich sowohl bei den frischen als auch den rückgewonnenen PmBs ein Aufwärtstrend des MW hin zu höheren PAT erkennen. Bei der R_{diff} ist es etwas anders. Die MW bei den frischen PmBs zeigen einen Abwärtstrend, bei den rückgewonnenen PmBs sind die MW bei 160 °C und 180 °C sehr ähnlich und der bei 180 °C etwas tiefer.

Die Boxplots der $R_{3.2 \text{ kPa}}$ zeigen, dass die Einzelwerte bei 160 °C PAT deutlich mehr streuen als bei den anderen beiden PAT. Ausserdem zeigen sie eine linksschiefe Asymmetrie. Bei den rückgewonnenen PmBs sieht man sehr gut, dass die Streuung hin zu höheren PAT abnimmt und Q1 immer grösser wird, obwohl Q3 nahezu gleichbleibt. Dasselbe sieht man bei der $R_{10 \text{ kPa}}$ bei den frischen PmBs noch viel eindeutiger, wo die Streuung bei 200 °C deutlich geringer ist als bei 160 °C und 180 °C. Bei den rückgewonnenen PmBs sieht man allerdings bei der $R_{10 \text{ kPa}}$ keine so grossen Unterschiede bei der Streuung, wie bei den frischen PmBs. Auch bei der $R_{10 \text{ kPa}}$ sind die Werte von Q3 nahezu identisch. Auch bei der R_{diff} ist bei den frischen PmBs die Streuung bei 160 °C deutlich grösser als bei 180 °C und 200 °C. Bei den rückgewonnenen PmBs ist die Streuung der R_{diff} bei 180 °C deutlich geringer als bei 160 °C und 200 °C.

Beim PmB 90/150-80 von Hersteller 4 gibt es bei der $R_{3.2 \text{ kPa}}$ der rückgewonnenen PmBs bei mehreren PAT Ausreisser. Dieses PmB gehört zu denjenigen, die nach dem

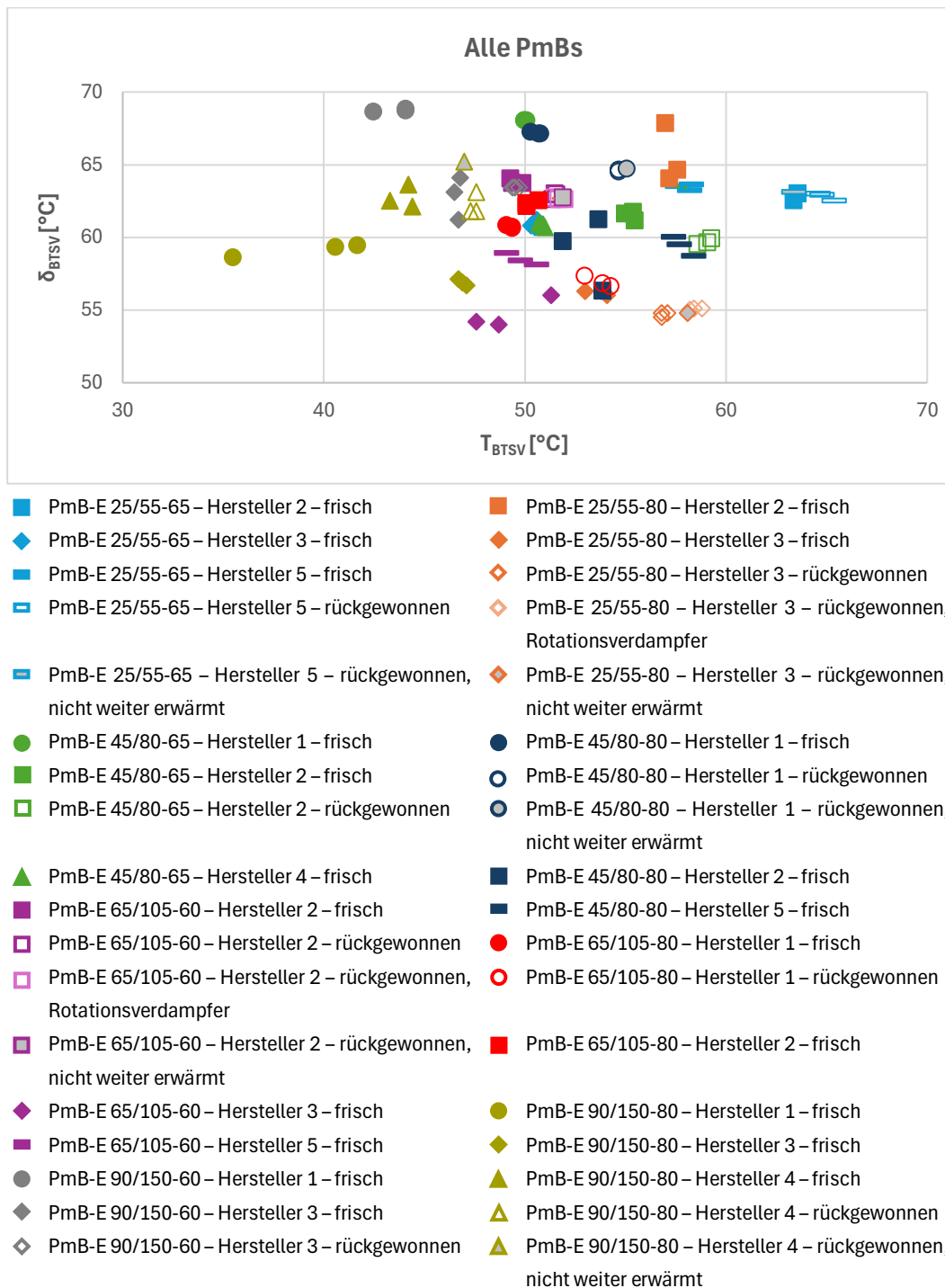


Abbildung 46: T_{BTSV} vs. δ_{BTSV} Diagramm mit allen Werten aller PmBs

Erwärmen teilweise noch Klümpchen und Verdickungen enthielten (siehe Kapitel 4.2). Auch beim frischen PmB-E 90/150-60 von Hersteller 1 konnten bei der R_{10} kPa und der R_{diff} Ausreisser beobachtet werden. Dieses PmB konnte mit 200 °C nicht komplett aufgeschmolzen werden, die Ausreisser betreffen aber auch die anderen beiden PAT. Die übrigen Ausreisser sind im Vergleich mit den beiden anderen Werten ihrer Prüfsérie unauffällig (Abbildung 52 und Tabelle 40).

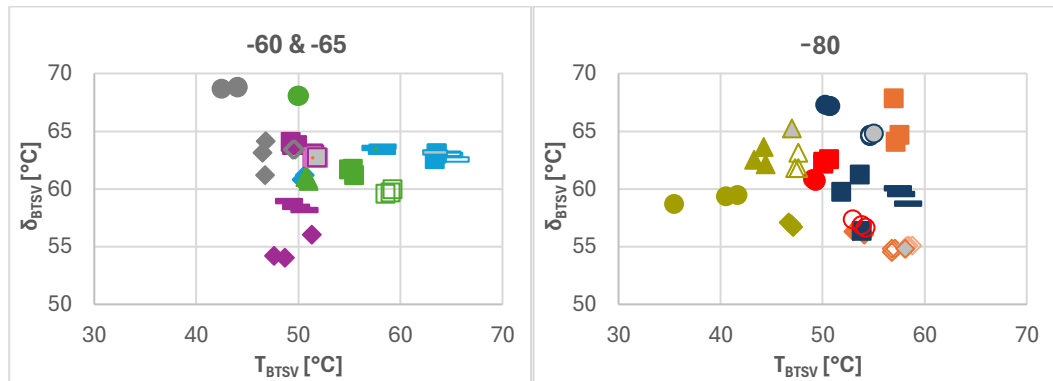


Abbildung 47: T_{BTSV} vs. δ_{BTSV} Diagramme mit allen Werten der NH-PmBs (links) und der H-PmBs (rechts). Legende siehe Abbildung 46

Bei den relativen Abweichungen sieht man bei der $R_{3,2}$ kPa und der R_{10} kPa, dass es sowohl bei den frischen als auch den rückgewonnenen PmBs einen Aufwärtstrend bei den MW gibt. Bei der $R_{3,2}$ kPa der frischen PmBs sind die MW bei 160 °C deutlich kleiner, bei den rückgewonnenen PmBs sind die MW bei 200 °C deutlich grösser. Bei den frischen PmBs sieht man bei der R_{diff} dass sowohl bei den Medianen als auch bei den MW die Werte bei 160 °C PAT deutlich höher sind als bei 180 °C und 200 °C. Die MW sind teilweise grösser als Q3, sowohl bei den frischen als auch den rückgewonnenen PmBs. Bei den rückgewonnenen PmBs ist bei den Medianen der R_{diff} kein Trend zu erkennen, bei den MW sind bei 180 °C und 200 °C Referenztemperatur Aufwärtstrends zu erkennen.

Die Mediane sind bei der $R_{3,2}$ kPa und der R_{10} kPa sowohl bei den frischen als auch bei den rückgewonnenen PmBs bei 160 °C am tiefsten. Bei der R_{diff} lässt sich bei den Medianen kein Trend erkennen.

Bei der $R_{3,2}$ kPa, der R_{10} kPa und der R_{diff} gibt es bei den Ausreissern sowohl bei den frischen als auch den rückgewonnenen PmBs verschiedene Ursachen. Bei manchen PmBs ist ein Wert einer Prüfserie etwas grösser oder kleiner als die anderen beiden Werte, bei manchen PmBs streuen die Werte innerhalb einer Prüfserie stärker als im Vergleich zu den anderen PmBs. Bei anderen PmBs waren in den Proben nach dem Erwärmen noch Klümpchen und Verdickungen vorhanden, die Werte an sich sind aber meist unauffällig (Abbildung 53, Abbildung 54, Abbildung 55, Tabelle 41, Tabelle 42 und Tabelle 43).

Bei den frischen PmBs lassen sich bei der $R_{3,2}$ kPa und der R_{10} kPa keine klaren Zusammenhänge zwischen dem höchsten Einzelwert und der PAT erkennen. Bei der R_{diff} zeigt sich eine Tendenz zu höheren Einzelwerten bei 160 °C PAT, denn bei 14 der 21 frischen PmBs (67 %) wurde der höchste Wert bei 160 °C PAT gemessen (Tabelle 17).

Wie bei den frischen PmBs lassen sich auch bei den rückgewonnenen PmBs bei der $R_{3,2}$ kPa und bei der R_{10} kPa keine klaren Trends erkennen. Bei der R_{diff} ist es bei den rückgewonnenen PmBs ähnlich wie bei den frischen, denn sechs der zehn rückgewonnenen PmBs (60 %) haben ihren höchsten Einzelwert bei 160 °C (Tabelle 18).

Bei den Steigungen der Trendlinien der frischen PmBs zeigt sich, dass bei der $R_{3,2}$ kPa zwölf der 21 PmBs (57 %) eine positive Steigung hin zu höheren PAT haben. Bei der R_{10} kPa sind es sogar 14 PmBs (67 %). Bei der R_{diff} sieht man bei 14 der 21 frischen PmBs

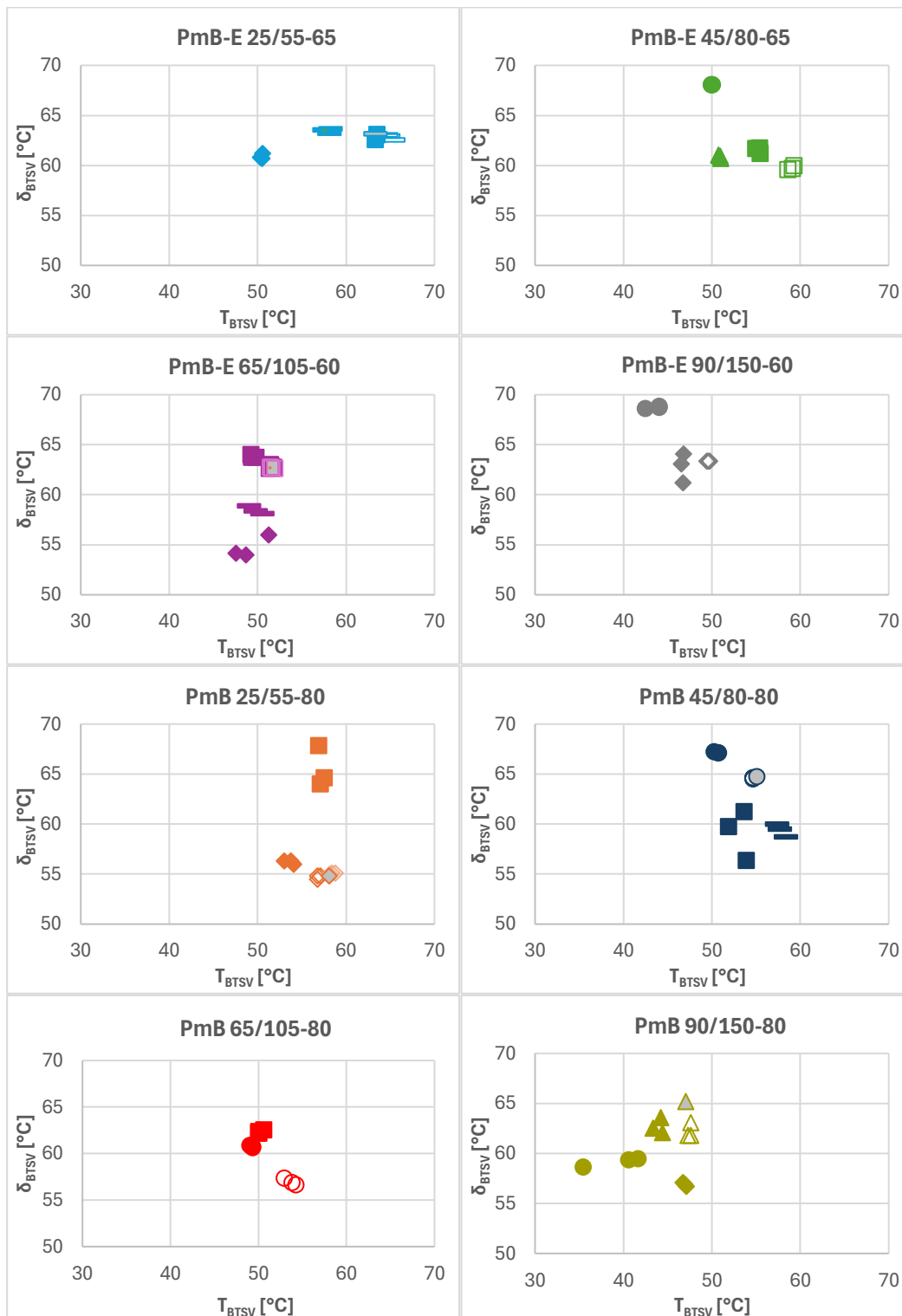
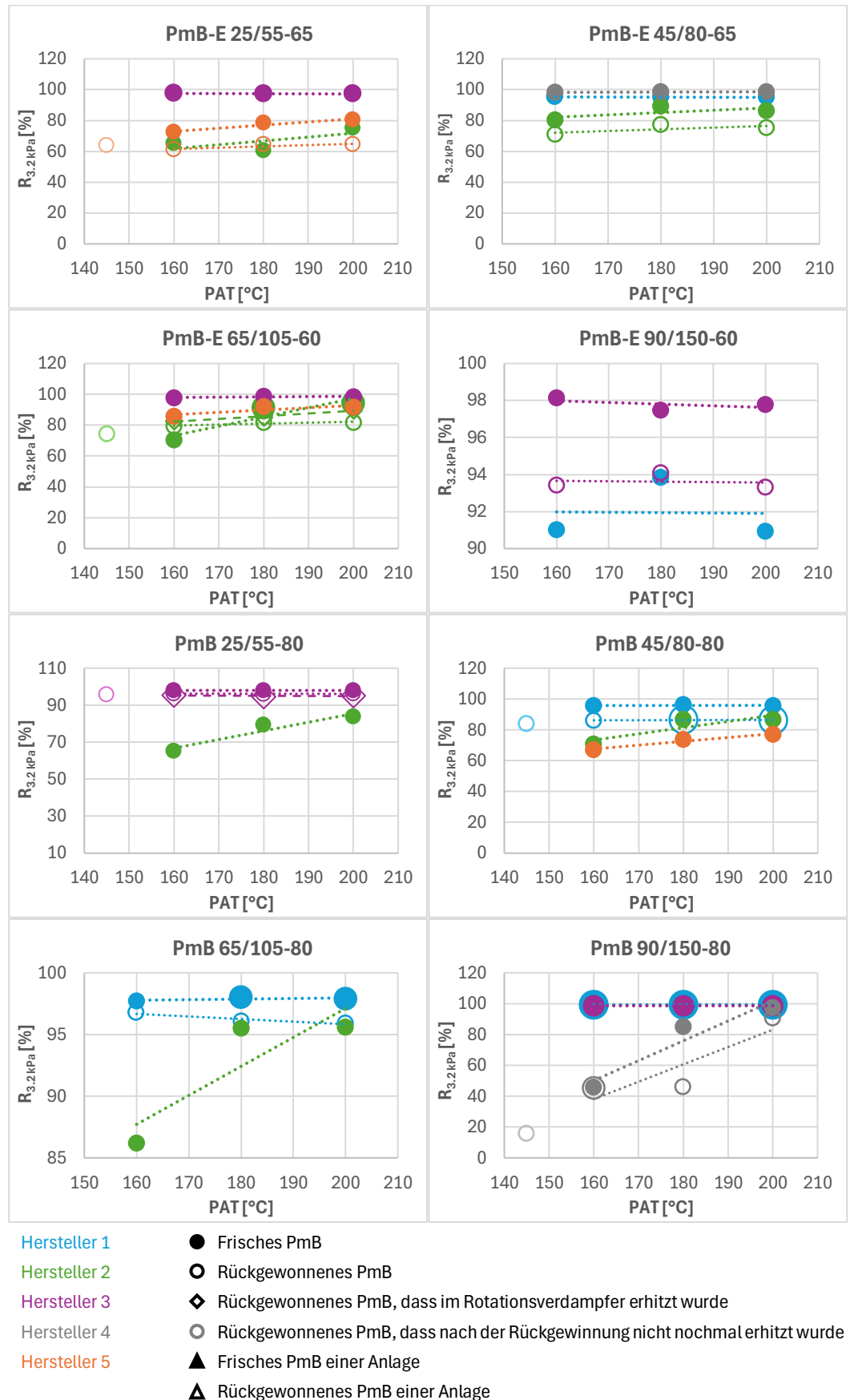
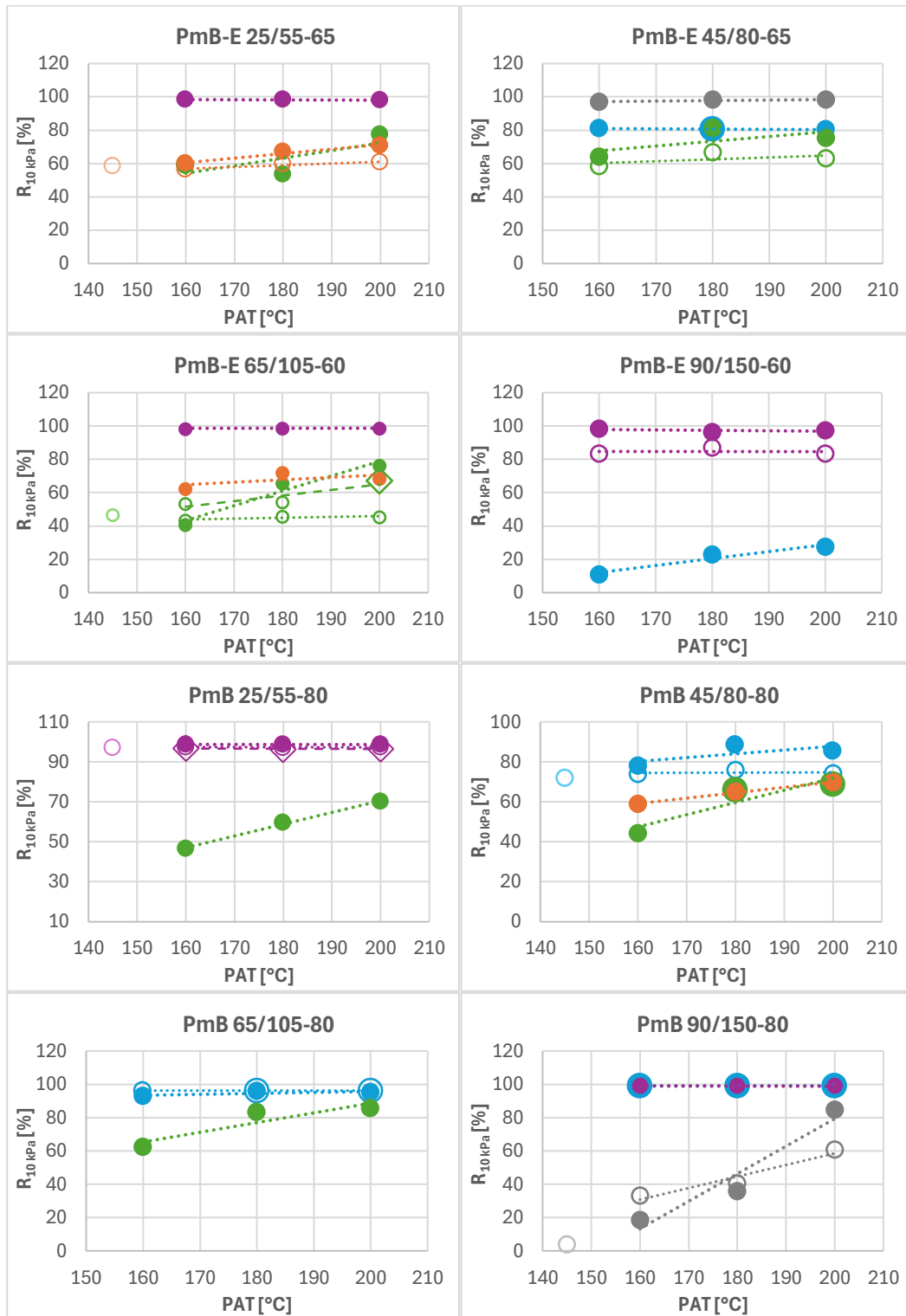


Abbildung 48: T_{BTSV} vs. δ_{BTSV} Diagramme der geprüften PmB-Sorten. Legende siehe Abbildung 46

(67 %) eine abfallende Trendlinie hin zu höheren PAT (Abbildung 49, Abbildung 50, Abbildung 51 und Tabelle 19). Ähnlich wie bei den frischen PmBs haben bei der $R_{3,2}$ kPa und der R_{10} kPa jeweils sechs der zehn rückgewonnenen PmBs (jeweils 60 %) eine positive Steigung hin zu höheren PAT. Bei der R_{diff} zeigen fünf PmBs (50 %) eine negative Steigung (Abbildung 49, Abbildung 50, Abbildung 51 und Tabelle 20). Bei den frischen


Abbildung 49: Die Ergebnisse der $R_{3,2}$ kPa



Hersteller 1

Hersteller 2

Hersteller 3

Hersteller 4

Hersteller 5

● Frisches PmB

○ Rückgewonnenes PmB

◆ Rückgewonnenes PmB, dass im Rotationsverdampfer erhitzt wurde

○ Rückgewonnenes PmB, dass nach der Rückgewinnung nicht nochmal erhitzt wurde

▲ Frisches PmB einer Anlage

▲ Rückgewonnenes PmB einer Anlage

Abbildung 50: Die Ergebnisse der $R_{10 \text{ kPa}}$

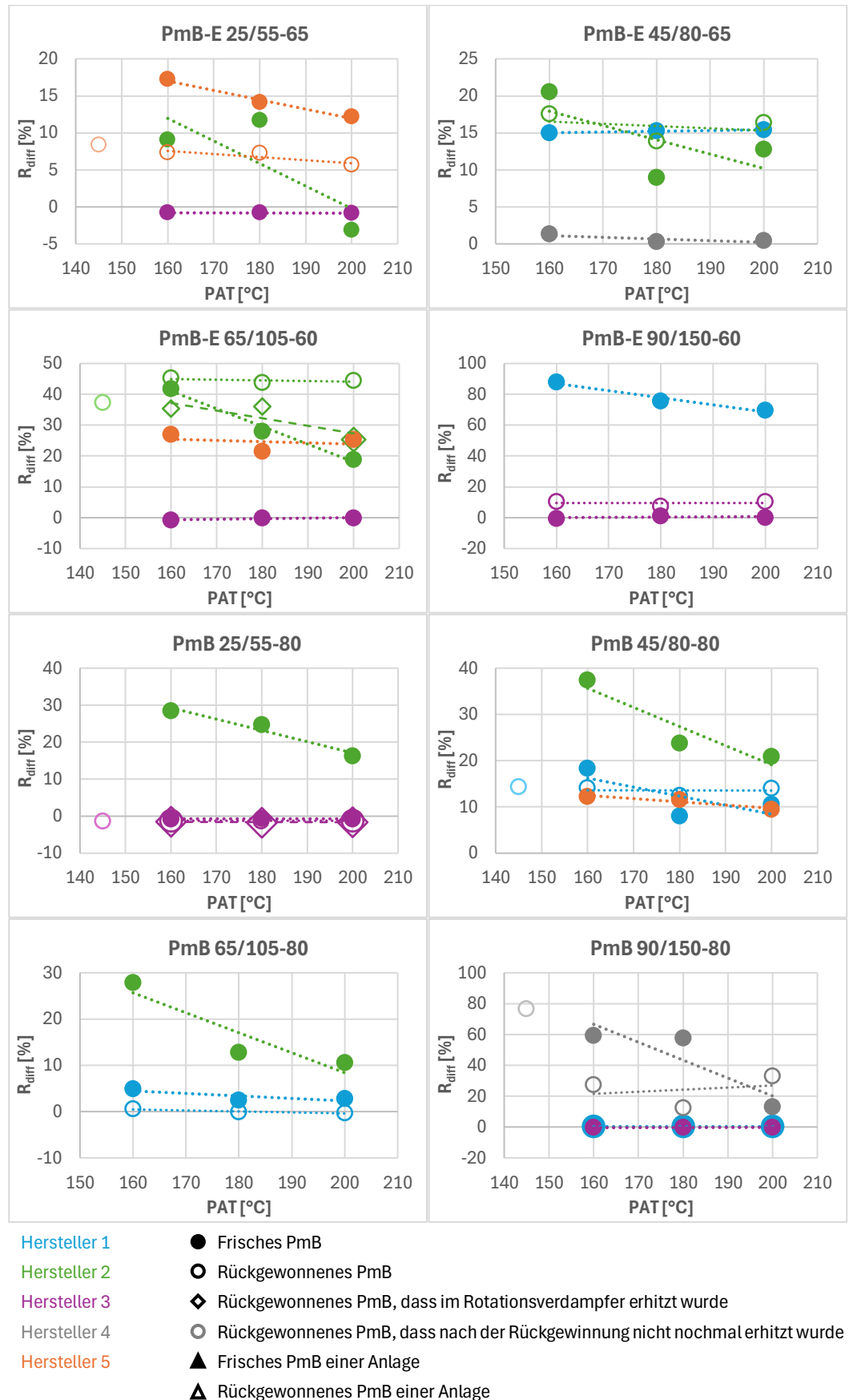


Abbildung 51: Die Ergebnisse der R_{diff}

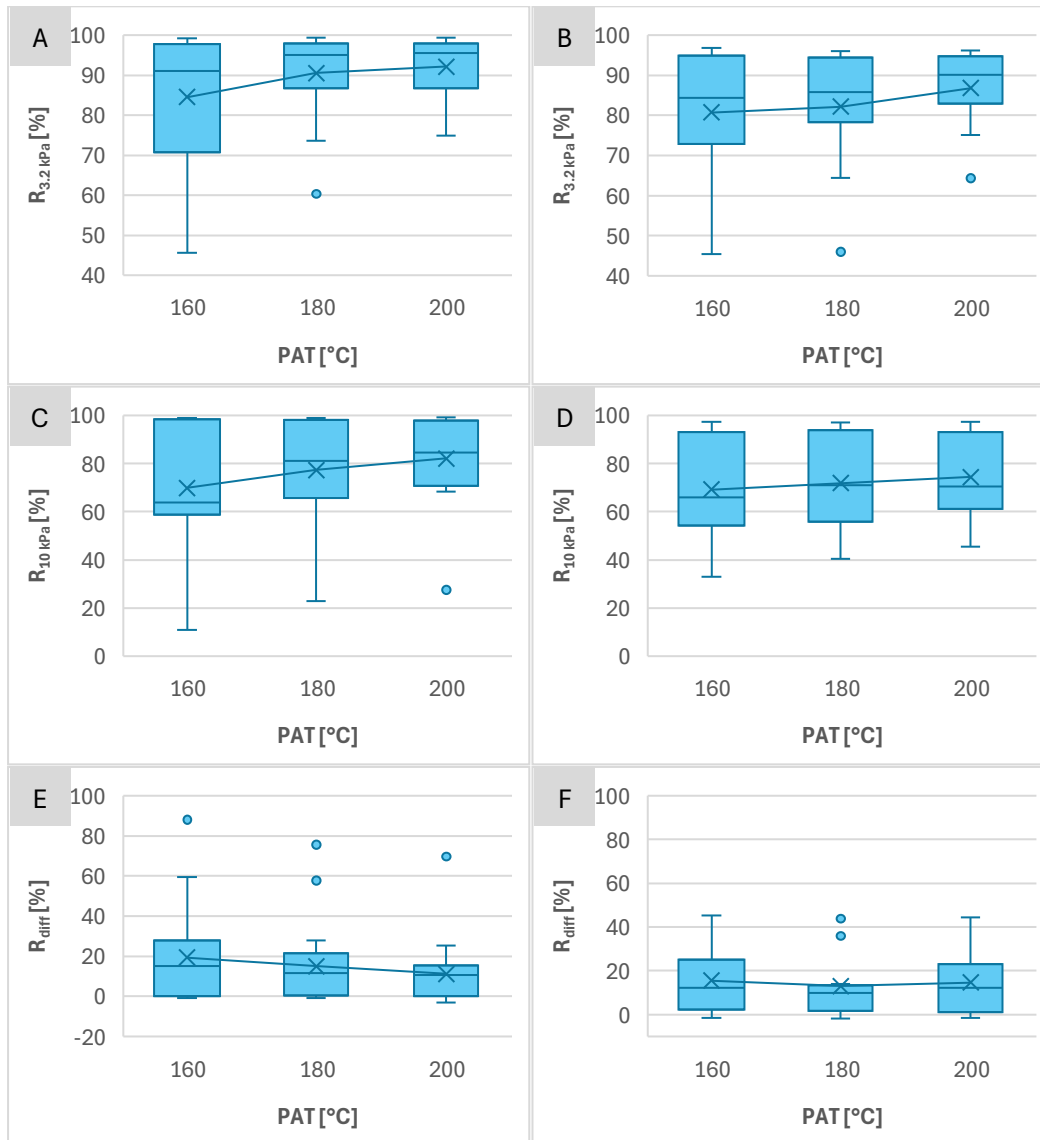


Abbildung 52: Die Boxplots der absoluten Werte der $R_{3.2 \text{ kPa}}$ der frischen (A) und rückgewonnenen PMBs (B), der $R_{10 \text{ kPa}}$ der frischen (C) und rückgewonnenen PMBs (D) und der R_{diff} der frischen (E) und rückgewonnenen PMBs (F)

PMBs betragen die Steigungen der Trendlinie aller Einzelwerte $0.19 \text{ }^{\circ}\text{C}$ bei der $R_{3.2 \text{ kPa}}$, $0.30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ bei der $R_{10 \text{ kPa}}$ und $-0.21 \text{ }^{\circ}\text{C}$ bei der R_{diff} . Bei den rückgewonnenen PMBs betragen die Steigungen $0.15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ für die $R_{3.2 \text{ kPa}}$, $0.13 \text{ }^{\circ}\text{C}$ für die $R_{10 \text{ kPa}}$ und $-0.02 \text{ }^{\circ}\text{C}$ für die R_{diff} (Abbildung 56).

Die p-Werte aller frischen PMBs liegen für die $R_{3.2 \text{ kPa}}$ bei 0.038, für die $R_{10 \text{ kPa}}$ bei 0.084 und für die R_{diff} bei 0.178 (Tabelle 21). Bei der $R_{3.2 \text{ kPa}}$ ist der Zusammenhang zwischen der PAT und dem ermittelten Wert statistisch signifikant, bei der $R_{10 \text{ kPa}}$ ist dieser Zusammenhang tendenziell statistisch signifikant. Bei der R_{diff} ist dieser Zusammenhang nicht statistisch signifikant. Die p-Werte aller rückgewonnenen PMBs liegen bei der $R_{3.2 \text{ kPa}}$ bei 0.343, bei der $R_{10 \text{ kPa}}$ bei 0.584 und bei der R_{diff} bei 0.895. Bei den rückgewonnenen PMBs lässt sich kein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen der PAT und dem ermittelten Wert nachweisen.

Bei der $R_{3.2 \text{ kPa}}$ liegen 20 der 63 Einzelwerte der frischen PMBs (32 %) ausserhalb der

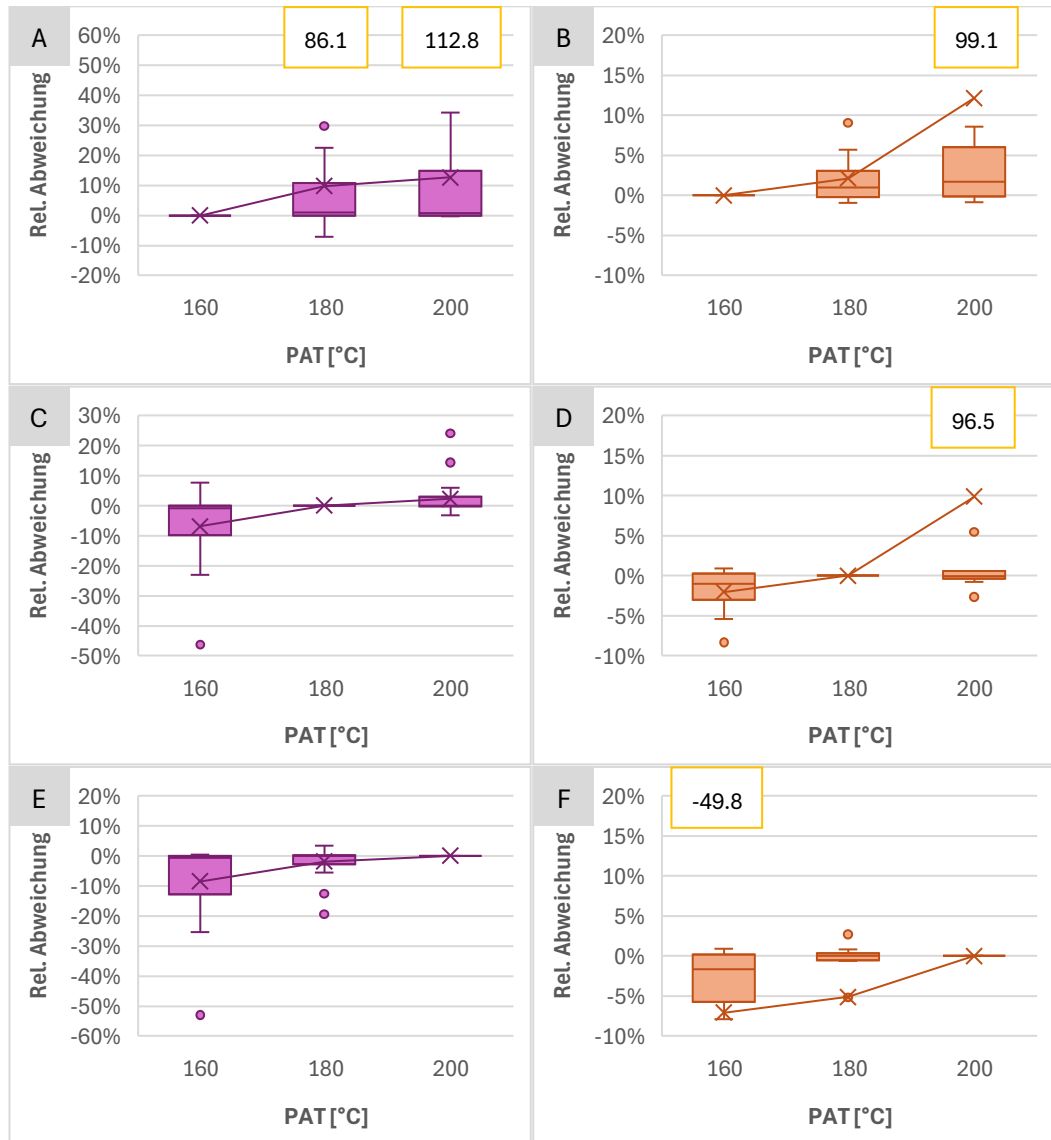


Abbildung 53: Die Boxplots der relativen Abweichungen der $R_{3,2 \text{ kPa}}$ bei 160 °C Referenztemperatur der frischen (A) und rückgewonnenen PmBs (B), bei 180 °C Referenztemperatur der frischen (C) und rückgewonnenen PmBs (D) und bei 200 °C Referenztemperatur der frischen (E) und rückgewonnenen PmBs (F)

SD. Bei der $R_{10 \text{ kPa}}$ sind es 21 Einzelwerte (33 %) und bei der R_{diff} 19 Einzelwerte (30 %). Die meisten Einzelwerte liegen bei einer PAT von 160 °C ausserhalb der SD. Bei der $R_{3,2 \text{ kPa}}$ betrifft das 15 Einzelwerte, bei der $R_{10 \text{ kPa}}$ 16 Einzelwerte und bei der R_{diff} elf Einzelwerte (Tabelle 22, Tabelle 34, Tabelle 35 und Tabelle 36).

Bei der $R_{3,2 \text{ kPa}}$ gehören elf der 20 Einzelwerte, die ausserhalb der SD liegen zu NH-PmBs. Bei der $R_{10 \text{ kPa}}$ sind es ebenfalls elf Einzelwerte, die zu NH-PmBs gehören. Bei der R_{diff} sind es zehn PmBs die zu NH-PmBs gehören und ausserhalb der SD liegen. Es ist auffällig, dass bei 14 der 21 frischen PmBs die Einzelwerte der $R_{3,2 \text{ kPa}}$ und der $R_{10 \text{ kPa}}$, die ausserhalb der SD liegen zur selben PAT gehören. In zwölf Fällen betrifft das 160 °C PAT. Zusammen mit der R_{diff} sind es neun der 21 frischen PmBs, deren Randwerte bei der gleichen PAT liegen und acht davon gehören zu 160 °C PAT. Bei den rückgewonnenen PmBs liegen bei der $R_{3,2 \text{ kPa}}$ und der R_{diff} jeweils zehn Einzelwerte (33 %) ausserhalb der SD, bei der $R_{10 \text{ kPa}}$ sind es acht (27 %). Bei der $R_{3,2 \text{ kPa}}$ und der $R_{10 \text{ kPa}}$

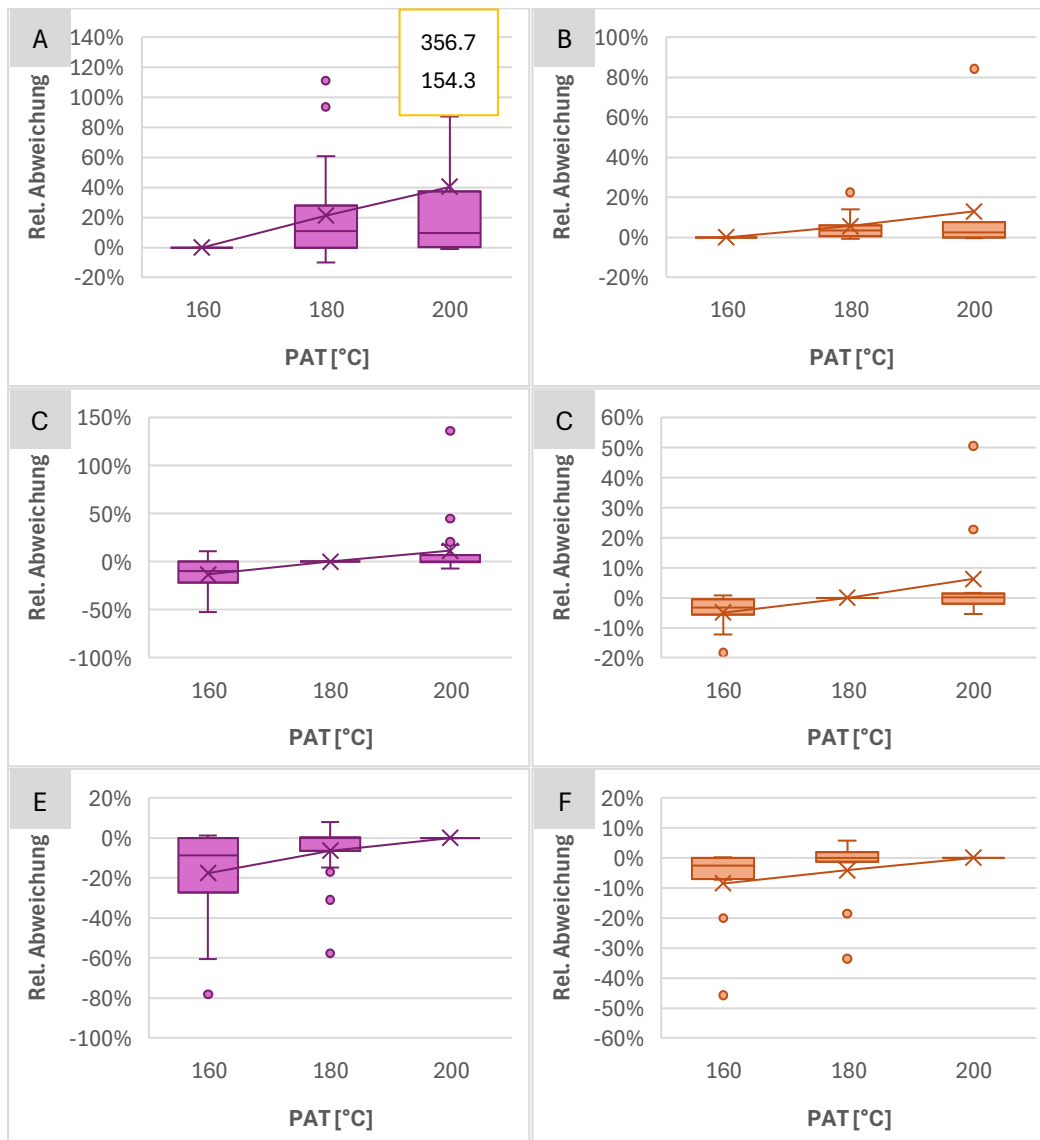


Abbildung 54: Die Boxplots der relativen Abweichungen der $R_{10 \text{ kPa}}$ bei 160 °C Referenztemperatur der frischen (A) und rückgewonnenen PmBs (B), bei 180 °C Referenztemperatur der frischen (C) und rückgewonnenen PmBs (D) und bei 200 °C Referenztemperatur der frischen (E) und rückgewonnenen PmBs (F)

lassen sich keine Trends der Randwerte bezogen auf die PAT feststellen. Bei der R_{diff} liegen sechs der zehn Randwerte bei 180 °C ausserhalb der SD (Tabelle 23, Tabelle 34, Tabelle 35 und Tabelle 36). Bei der $R_{3.2 \text{ kPa}}$ und der R_{diff} waren NH-PmBs und H-PmBs gleich oft betroffen, bei der $R_{10 \text{ kPa}}$ gehören fünf der acht Einzelwerte, die ausserhalb der SD liegen, zu NH-PmBs. Der Vergleich der Randwerte der $R_{3.2 \text{ kPa}}$ und der $R_{10 \text{ kPa}}$ zeigt, dass bei sieben der zehn rückgewonnenen PmBs die Einzelwerte bei derselben PAT ausserhalb der SD liegen. Wenn man die R_{diff} dazu nimmt, sieht man, dass bei vier PmBs die Einzelwerte bei derselben Temperatur ausserhalb der SD liegen. Die Randwerte sind aber regelmässig auf die drei PAT verteilt.

Sowohl bei den frischen als auch bei den rückgewonnenen PmBs liegen alle Einzelwerte der $R_{3.2 \text{ kPa}}$, der $R_{10 \text{ kPa}}$ und der R_{diff} innerhalb des KI. Ausserdem liegen alle z-scores der $R_{3.2 \text{ kPa}}$, der $R_{10 \text{ kPa}}$ und der R_{diff} im Bereich zwischen -2 und +2 (Tabelle 34,

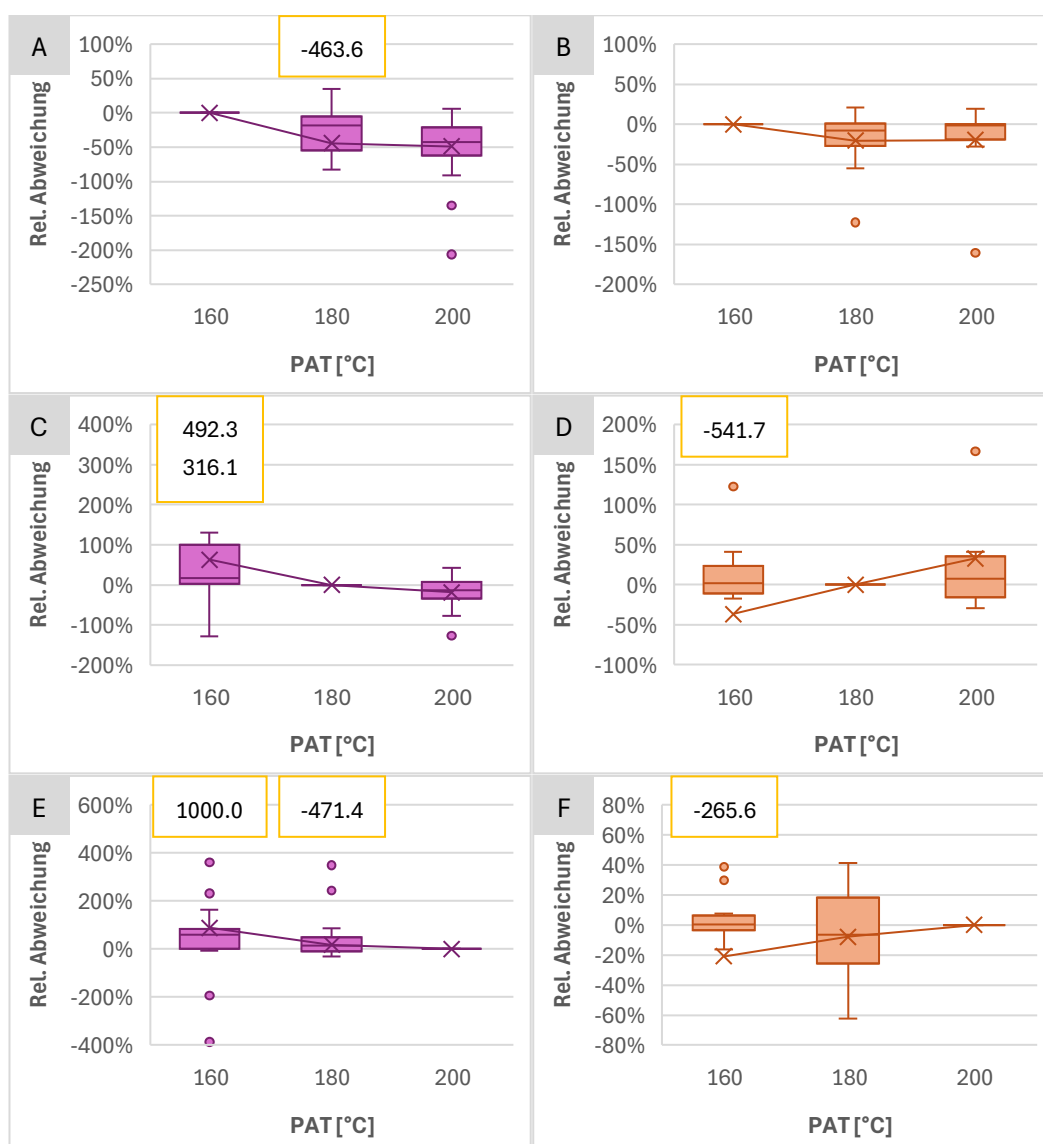


Abbildung 55: Die Boxplots der relativen Abweichungen der R_{diff} bei 160 °C Referenztemperatur der frischen (A) und rückgewonnenen PmBs (B), bei 180 °C Referenztemperatur der frischen (C) und rückgewonnenen PmBs (D) und bei 200 °C Referenztemperatur der frischen (E) und rückgewonnenen PmBs (F)

Tabelle 35 und Tabelle 36).

Der MW der frischen PmBs unterscheidet sich von dem der rückgewonnenen PmBs bei der $R_{3,2}$ kPa im Durchschnitt um 6.48 %, bei der R_{10} kPa um 6.56 % und bei der R_{diff} um 6.15 %. Bei allen drei BKW liegen die MW der NH-PmBs über dem Durchschnitt, und bei den H-PmBs unter dem Durchschnitt.

In den allermeisten Fällen sind die Werte der frischen PmBs höher als die der rückgewonnenen PmBs. Die Ausnahmen sind bei der $R_{3,2}$ kPa das PmB-E 65/105-60 von Hersteller 2 (nur das Ergebnis des PmBs, dass im Rotationsverdampfer erwärmt wurde), bei der R_{10} kPa das PmB 65/105-80 von Hersteller 1 und bei der R_{diff} das PmB-E 45/80-65 von Hersteller 2, das PmB-E 90/150-60 von Hersteller 3 und das PmB 45/80-80 von Hersteller 1 (Tabelle 24, Tabelle 34, Tabelle 35 und Tabelle 36).

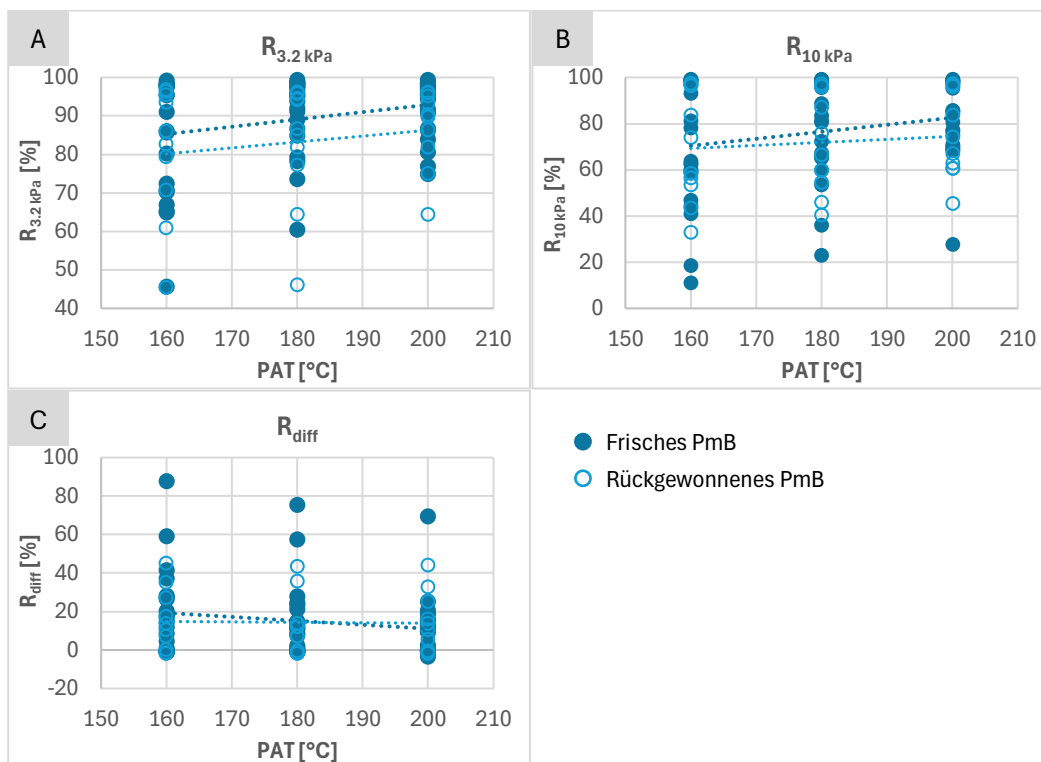


Abbildung 56: Alle Werte und die Trendlinien der $R_{3,2 \text{ kPa}}$ (A), der $R_{10 \text{ kPa}}$ (B) und der R_{diff} (C), die für die Regressionsanalysen benutzt wurden

Bei der $R_{3,2 \text{ kPa}}$ beträgt die Differenz des höchsten und tiefsten Einzelwerts bei frischen PmBs durchschnittlich 8.29 %. Die Differenz ist bei NH-PmBs etwas niedriger als der Durchschnitt. Im Gegensatz dazu ist die Differenz bei H-PmBs etwas höher als der Durchschnitt. Derselbe Trend zeigt sich auch bei der $R_{10 \text{ kPa}}$ und der R_{diff} , bei denen die Differenz durchschnittlich 13.37 % für die $R_{10 \text{ kPa}}$ und 9.07 % für die R_{diff} beträgt. Bei den rückgewonnenen PmBs betragen die durchschnittlichen Differenzen der $R_{3,2 \text{ kPa}}$ 6.81 %, bei der $R_{10 \text{ kPa}}$ 6.26 % und bei der R_{diff} 4.40 %. Wie bei den frischen PmBs streuen die NH-PmBs bei der $R_{3,2 \text{ kPa}}$ und der R_{diff} weniger stark und die H-PmBs streuen stärker als der Durchschnitt. Bei der $R_{10 \text{ kPa}}$ ist es genau umgekehrt (Tabelle 25).

Die Norm SN EN 16659:2016-09 «Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – MSCR-Prüfung (Multiple Stress Creep and Recovery Test)» [34] (Tabelle 2) gibt für die R_{diff} eine r von 2 % des MW an. Bei keinem der frischen oder rückgewonnenen PmBs liegen alle drei Einzelwerte innerhalb der r . Die Streuung ist bei den meisten PmBs deutlich höher als die r (Abbildung 57, Tabelle 26 und Tabelle 27).

4.10.2 Nachgiebigkeit J_{nr}

Abbildung 58, Abbildung 59, Abbildung 60, Tabelle 37, Tabelle 38 und Tabelle 39 zeigen die Ergebnisse der J_{nr} .

Die Boxplots zeigen, dass bei der durchschnittlichen J_{nr} bei 3.2 kPa ($J_{\text{nr } 3,2 \text{ kPa}}$) und der durchschnittlichen J_{nr} bei 10 kPa ($J_{\text{nr } 10 \text{ kPa}}$) der frischen PmBs die Mediane bei 160 °C etwas höher sind als bei 180 °C und 200 °C. Bei den rückgewonnenen PmBs sind sich

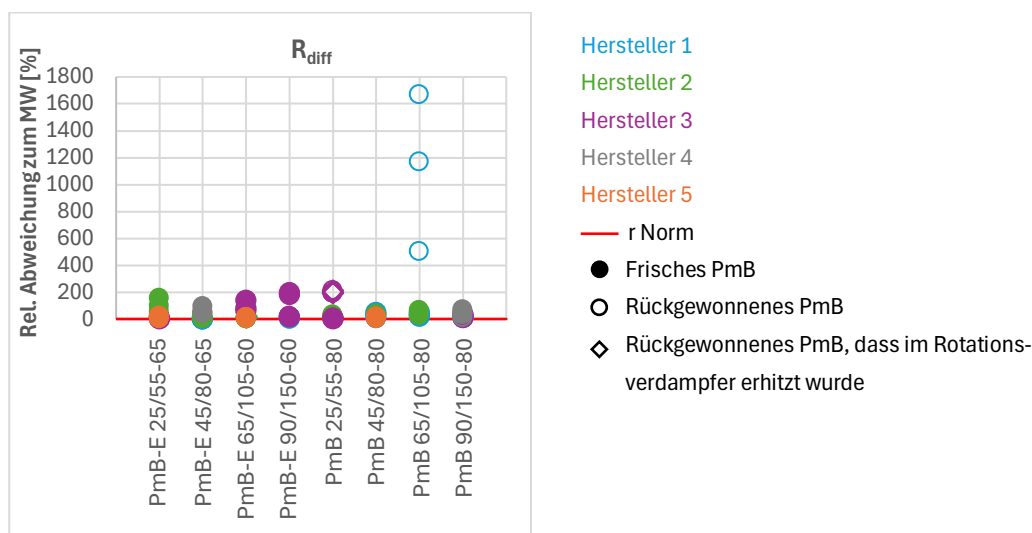


Abbildung 57: Übersicht über die PmBs, bei denen die Werte der R_{diff} innerhalb oder ausserhalb der r der SN EN 16659:2016-09 «MSCR-Prüfung (Multiple Stress Creep and Recovery Test)» [34] liegen

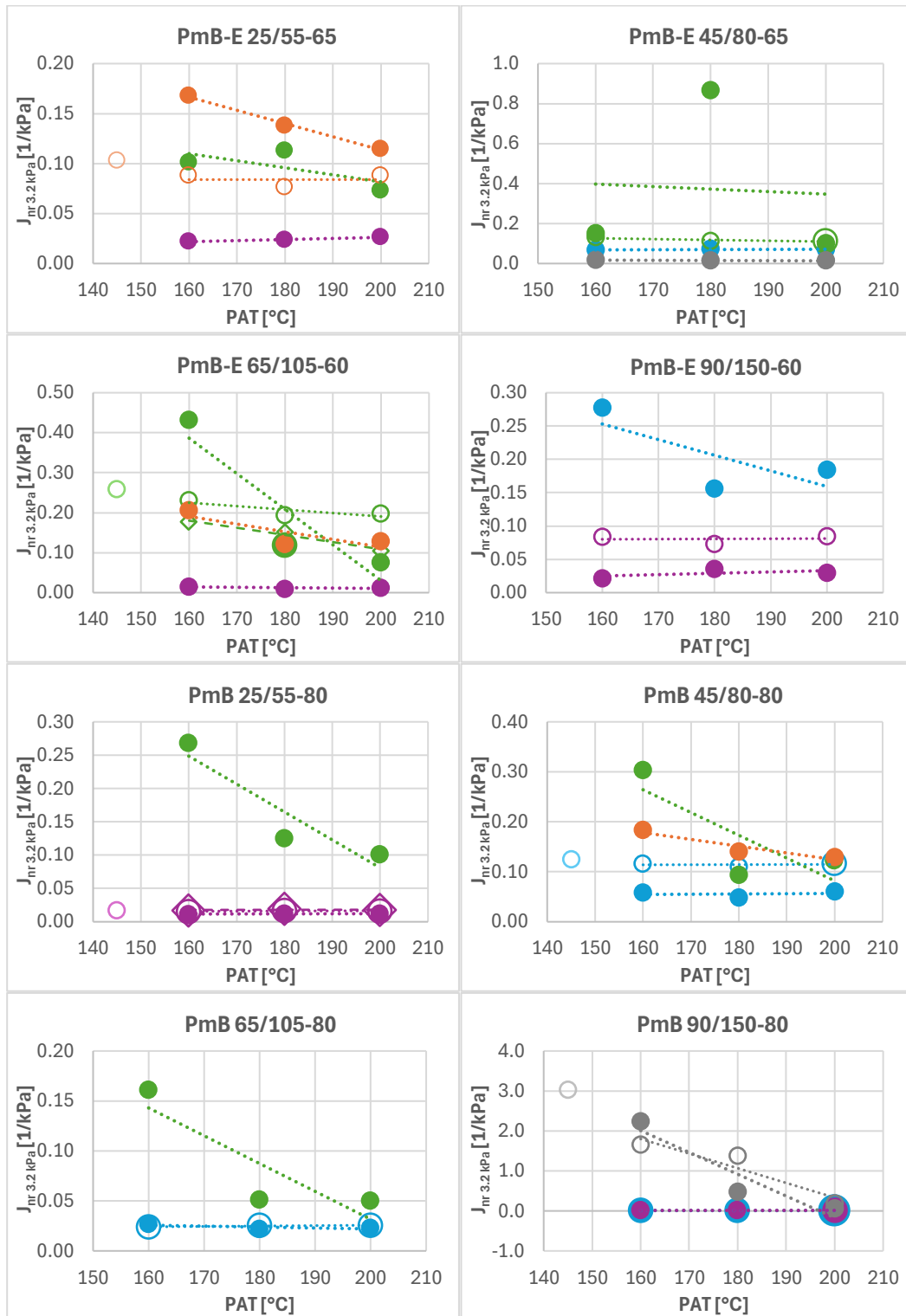
die Mediane sehr ähnlich. Bei der Differenz zwischen $J_{nr\ 3,2\ kPa}$ und $J_{nr\ 10\ kPa}$ ($J_{nr\ diff}$) sind sich die Mediane bei den frischen und rückgewonnenen PmBs sehr ähnlich.

Bei der $J_{nr\ 3,2\ kPa}$ sind die MW bei den frischen und rückgewonnenen PmBs bei 160 °C und 180 °C grösser als Q_3 und somit ausserhalb der Boxen. Bei der $J_{nr\ 10\ kPa}$ sind bei den frischen PmBs alle MW grösser als Q_3 , bei den rückgewonnenen PmBs nicht. Bei der $J_{nr\ diff}$ ist nur der MW bei 160 °C bei den frischen PmBs grösser als Q_3 und somit ausserhalb der Box. Bei den rückgewonnenen PmBs ist der MW bei 200 °C deutlich höher im Vergleich zum MW bei den anderen beiden PAT. Bei der $J_{nr\ 3,2\ kPa}$ zeigen die MW der frischen und rückgewonnenen PmBs einen klaren Abwärtstrend hin zu höheren PAT. Derselbe Trend ist auch bei den MW der $J_{nr\ 10\ kPa}$ zu beobachten. Bei der $J_{nr\ diff}$ lässt sich bei den MW kein klarer Trend erkennen.

Bei der $J_{nr\ 3,2\ kPa}$ und der $J_{nr\ 10\ kPa}$ ist die Streuung bei den frischen PmBs bei 160 °C viel grösser als bei den anderen beiden PAT. Bei den rückgewonnenen PmBs sind sich die Streuungen bei den einzelnen PAT aber recht ähnlich. Bei der $J_{nr\ diff}$ ist bei den frischen PmBs die Streuung bei 160 °C am geringsten, und bei den rückgewonnenen PmBs ist die Streuung bei 200 °C am höchsten.

Wie schon bei der R gibt es beim PmB 90/150-80 von Hersteller 4 bei der $J_{nr\ 3,2\ kPa}$ und der $J_{nr\ 10\ kPa}$ sowohl bei den frischen als auch bei den rückgewonnenen PmBs Ausreisser. Ebenfalls wie bei der R können beim frischen PmB-E 90/150-60 von Hersteller 1 bei der $J_{nr\ 10\ kPa}$ und der $J_{nr\ diff}$ Ausreisser beobachtet werden. Die übrigen Ausreisser sind im Vergleich mit den beiden anderen Werten ihrer Prüfserie unauffällig (Abbildung 61 und Tabelle 40).

Bei den relativen Abweichungen sieht man, dass bei den frischen PmBs die Mediane der $J_{nr\ 3,2\ kPa}$ und der $J_{nr\ 10\ kPa}$ einen Abwärtstrend zeigen und bei 160 °C PAT deutlich höher liegen. Bei den rückgewonnenen PmBs sind bei der $J_{nr\ 10\ kPa}$ ebenfalls die Mediane bei 160 °C PAT am höchsten, bei der $J_{nr\ 3,2\ kPa}$ lässt sich aber kein Trend erkennen. Bei der $J_{nr\ diff}$ lässt sich bei den Medianen der frischen PmBs ebenfalls kein Trend erkennen, bei den rückgewonnenen PmBs sind die Mediane bei 200 °C PAT am höchsten.



Hersteller 1

Hersteller 2

Hersteller 3

Hersteller 4

Hersteller 5

● Frisches PmB

○ Rückgewonnenes PmB

◆ Rückgewonnenes PmB, dass im Rotationsverdampfer erhitzt wurde

○ Rückgewonnenes PmB, dass nach der Rückgewinnung nicht nochmal erhitzt wurde

▲ Frisches PmB einer Anlage

▲ Rückgewonnenes PmB einer Anlage

Abbildung 58: Die Ergebnisse der $J_{nr\ 3.2\ kPa}$

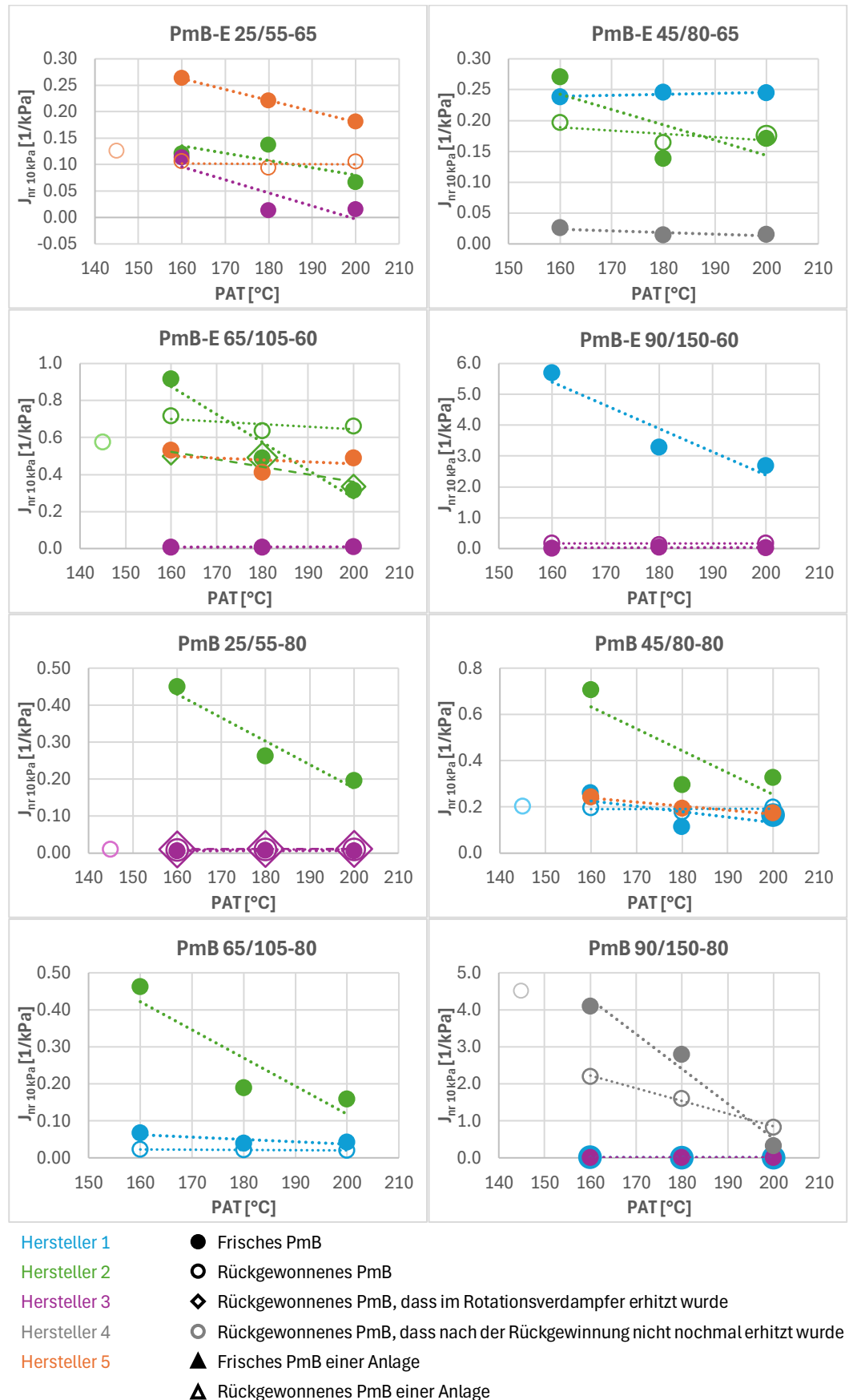
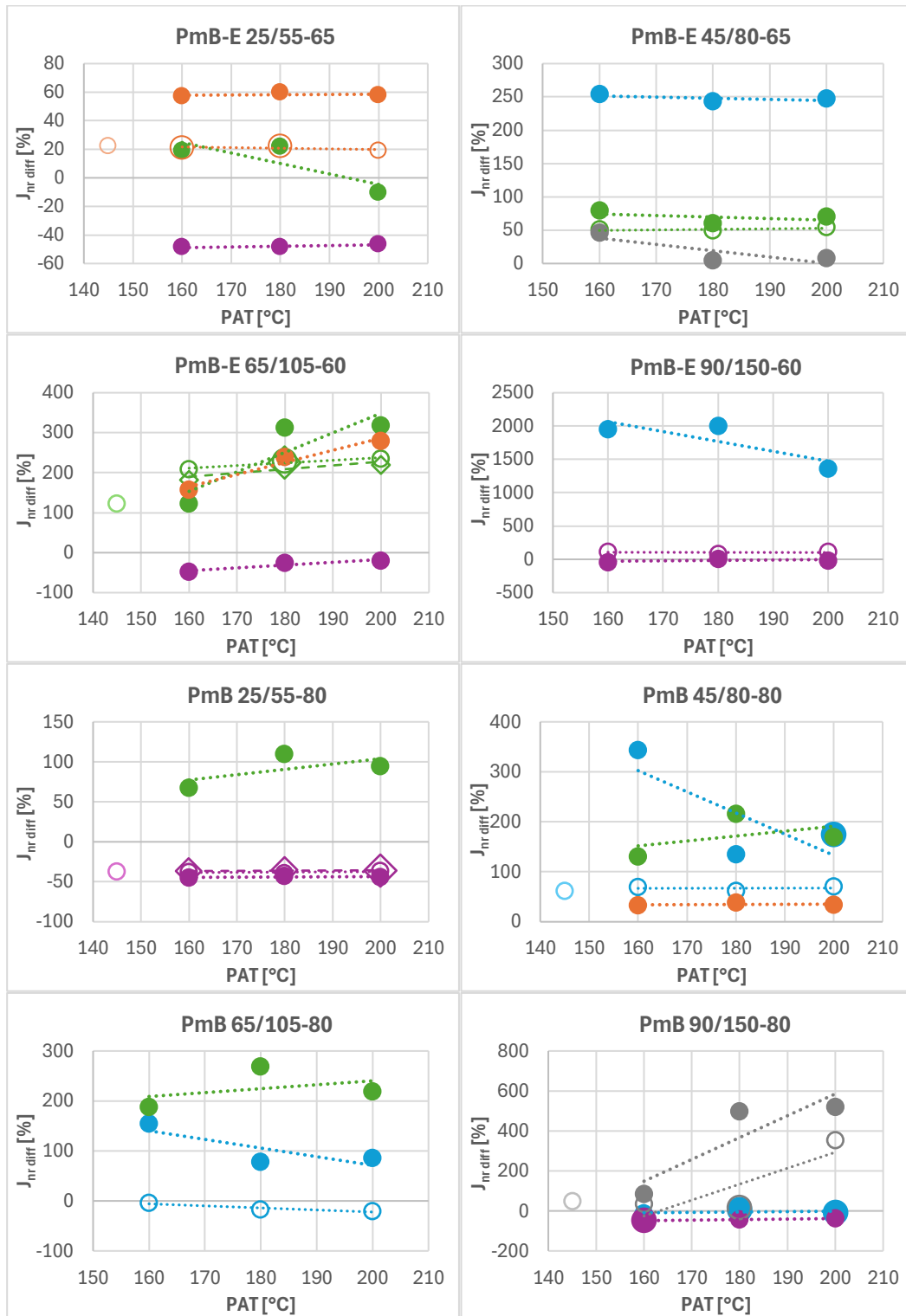


Abbildung 59: Die Ergebnisse der $J_{nr\ 10\ kPa}$



Hersteller 1

Hersteller 2

Hersteller 3

Hersteller 4

Hersteller 5

● Frisches PmB

○ Rückgewonnenes PmB

◊ Rückgewonnenes PmB, dass im Rotationsverdampfer erhitzt wurde

○ Rückgewonnenes PmB, dass nach der Rückgewinnung nicht nochmal erhitzt wurde

▲ Frisches PmB einer Anlage

▲ Rückgewonnenes PmB einer Anlage

Abbildung 60: Die Ergebnisse der $J_{nr\ diff}$

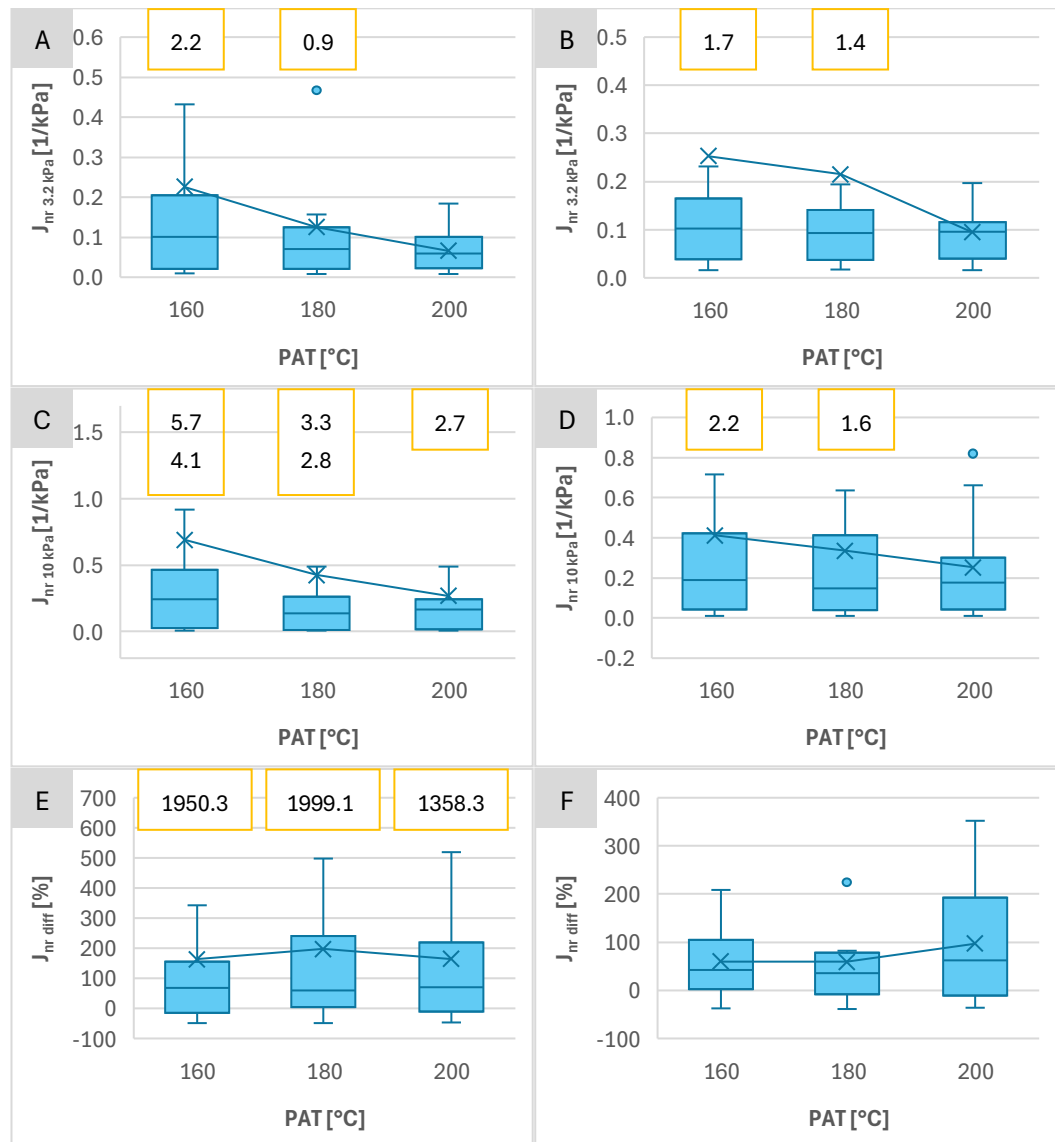


Abbildung 61: Die Boxplots der absoluten Werte der $J_{nr\ 3.2\ kPa}$ der frischen (A) und rückgewonnenen PMBs (B), der $J_{nr\ 10\ kPa}$ der frischen (C) und rückgewonnenen PMBs (D) und der $J_{nr\ diff}$ der frischen (E) und rückgewonnenen PMBs (F)

Wie bei den Medianen liegen bei der $J_{nr\ 3.2\ kPa}$ und der $J_{nr\ 10\ kPa}$ auch die MW bei 160 °C PAT deutlich höher. Bei der $J_{nr\ 3.2\ kPa}$ ist bei 200 °C Referenztemperatur der MW bei 160 °C PAT sogar grösser als Q3. Bei der $J_{nr\ 10\ kPa}$ ist das ebenfalls bei 200 °C Referenztemperatur der Fall, betrifft aber bei den frischen PMBs die MW bei 160 °C und 180 °C, bei den rückgewonnenen PMBs aber nur den MW bei 160 °C PAT. Bei den rückgewonnenen PMBs zeigt sich bei den MW der $J_{nr\ 3.2\ kPa}$ ein Abwärtstrend. Bei 180 °C Referenztemperatur ist der MW bei 200 °C PAT kleiner als Q1, bei 200 °C Referenztemperatur ist der MW bei beiden PAT grösser als Q3. Bei der $J_{nr\ diff}$ zeigt sich bei den MW der frischen PMBs kein Trend, jedoch sind die MW bei 180 °C Referenztemperatur bei 200 °C PAT, und bei 200 °C Referenztemperatur bei 180 °C PAT grösser als Q3. Bei den rückgewonnenen PMBs sind die MW bei 200 °C PAT am grössten. Bei 160 °C Referenztemperatur bei 180 °C und 200 °C PAT und bei 180 °C Referenztemperatur bei 200 °C PAT sind die MW grösser als Q3, bei 200 °C Referenztemperatur bei 160 °C PAT ist der MW kleiner als Q1.

Bei den frischen PmBs sieht man bei der $J_{nr\ 3,2\ kPa}$ und der $J_{nr\ 10\ kPa}$, dass die Streuung bei 160 °C PAT am grössten ist.

Die Ausreisser bei der $J_{nr\ 3,2\ kPa}$ betreffen bei den frischen PmBs solche, bei denen sich einer der Werte deutlich von den anderen beiden Werten $J_{nr\ diff}$ unterscheidet. Bei den rückgewonnenen PmBs betrifft es bei der $J_{nr\ 3,2\ kPa}$ diejenigen, bei denen die Werte generell etwas weiter auseinander liegen. Bei der $J_{nr\ 10\ kPa}$ und der $J_{nr\ diff}$ ist es ähnlich, die meisten Ausreisser sind aber unauffällig (Abbildung 62, Abbildung 63, Abbildung 64, Tabelle 41, Tabelle 42 und Tabelle 43).

Bei der $J_{nr\ 3,2\ kPa}$ und der $J_{nr\ 10\ kPa}$ sieht man einen guten Zusammenhang zwischen dem höchsten Einzelwert einer Prüfserie und der PAT. Von den 21 frischen PmBs wurden bei 13 (62 %) die höchsten $J_{nr\ 3,2\ kPa}$ -Einzelwerte bei einer PAT von 160 °C gemessen, bei der $J_{nr\ 10\ kPa}$ war das bei 15 PmBs (71 %) der Fall. Bei der $J_{nr\ diff}$ wurden bei zehn

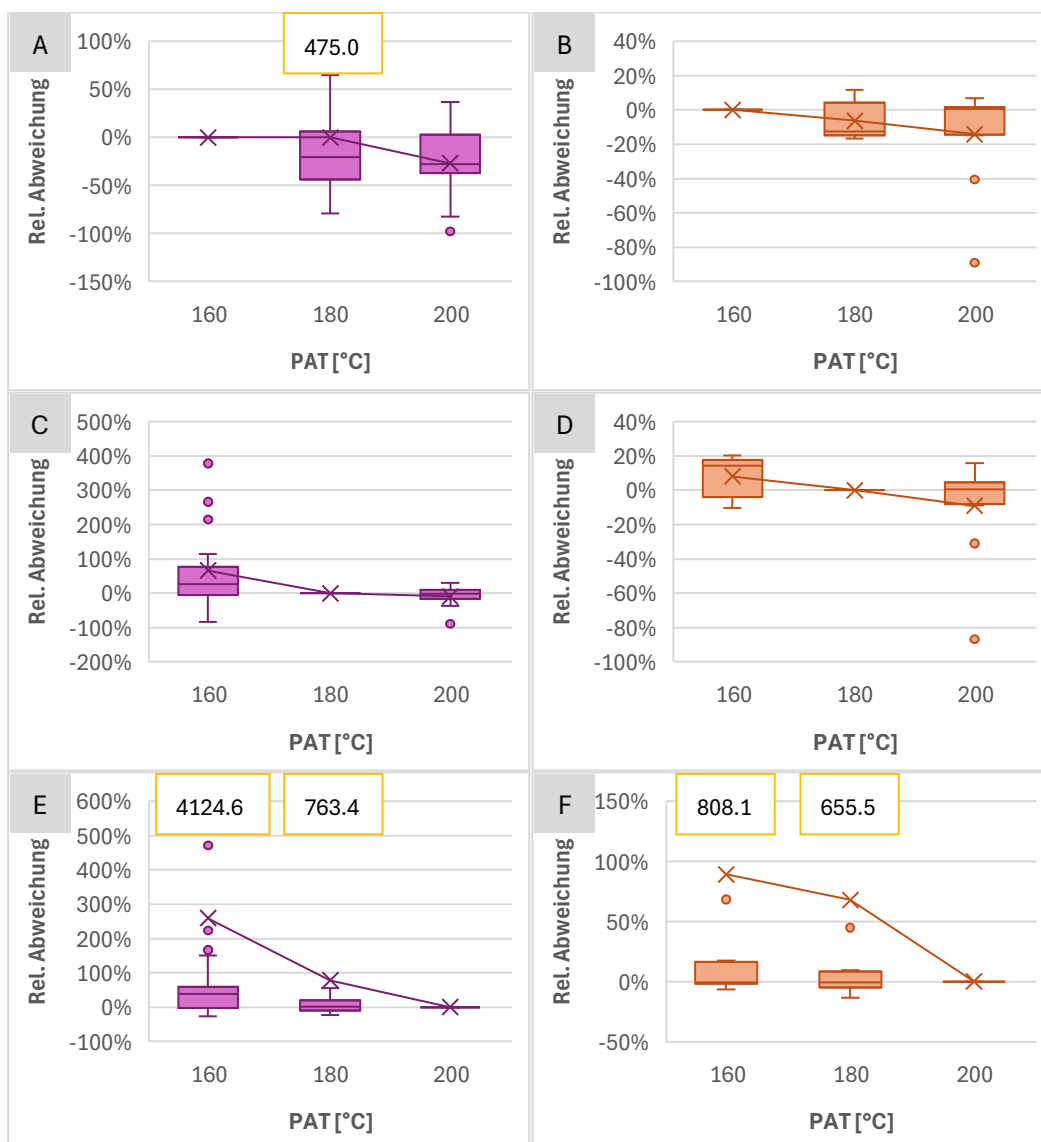


Abbildung 62: Die Boxplots der relativen Abweichungen der $J_{nr\ 3,2\ kPa}$ bei 160 °C Referenztemperatur der frischen (A) und rückgewonnenen PmBs (B), bei 180 °C Referenztemperatur der frischen (C) und rückgewonnenen PmBs (D) und bei 200 °C Referenztemperatur der frischen (E) und rückgewonnenen PmBs (F)

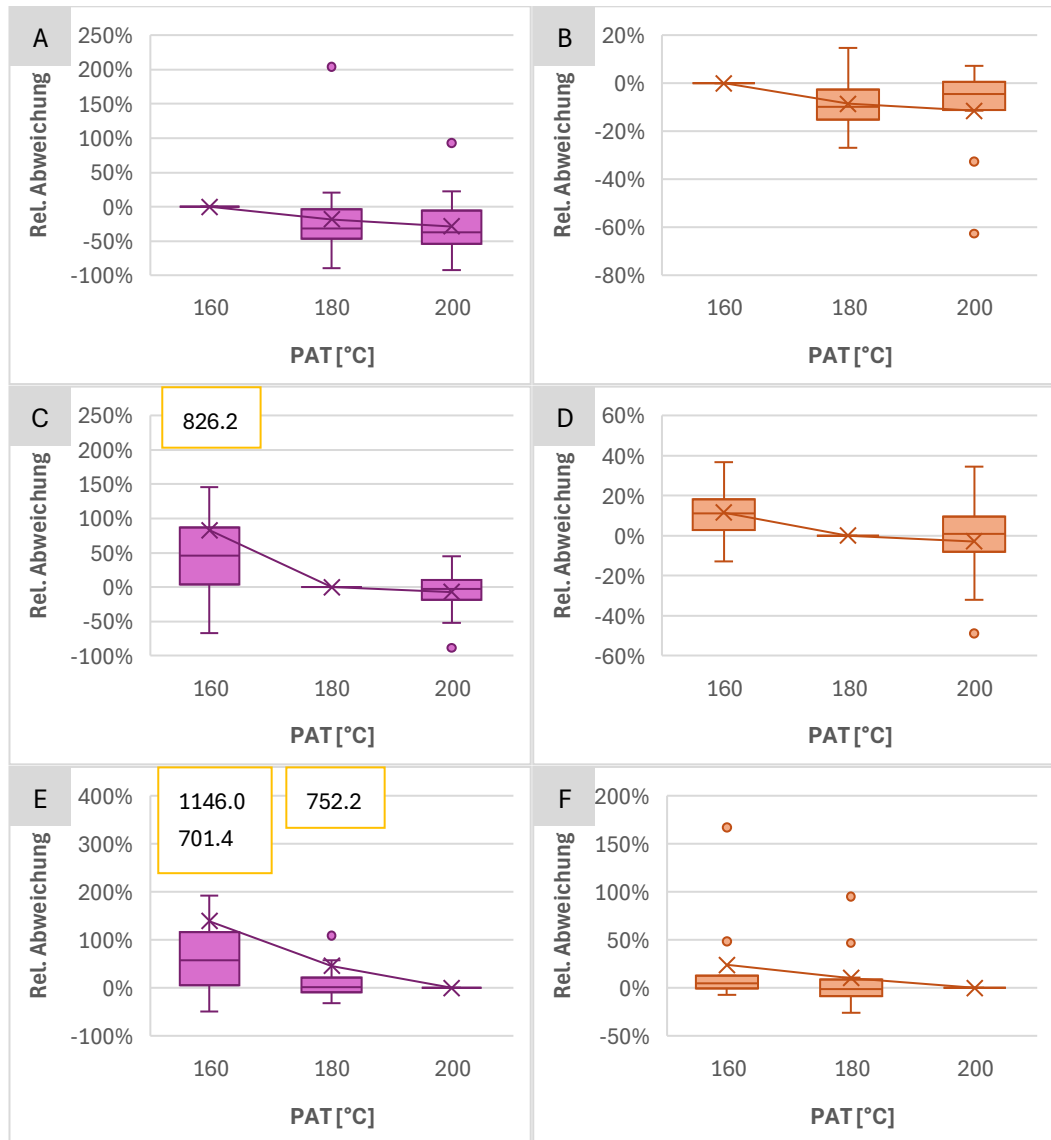


Abbildung 63: Die Boxplots der relativen Abweichungen der $J_{nr\ 10\ kPa}$ bei 160 °C Referenztemperatur der frischen (A) und rückgewonnenen PmBs (B), bei 180 °C Referenztemperatur der frischen (C) und rückgewonnenen PmBs (D) und bei 200 °C Referenztemperatur der frischen (E) und rückgewonnenen PmBs (F)

PmBs (48 %) die höchsten Einzelwerte bei 180 °C PAT gemessen (Tabelle 17). Bei den rückgewonnenen PmBs lässt sich bei der $J_{nr\ 3,2\ kPa}$ kein eindeutiger Trend erkennen. Bei der $J_{nr\ 10\ kPa}$ wiederum wurde bei sieben PmBs (70 %) der höchste Einzelwert bei 160 °C gemessen. Bei den $J_{nr\ diff}$ -Werten der rückgewonnenen PmBs wurde bei fünf PmBs (50 %) der höchste Einzelwert bei 200 °C gemessen, bei vier PmBs bei 180 °C (40 %) und nur bei einem PmB bei 160 °C (10 %; Tabelle 18).

Bei den Steigungen der Trendlinien zeigt sich, dass bei der $J_{nr\ 3,2\ kPa}$ und der $J_{nr\ 10\ kPa}$ 19 PmBs (90 %) bzw. 15 PmBs (71 %) Trendlinien ohne Steigung haben. Bei der $J_{nr\ diff}$ zeigen 14 der 21 frischen PmBs (67 %) eine positive Steigung hin zu höheren PAT (Abbildung 58, Abbildung 59 und Abbildung 60). Bei den rückgewonnenen PmBs haben sowohl bei der $J_{nr\ 3,2\ kPa}$ als auch bei der $J_{nr\ 10\ kPa}$ jeweils neun PmBs (jeweils 90 %) keine Steigung. Bei der $J_{nr\ diff}$ haben sieben der zehn rückgewonnenen PmBs (70 %) eine po-

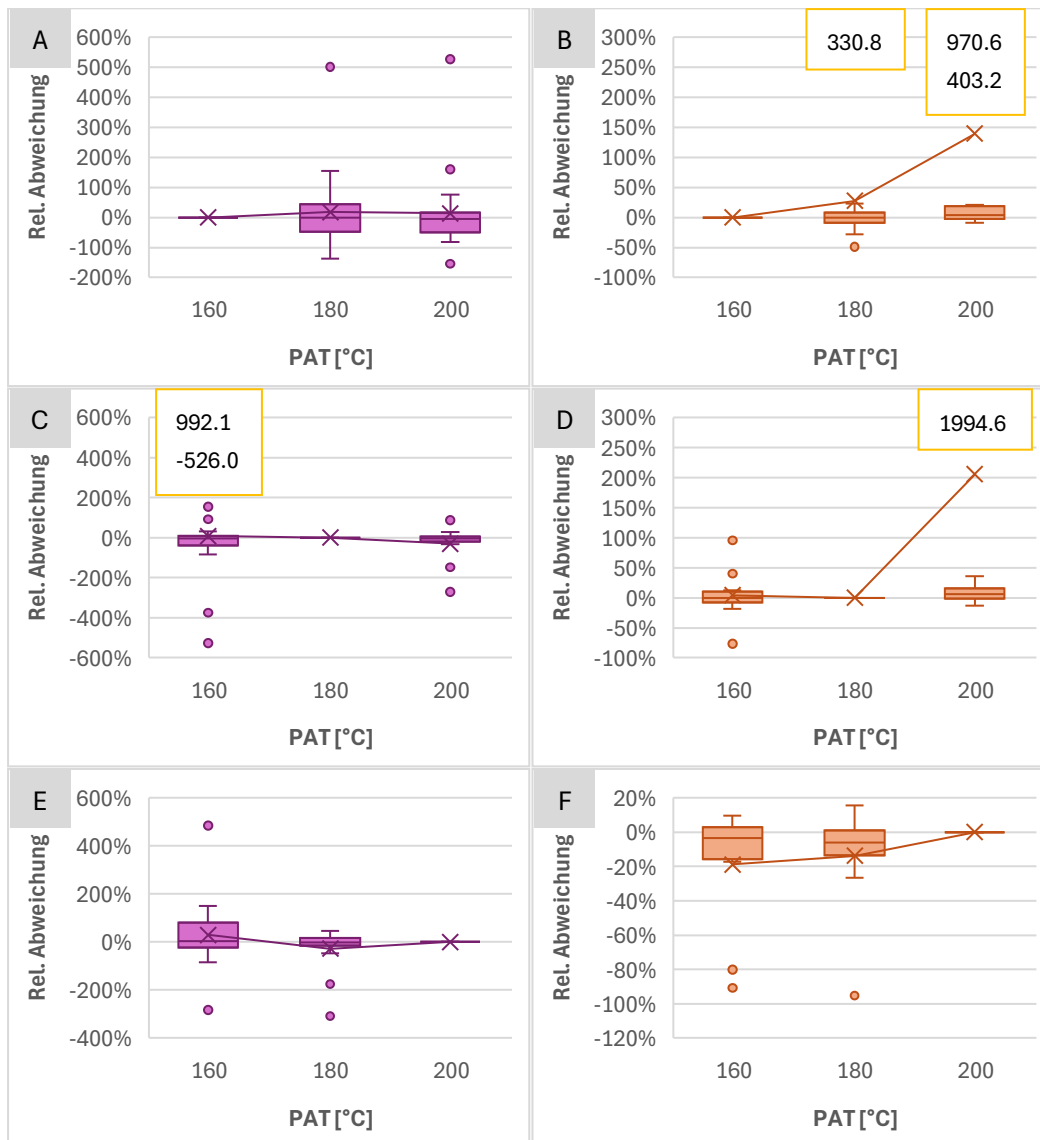


Abbildung 64: Die Boxplots der relativen Abweichungen der $J_{nr,diff}$ bei 160 °C Referenztemperatur der frischen (A) und rückgewonnenen PMBs (B), bei 180 °C Referenztemperatur der frischen (C) und rückgewonnenen PMBs (D) und bei 200 °C Referenztemperatur der frischen (E) und rückgewonnenen PMBs (F)

sitive Steigung (Abbildung 58, Abbildung 59 und Abbildung 60).

Die Trendlinie über alle Einzelwerte aller frischen PMBs der $J_{nr,3.2\text{ kPa}}$ hat keine Steigung. Bei der $J_{nr,10\text{ kPa}}$ beträgt die Steigung über alle Einzelwerte $-0.01\text{ 1/kPa}^\circ\text{C}$ und $0.02\text{ }^\circ\text{C}$ bei der $J_{nr,diff}$ (Abbildung 65 und Tabelle 19). Bei den rückgewonnenen PMBs haben die Trendlinien über alle Einzelwerte sowohl bei der $J_{nr,3.2\text{ kPa}}$ als auch bei der $J_{nr,10\text{ kPa}}$ keine Steigung. Bei der $J_{nr,diff}$ beträgt die Steigung $0.92\text{ }^\circ\text{C}$.

Bei den frischen PMBs wurde für die $J_{nr,3.2\text{ kPa}}$ ein p-Wert von 0.086, für die $J_{nr,10\text{ kPa}}$ ein p-Wert von 0.186 und für die $J_{nr,diff}$ ein p-Wert von 0.996 ermittelt (Abbildung 65 und Tabelle 20). Bei der $J_{nr,3.2}$ ist der Zusammenhang zwischen der PAT und dem ermittelten Wert tendenziell statistisch signifikant, bei den beiden anderen Bindemittleigenschaften ist dieser Zusammenhang nicht statistisch signifikant. Bei den rückgewonnenen PMBs wurde für die $J_{nr,3.2\text{ kPa}}$ ein p-Wert von 0.343, für die $J_{nr,10\text{ kPa}}$ ein p-Wert von 0.473 und für die $J_{nr,diff}$ ein p-Wert von 0.442 ermittelt (Tabelle 21). Bei keinem der

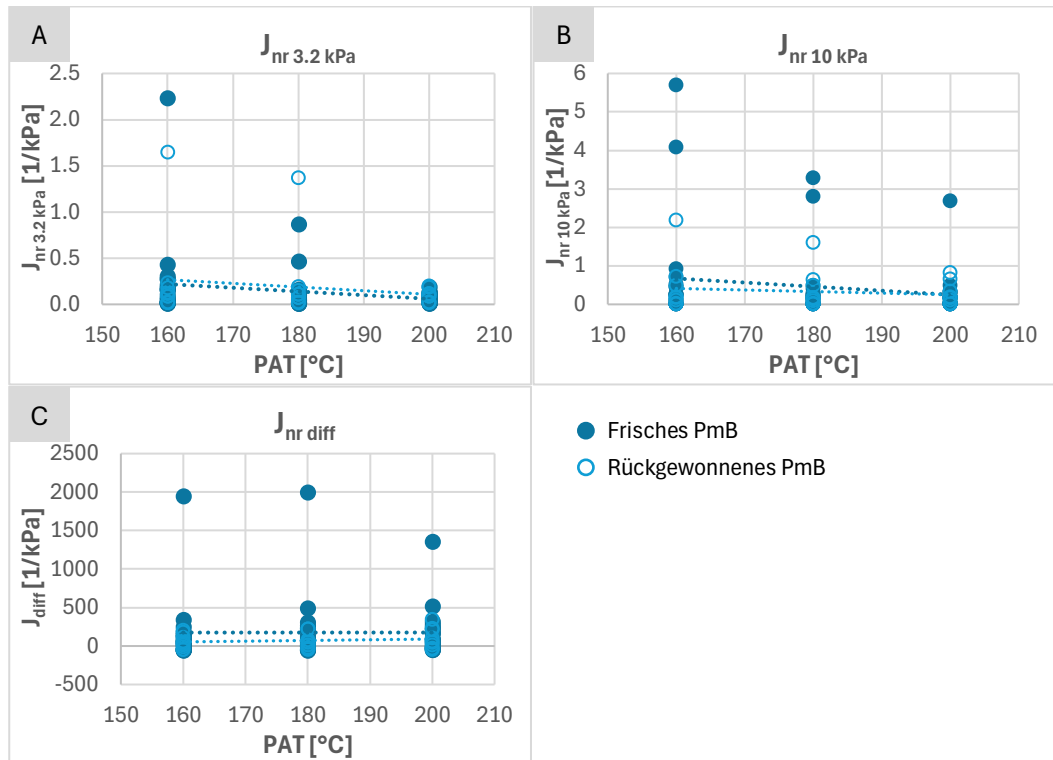


Abbildung 65: Alle Werte und die Trendlinien der $J_{nr\ 3.2\ kPa}$ (A), der $J_{nr\ 10\ kPa}$ (B) und der $J_{nr\ diff}$ (C), die für die Regressionsanalysen benutzt wurden

drei BKW gibt es bei den rückgewonnenen PmBs einen statistischen signifikanten Zusammenhang zwischen der PAT und dem ermittelten Wert.

Bezüglich der SD ergibt sich bei der J_{nr} der frischen PmBs ein ähnliches Bild wie bei der R. Sowohl bei der $J_{nr\ 3.2}$ als auch bei der $J_{nr\ 10\ kPa}$ liegen jeweils 19 Einzelwerte (30 %) ausserhalb der entsprechenden SD. Bei der $J_{nr\ diff}$ liegen 20 Einzelwerte (32 %) ausserhalb der SD. Bei der $J_{nr\ 3.2\ kPa}$ und der $J_{nr\ 10\ kPa}$ betrifft es jeweils 14 Einzelwerte (22 %) bei einer PAT von 160 °C. Bei der $J_{nr\ diff}$ ist die Aufteilung der Randwerte auf die PAT etwas gleichmässiger verteilt, aber auch bei diesem BKW liegen die meisten Randwerte, nämlich neun (14 %), bei 160 °C.

Wenn man die ermittelten Messgrössen insofern vergleicht, ob die Einzelwerte, die ausserhalb der SD liegen, dieselbe PAT betreffen, sieht man, dass bei elf der 21 frischen PmBs die Messgrössen der $J_{nr\ 3.2\ kPa}$ und der $J_{nr\ 10\ kPa}$ bei derselben Temperatur ausserhalb der SD liegen. Das ist in zehn Fällen bei 160 °C der Fall. Nimmt man noch die $J_{nr\ diff}$ dazu, trifft dies auf sechs PmBs zu, fünf davon bei 160 °C.

Bei allen drei BKW gehören jeweils elf Randwerte, also knapp über die Hälfte, zu NH-PmBs (Tabelle 22, Tabelle 37, Tabelle 38 und Tabelle 39). Bei den rückgewonnenen PmBs liegen bei der $J_{nr\ 3.2\ kPa}$ und der $J_{nr\ 10\ kPa}$ jeweils neun der 30 Einzelwerte (30 %) ausserhalb der SD. Diese neun Randwerte gehören jeweils zum selben PmB und betreffen dieselbe PAT. Bei der $J_{nr\ diff}$ sind es zehn Einzelwerte (33 %), die ausserhalb der SD liegen. Die Verteilung der Randwerte auf die PAT lässt keinen Trend erkennen. Der Vergleich der Randwerte der $J_{nr\ diff}$ mit denen der $J_{nr\ 3.2\ kPa}$ und der $J_{nr\ 10\ kPa}$ zeigt, dass fünf rückgewonnene PmBs bei denselben Temperaturen ausserhalb der SD liegen, die Verteilung auf die PAT ist aber regelmässig. Bei den rückgewonnenen PmBs sind

die Randwerte gleichmässig auf NH-PmBs und H-PmBs verteilt (Tabelle 23, Tabelle 37, Tabelle 38 und Tabelle 39).

Alle Einzelwerte der $J_{nr\ 3.2\ kPa}$, der $J_{nr\ 10\ kPa}$, und der $J_{nr\ diff}$ liegen innerhalb des entsprechenden KI. Ausserdem liegen alle z-scores der $J_{nr\ 3.2\ kPa}$, der $J_{nr\ 10\ kPa}$ und der $J_{nr\ diff}$ im Bereich zwischen -2 und +2. Das gilt sowohl für die frischen als auch die rückgewonnenen PmBs (Tabelle 37, Tabelle 38 und Tabelle 39).

Die MW der frischen PmBs unterscheiden sich bei der $J_{nr\ 3.2\ kPa}$ durchschnittlich um $0.06\ 1/kPa$, bei der $J_{nr\ 10\ kPa}$ um $0.14\ 1/kPa$ und bei der $J_{nr\ diff}$ um 76.17 %. Bei der $J_{nr\ 3.2\ kPa}$ ist der MW der NH-PmBs höher, und der MW der H-PmBs tiefer als der Durchschnitt. Bei der $J_{nr\ 10\ kPa}$ und der $J_{nr\ diff}$ ist es genau andersherum.

Bei den meisten PmBs sind die Werte der R bei den frischen PmBs höher als bei den rückgewonnenen PmBs. Davon ausgenommen sind bei der $J_{nr\ 3.2\ kPa}$ die PmBs PmB 45/80-80 und PmB 65/105-80 von Hersteller 1 und das PmB 90/150-80 von Hersteller 4. Bei der $J_{nr\ 10\ kPa}$ betrifft es das PmB-E 65/105-60 von Hersteller 2 (nur das Ergebnis des PmBs, dass im Ofen erwärmt wurde) und das PmB 45/80-80 von Hersteller 1. Beim PmB-E 90/150-60 von Hersteller 2 und beim PmB 25/55-80 von Hersteller 3 sind alle drei BKW der J_{nr} bei den frischen PmBs tiefer als bei den rückgewonnenen PmBs (Tabelle 24, Tabelle 37, Tabelle 38 und Tabelle 39).

Bei der $J_{nr\ 3.2\ kPa}$ liegt die durchschnittliche Differenz zwischen dem höchsten und dem tiefsten Einzelwert der frischen PmBs bei $0.20\ 1/kPa$. Bei NH-PmBs ist die Differenz kleiner als der Durchschnitt und bei H-PmBs höher. Bei der $J_{nr\ 10\ kPa}$ ist derselbe Trend beobachtbar und die durchschnittliche Differenz beträgt $0.44\ 1/kPa$. Bei der $J_{nr\ diff}$ dagegen liegt die durchschnittliche Differenz eines frischen PmBs bei 100.67 %, bei NH-PmBs ist die Differenz höher und bei H-PmBs tiefer als der Durchschnitt.

Bei den rückgewonnenen PmBs beträgt die Differenz der $J_{nr\ 3.2\ kPa}$ durchschnittlich $0.16\ 1/kPa$, bei der $J_{nr\ 10\ kPa}$ sind es durchschnittlich $0.17\ 1/kPa$ und bei der $J_{nr\ diff}$ durchschnittlich 47.27 %. Bei allen drei BKW streuen die NH-PmBs weniger stark, und die H-PmBs stärker als der Durchschnitt (Tabelle 25).

Für die J_{nr} gibt die Norm SN EN 16659:2016-09 «MSCR-Prüfung (Multiple Stress Creep and Recovery Test)» [34] (Tabelle 2) eine r von 9 % des MW an. Nur bei vier der 21 frischen PmBs (19 %) lagen alle drei Einzelwerte innerhalb der r. Bei den rückgewonnenen PmBs war das bei zwei der zehn PmBs (20 %) der Fall. Wie auch bei der R ist die Streuung in den allermeisten PmBs deutlich höher als die r (Abbildung 66, Tabelle 26 und Tabelle 27).

4.10.3 Kriech-Erholungskurven

Bei den Kriech-Erholungskurven fällt auf, dass die 160 °C-Kurve in vielen Fällen eine höhere Scherdeformation zeigt als die Kurven bei 180 °C und 200 °C PAT. Bei den frischen PmBs trifft das auf 13 der 21 PmBs (62 %) zu. Bei vielen dieser frischen PmBs ist die Scherdeformation der 160 °C-Kurven sogar um einiges höher im Vergleich zu den beiden anderen Kurven. Besonders deutlich ist das bei den PmBs von Hersteller 2. Die einzige Ausnahme bilden die PmBs von Hersteller 3, bei denen die Unterschiede der Scherdeformation bei den drei PAT sehr gering sind und meistens die 180 °C-Kurve die höchste Scherdeformation zeigt (Abbildung 67, Abbildung 68,

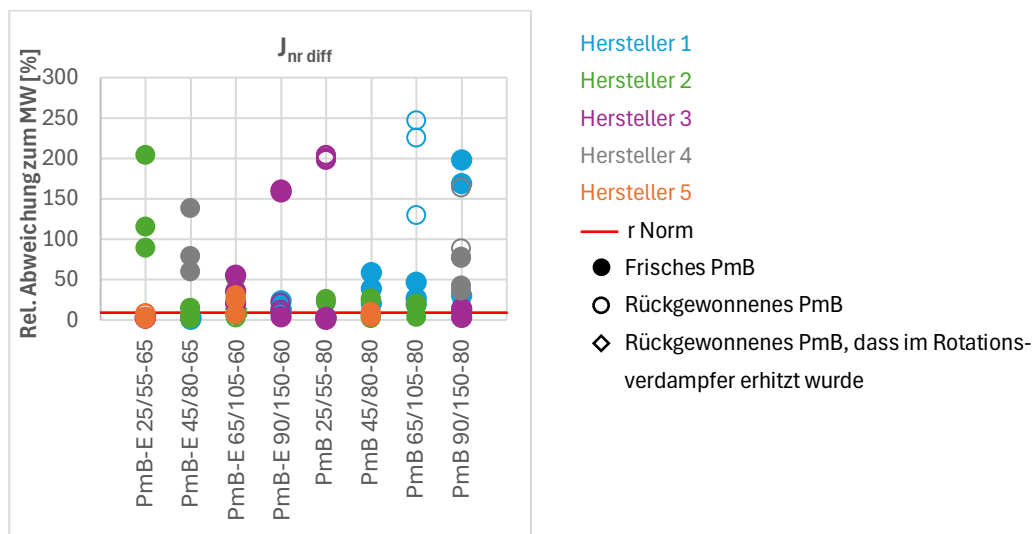


Abbildung 66: Übersicht über die PmBs, bei denen die Werte der $J_{nr\ diff}$ innerhalb oder ausserhalb der r der SN EN 16659:2016-09 «MSCR-Prüfung (Multiple Stress Creep and Recovery Test)» [34] liegen

Abbildung 69, Abbildung 70, Abbildung 71, Abbildung 72, Abbildung 73 und Abbildung 74).

Bei den rückgewonnenen PmBs ist derselbe Trend zu beobachten. Bei fünf PmBs (50 %) zeigt die 160 °C-Kurve die höchste Scherdeformation. Allerdings sind die Unterschiede zu den anderen beiden Kurven kleiner als bei den frischen PmBs. Bei sieben der zehn rückgewonnenen PmBs (70 %) liegen die Scherdeformationen in ähnlichen Bereichen wie die der frischen PmBs.

Die Kriech-Erholungskurven der PmBs, die nach der Rückgewinnung bei 145 °C nicht nochmal erwärmt wurden, wurden bereits im Kapitel 4.4 behandelt. Sie sollen an dieser Stelle trotzdem nochmal erwähnen werden, da bei drei dieser fünf PmBs die 145 °C-Kurve die höchsten Scherspannungen zeigt.

4.11 FTIR

Generell sind sich die FTIR-Spektren alle sehr ähnlich und bitumenspezifische Peaks sind sehr gut zu erkennen. Ein Vergleich mit den Peaks von oft verwendeten Zusätzen zeigt, dass alle Hersteller SBC-Polymere als Zusätze benutzen (Abbildung 75, Abbildung 76, Abbildung 77, Abbildung 78, Abbildung 79 und Abbildung 80). Dies deckt sich mit den Aussagen der Hersteller über die Polymere, die sie verwenden. Eine Übersicht über die verwendeten Polymere liefert Tabelle 14. Nur das PmB-E 45/80-65 von Hersteller 2 zeigt einen Peak in der Nähe eines ECBs oder Gummis, auf Nachfrage wurde aber bestätigt, dass keiner der beiden Stoffe, sondern nur SBS-Polymere, in ihren PmBs verwendet wird.

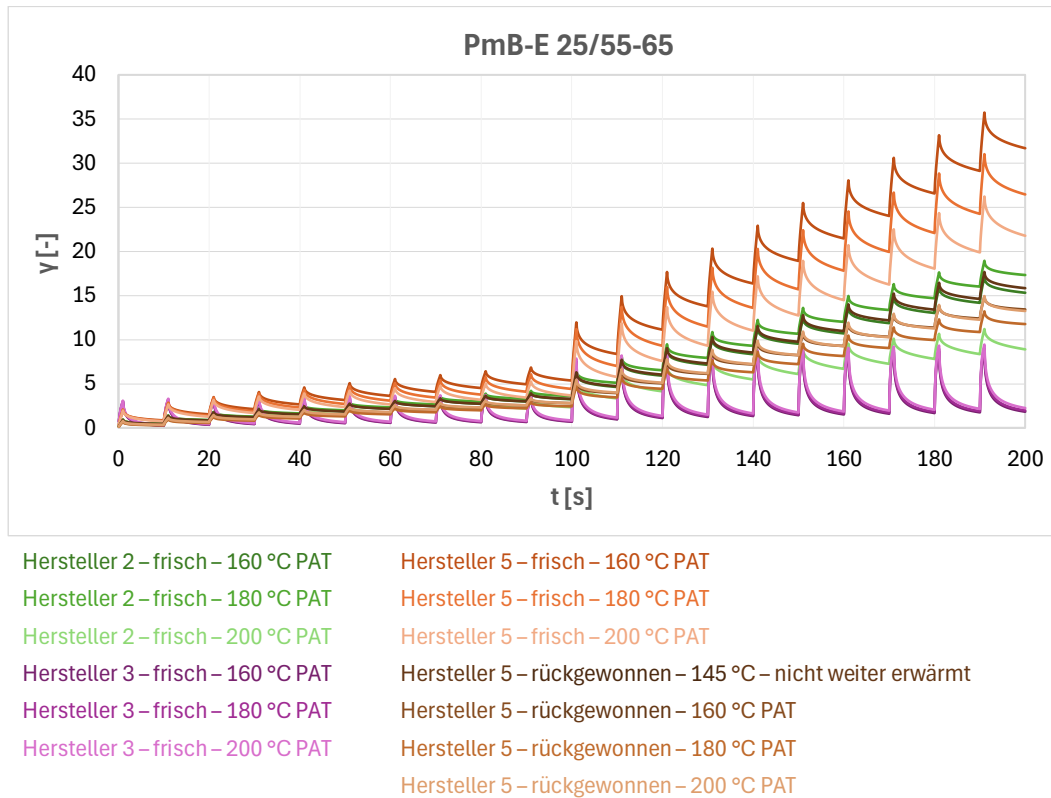


Abbildung 67: Kriech-Erholungskurven des PmB-E 25/55-65. γ = Scherdeformation; t = Zeit

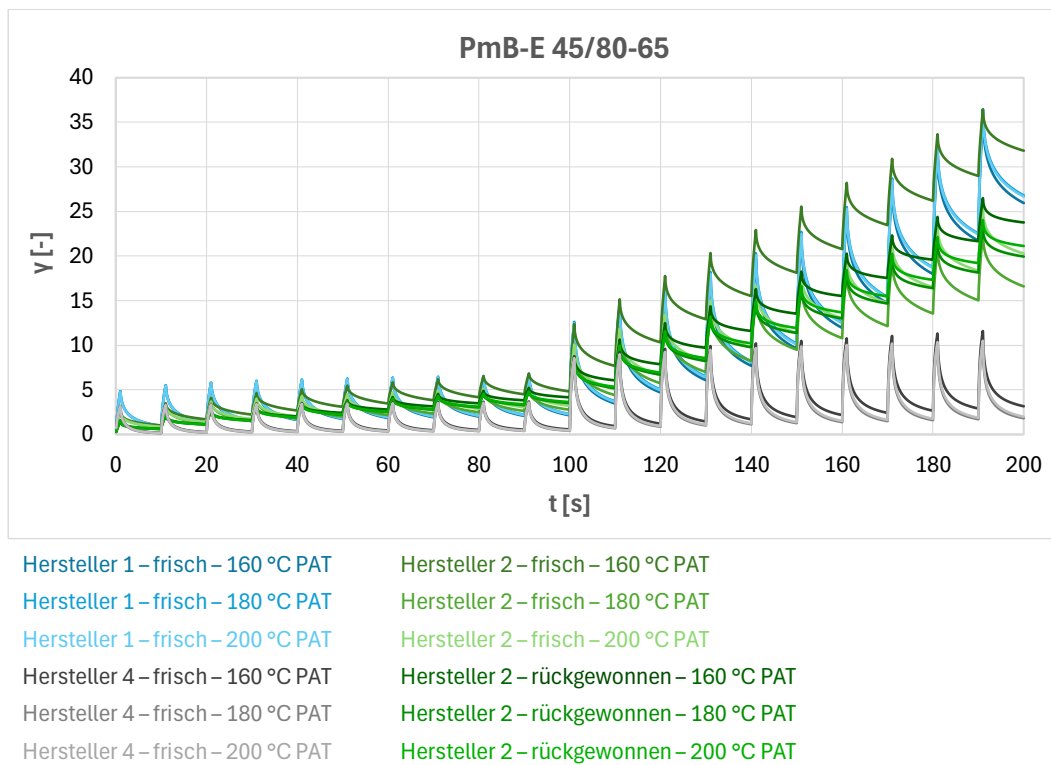


Abbildung 68: Kriech-Erholungskurven des PmB-E 45/80-65. γ = Scherdeformation; t = Zeit

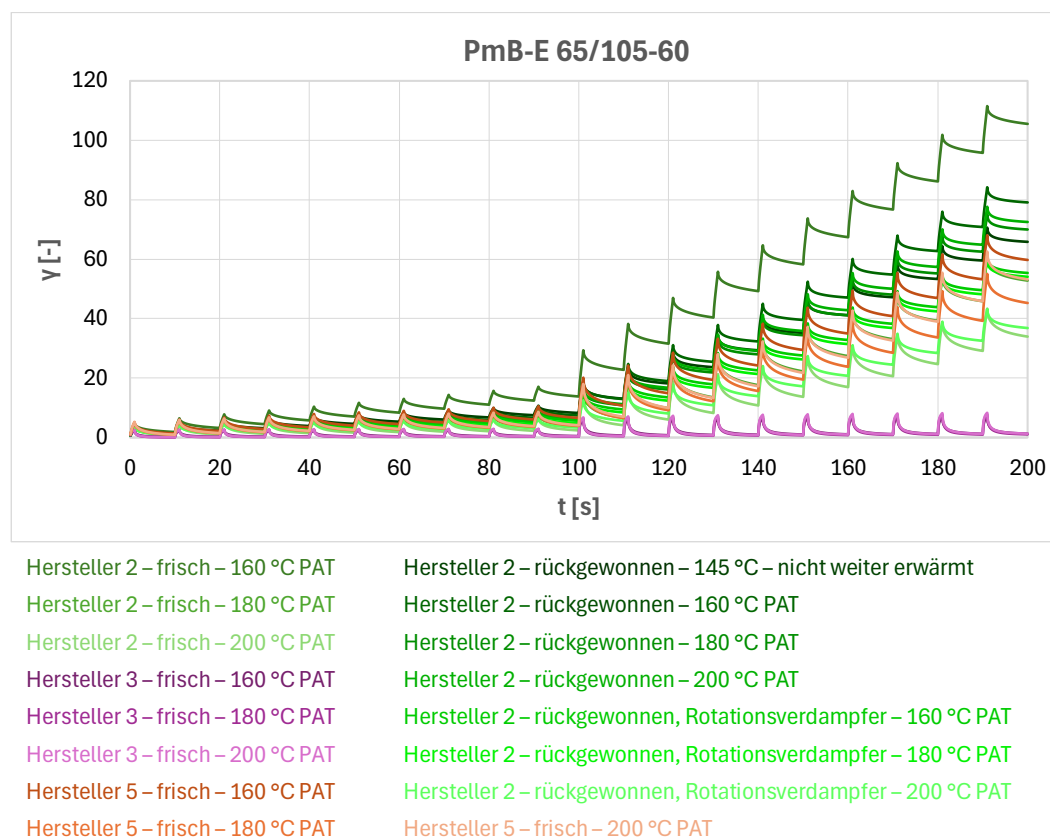


Abbildung 69: Kriech-Erholungskurven des PmB-E 65/105-60. γ = Scherdeformation; t = Zeit

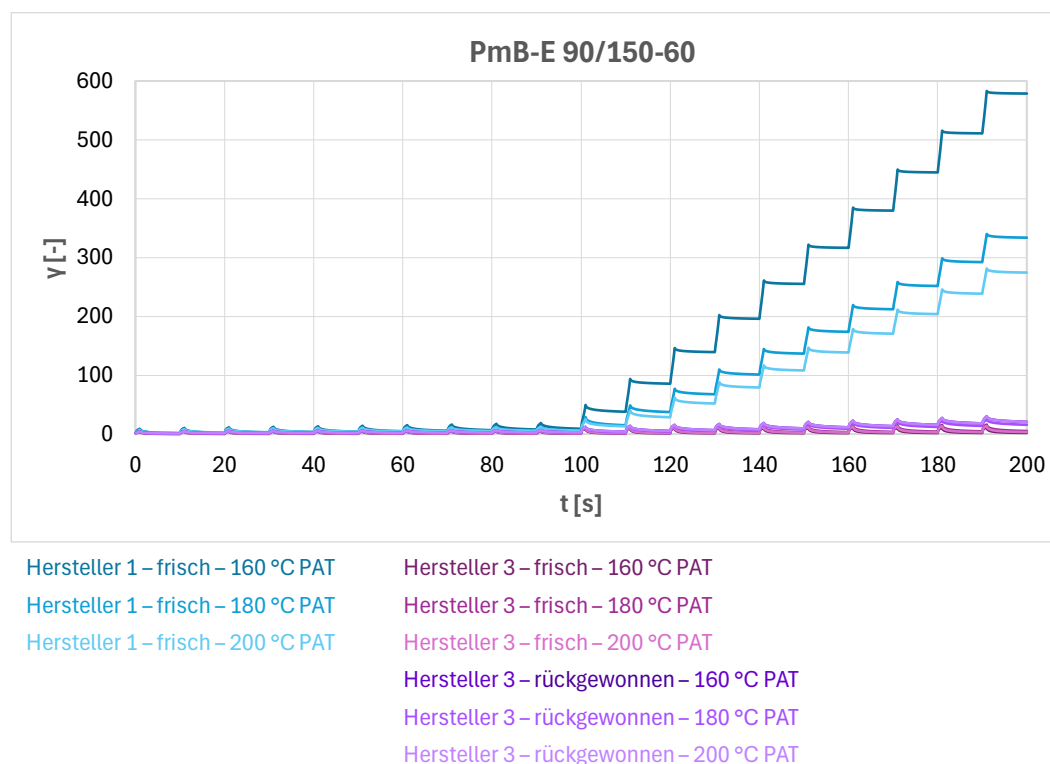


Abbildung 70: Kriech-Erholungskurven des PmB-E 90/150-60. γ = Scherdeformation; t = Zeit

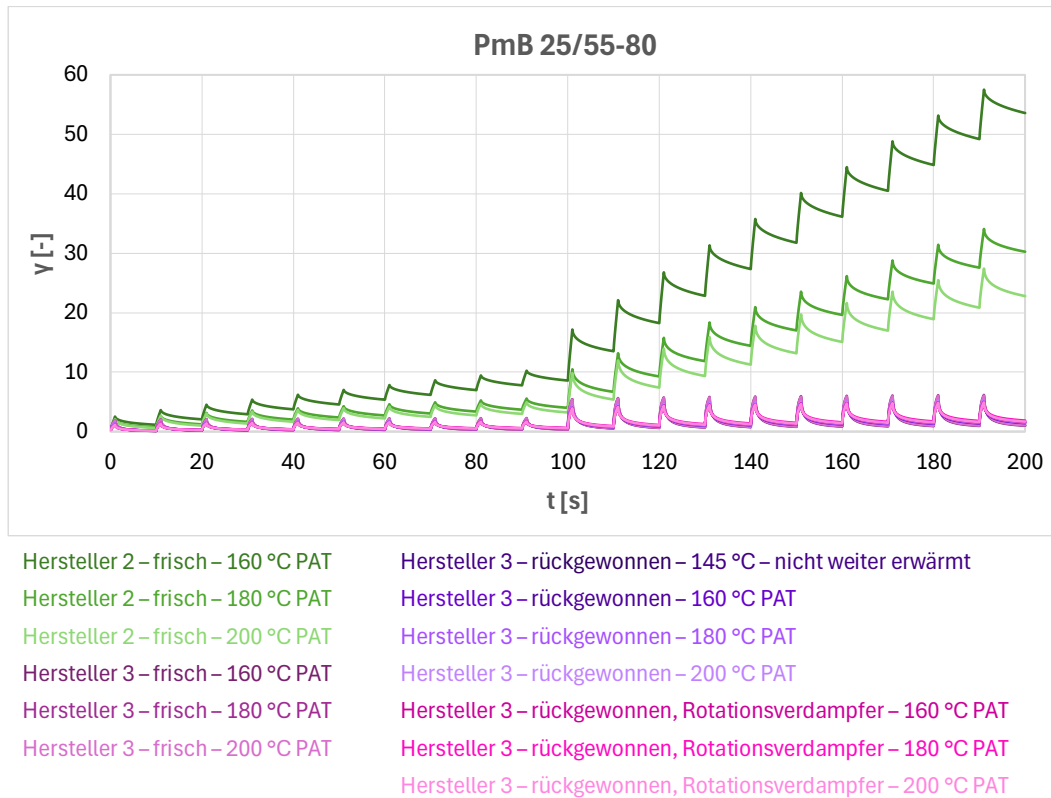


Abbildung 71: Kriech-Erholungskurven des PmB 25/55-80. γ = Scherdeformation; t = Zeit

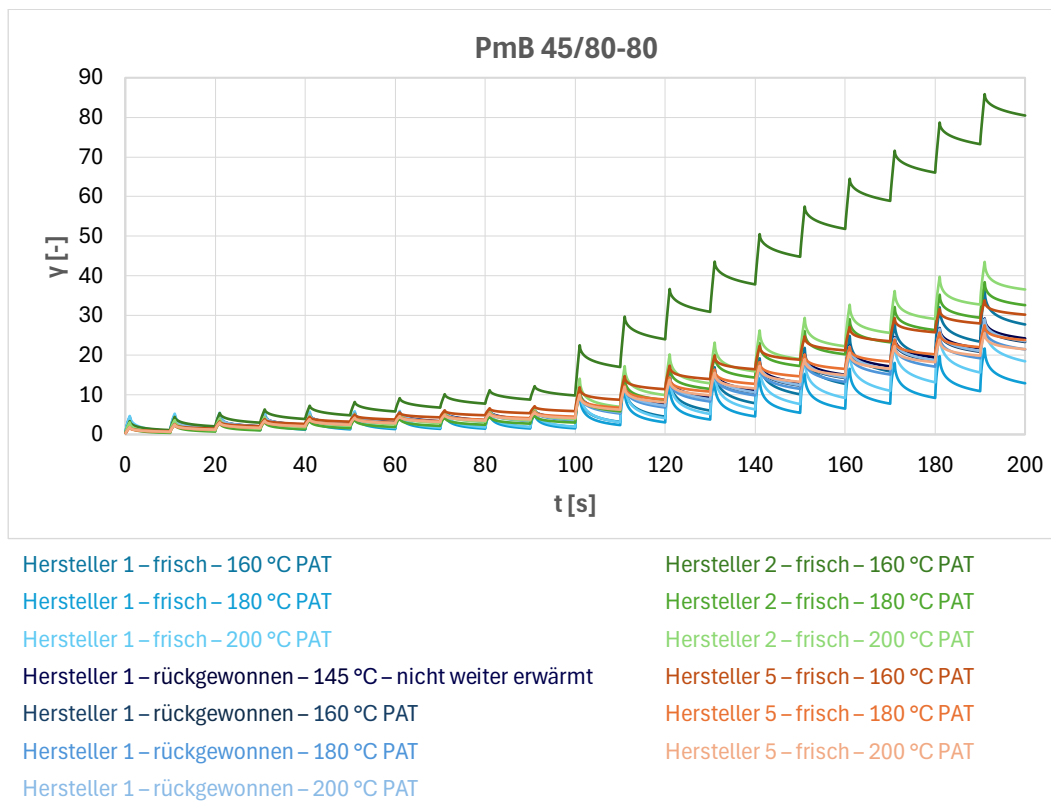


Abbildung 72: Kriech-Erholungskurven des PmB 45/80-80. γ = Scherdeformation; t = Zeit

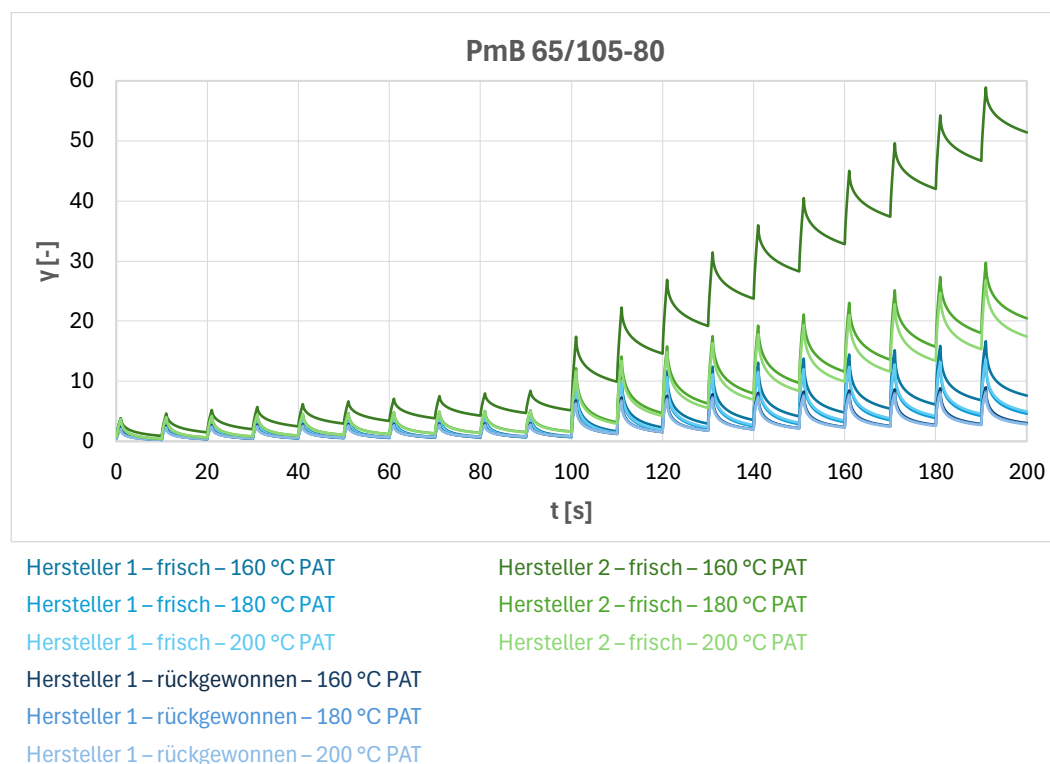


Abbildung 73: Kriech-Erholungskurven des PmB 65/105-80. γ = Scherdeformation; t = Zeit

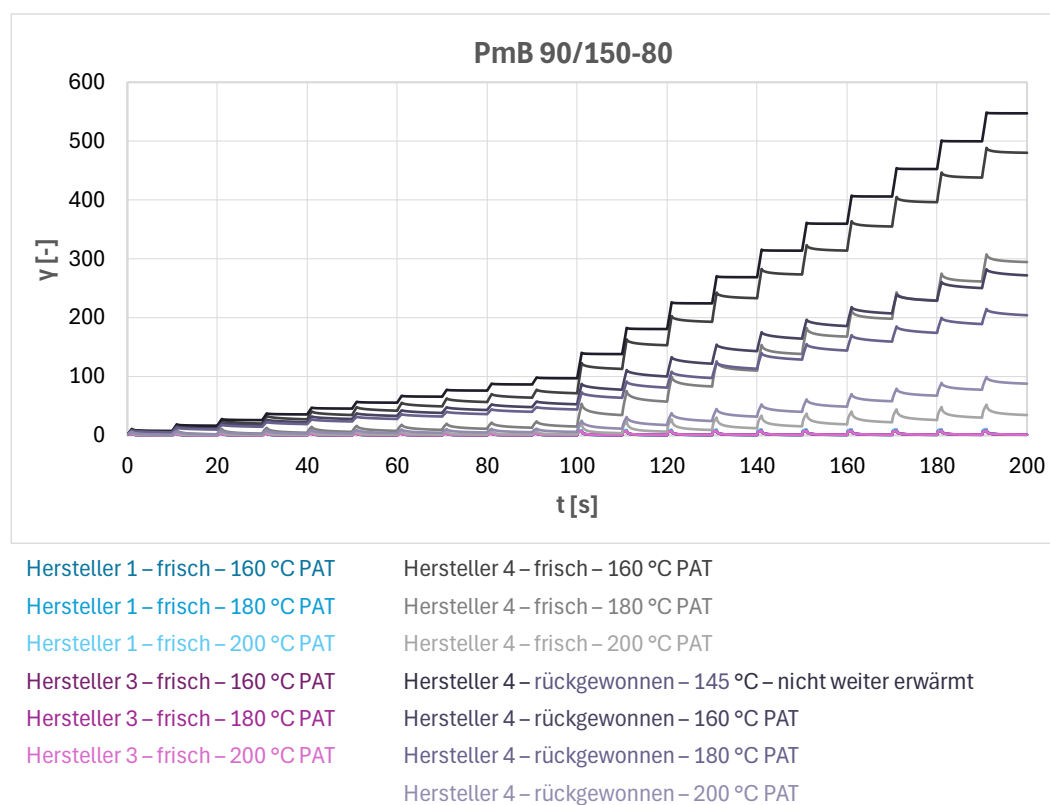


Abbildung 74: Kriech-Erholungskurven des PmB 90/150-80. γ = Scherdeformation; t = Zeit

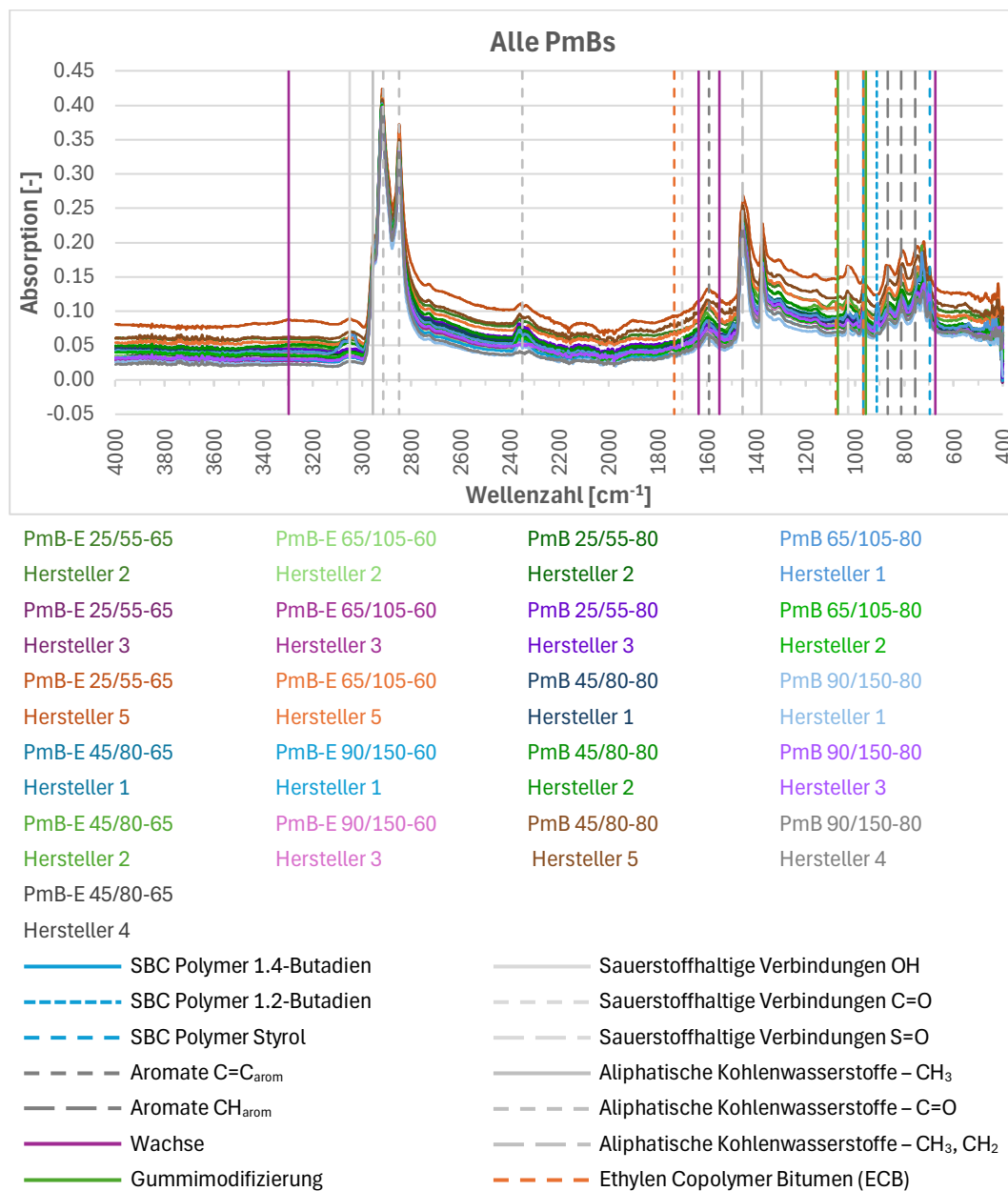


Abbildung 75: FTIR-Spektrogramme aller PmBs. Bitumenspezifische Peaks und Modifizierungen verändert nach [78] und [79]

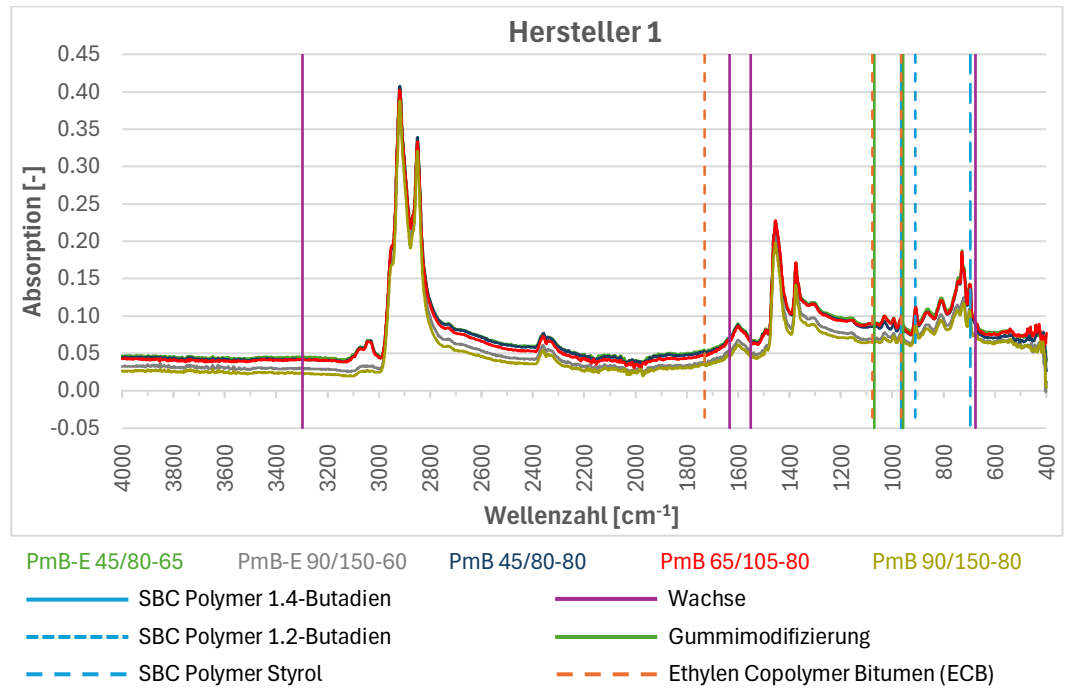


Abbildung 76: FTIR-Spektrogramme der PmBs von Hersteller 1. Modifizierungen verändert nach [79]

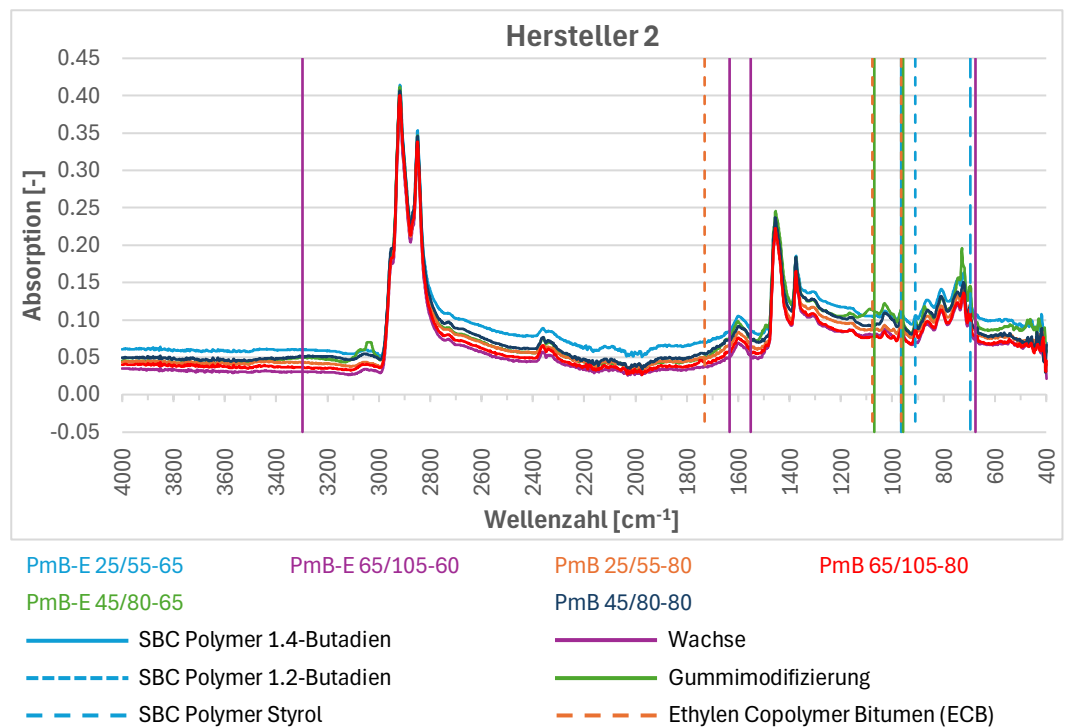


Abbildung 77: FTIR-Spektrogramme der PmBs von Hersteller 2. Modifizierungen verändert nach [79]

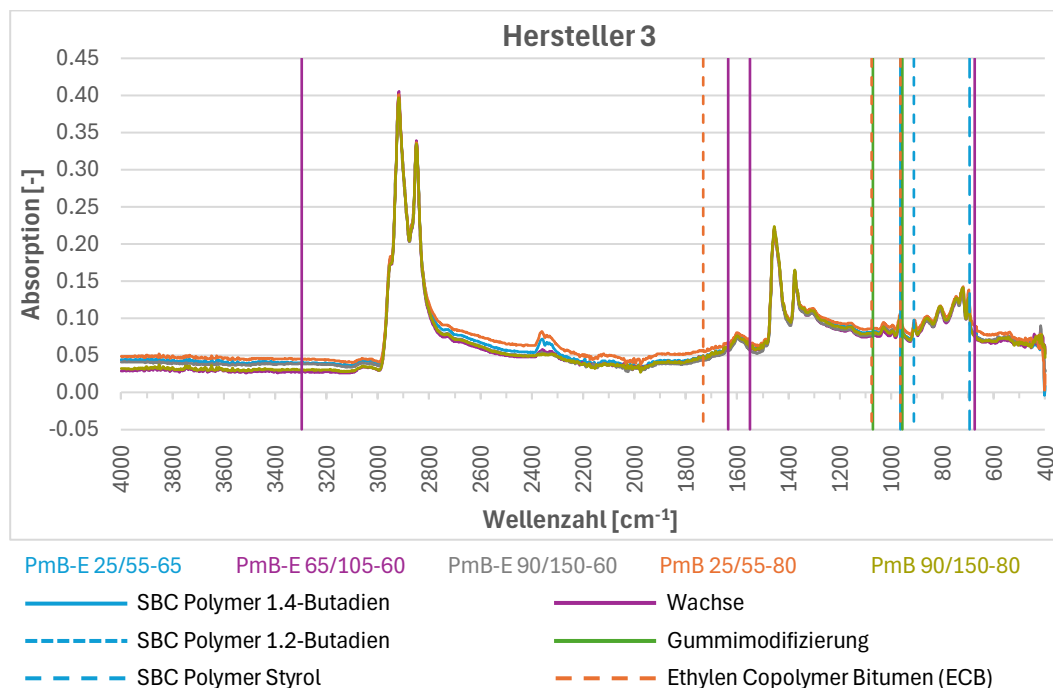


Abbildung 78: FTIR-Spektrogramme der PmBs von Hersteller 3. Modifizierungen verändert nach [79]

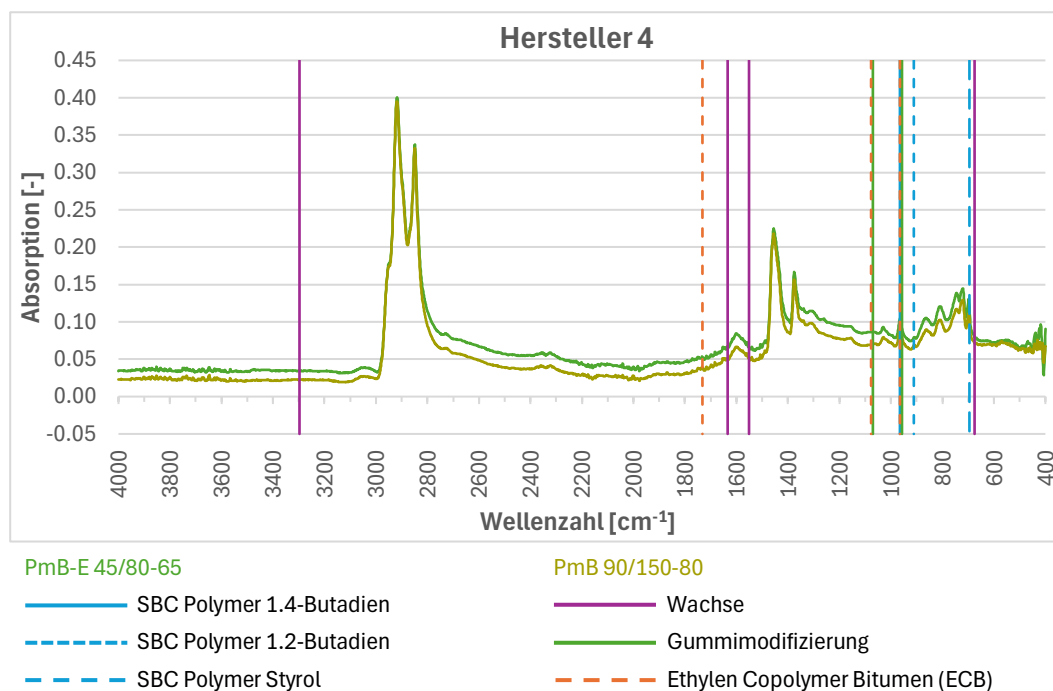


Abbildung 79: FTIR-Spektrogramme der PmBs von Hersteller 4. Modifizierungen verändert nach [79]

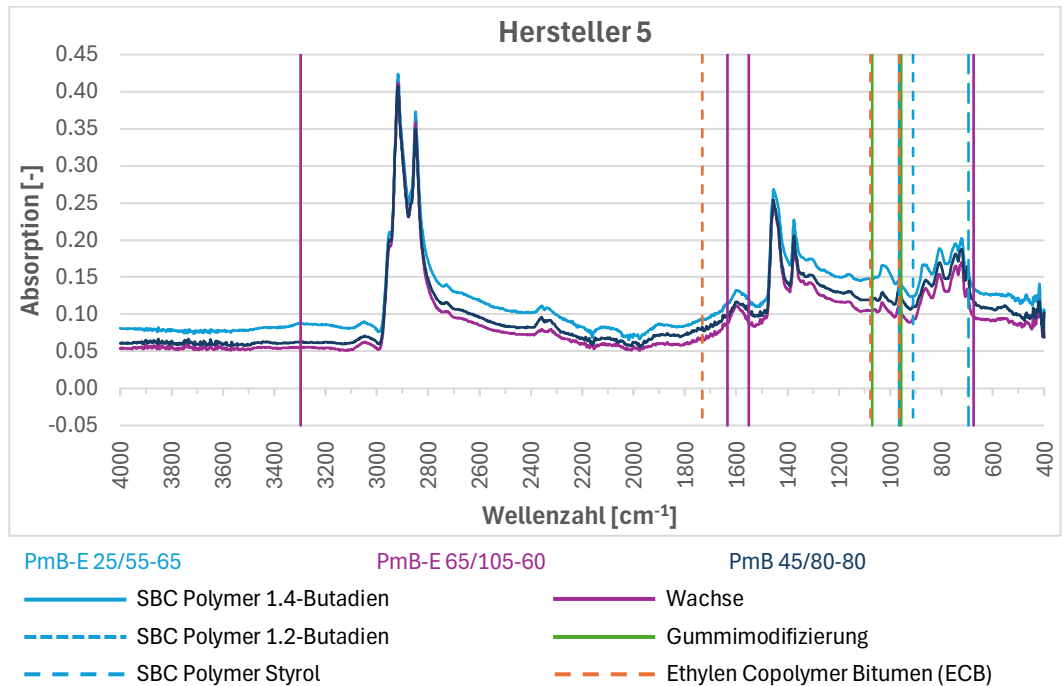


Abbildung 80: FTIR-Spektrogramme der PmBs von Hersteller 5. Modifizierungen verändert nach [79]

Übersicht über verwendete Polymere

Hersteller	Verwendete Polymere
1	SBS-Polymere Triblocks für NH-PmBs Diblocks für H-PmBs
2	SBS-Polymere
3	Quervernetzte (crosslinked) SB/SBS Copolymere
4	Lineare und radiale Polymere
5	Dynasol C411 mit 28,5-31,5 % Styrol im PmB-E 25/55-65 Rogitex R30-00A im PmB-E 65/105-60 Tecnofilm S9 mit 30-32 % Styrol im PmB 45/80-80

Tabelle 14: Übersicht über die Herstellerangaben über die in ihren PmBs verwendeten Polymere. Die Angaben des Styrol-Gehalts in den von Hersteller 5 benutzten Produkten stammt aus den vom Hersteller zur Verfügung gestellten Konformitätserklärungen

4.12 Vergleich einzelner Hersteller

Bei Hersteller 1 sind bei den ermittelten BKW keine grossen Unterschiede zwischen den Einzelwerten einer Prüfsreihe feststellbar. Die einzige Ausnahme ist das PmB-E 90/150-60, dessen Werte sich beim MSCR stärker von den Werten der anderen PmBs unterscheiden (Abbildung 81 und Abbildung 82). In dieser Prüfsreihe gab es bei 200 °C PAT nach dem Erwärmen Klümpchen und Verdickungen, aber der Wert an sich ist in Ordnung. Evtl. liegt es auch am PmB selbst, da es im Black-Diagramm eine sehr spezifische Kurve zeigt (Abbildung 83). Bei den höchsten gemessenen Einzelwerten einer Prüfsreihe gibt es bei keinem der ermittelten BKW Besonderheiten im Vergleich zum generellen Trend. Bei den Trendlinien vom R+K fallen die meisten von ab, generell

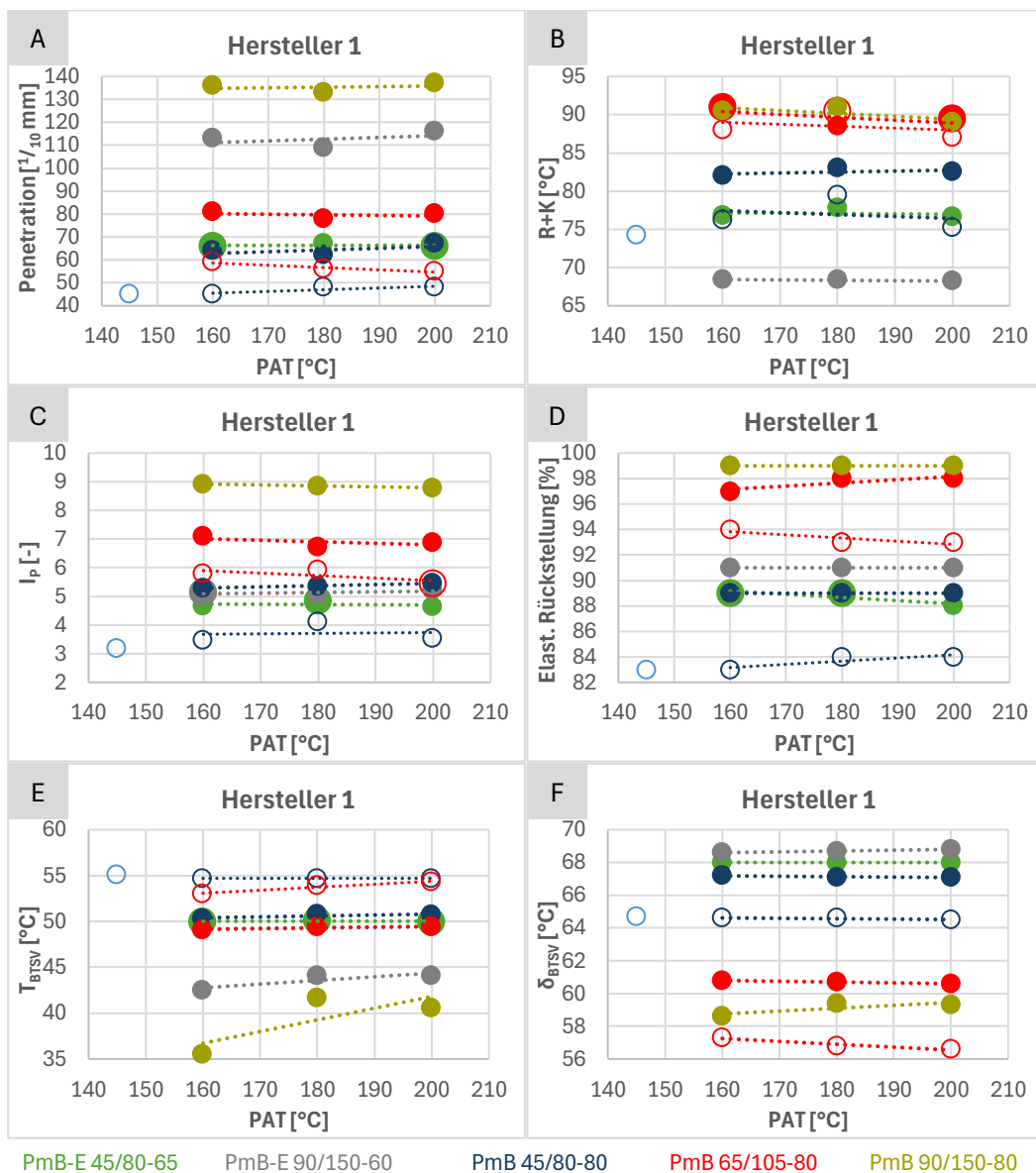


Abbildung 81: Die Ergebnisse der Penetration (A), des R+K (B), des I_p (C), der elastischen Rückstellung (D), des T_{BTSV} (E) und des δ_{BTSV} (F) der PmBs von Hersteller 1

steigen die meisten aber an. Die meisten Trendlinien der T_{BTSV} steigen an, obwohl generell kein Trend zu sehen ist (Abbildung 81). Im Black-Diagramm sieht man, dass die Kurve bei ca. 1.0 kPa ausgeprägter ist, je weicher und je höher modifiziert das PmB ist (Abbildung 83). Beim MSCR ist auffällig, dass fünf der sieben untersuchten Prüfserien, darunter fünf frische und zwei rückgewonnene PmBs, ihre höchsten Scherspannungen bei 160 °C haben (Abbildung 83).

Bei Hersteller 2 zeigen die Einzelwerte mancher Prüfserien grössere Unterschiede im Vergleich zu anderen. Bei der T_{BTSV} und dem δ_{BTSV} haben die meisten PmBs ihren höchsten gemessenen Einzelwert bei 160 °C PAT, obwohl es generell keinen Trend gibt.

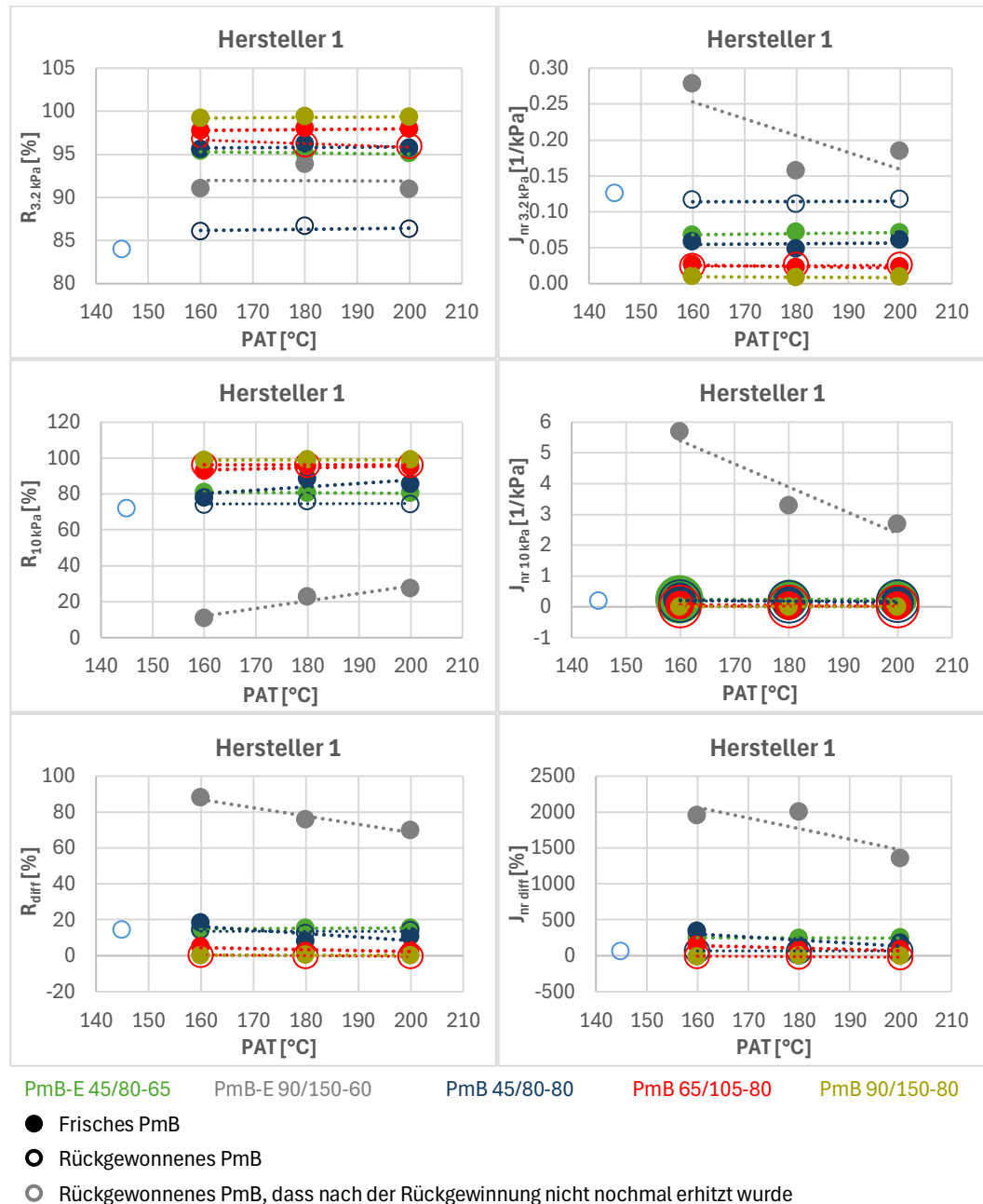


Abbildung 82: Die Ergebnisse der R (links) und der J_{nr} (rechts) der PmBs von Hersteller 1

Bei der $R_{3.2 \text{ kPa}}$ und der $R_{10 \text{ kPa}}$ haben die meisten PmBs ihren höchsten gemessenen Einzelwert bei 200 °C PAT, obwohl es auch hier keinen generellen Trend gibt. Bei den Trendlinien gibt es keine besonderen Auffälligkeiten im Vergleich zu den generellen Trends (Abbildung 84 und Abbildung 85). Bei den Black-Diagrammen zeigen die PmBs von Hersteller 2 einen speziellen Verlauf mit einem zusätzlichen Schwung (Abbildung 86). Beim MSCR ist auffällig, dass von acht der neun Prüferien sechs frische PmBs und drei rückgewonnene PmBs ihre höchsten Scherspannungen bei 160 °C haben (Abbildung 86).

Die R+K-Werte des PmB-E 90/150-60 von Hersteller 3 sind im Vergleich zu den anderen PmBs desselben Herstellers um einiges tiefer. Der Hersteller ist selbst von

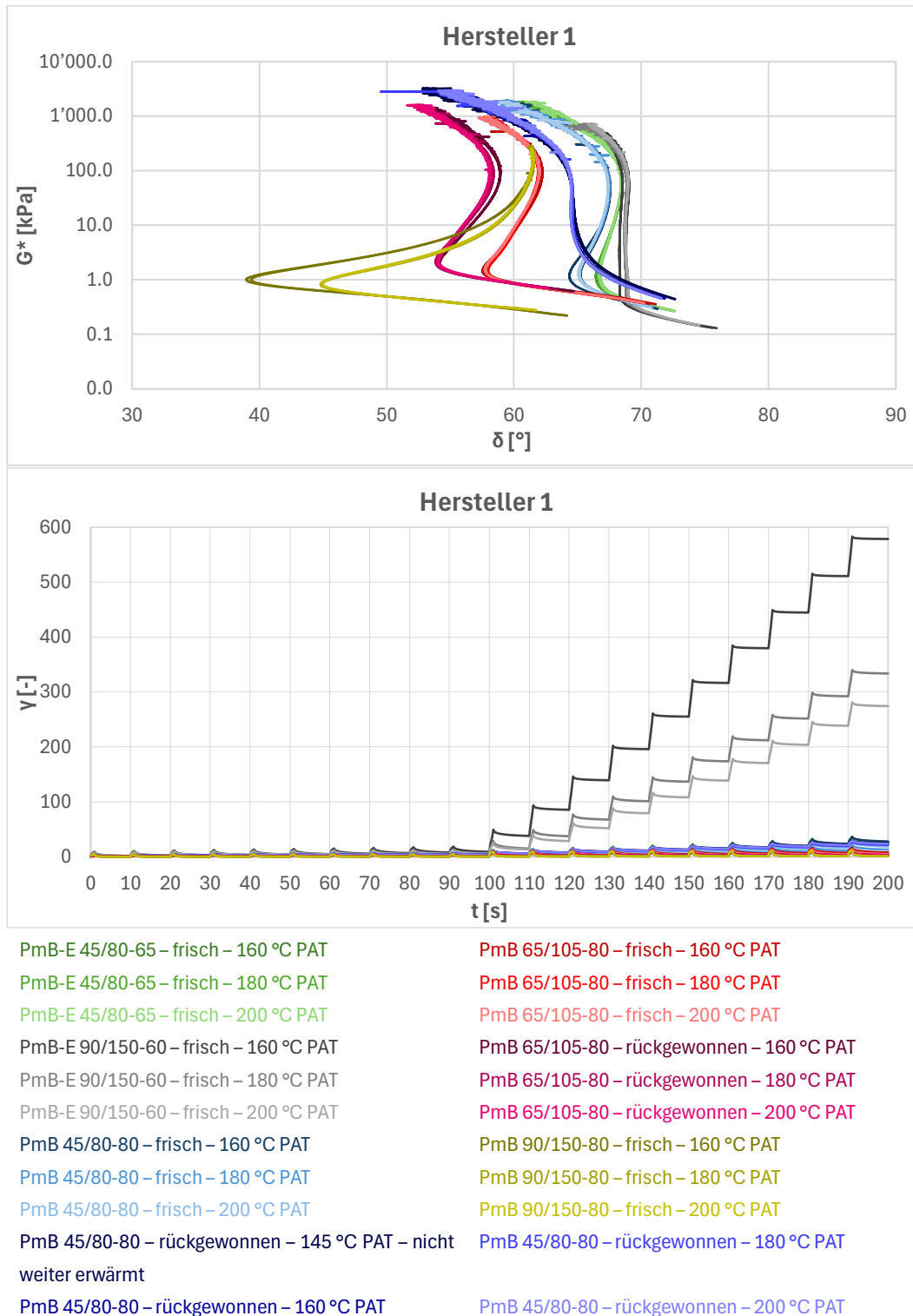


Abbildung 83: Black-Diagramme (oben) und Kriech-Erholungskurven (unten) der PmBs von Hersteller 1. G^* = komplexer Schermodul; γ = Scherdeformation; t = Zeit

diesem Ergebnis überrascht und hat keine Erklärung dafür. Beim PmB 65/105-60 gab es nach dem Erwärmen mit 180 °C PAT noch Klümpchen und Verdickungen, die Werte an sich sind aber in Ordnung. Bei den höchsten gemessenen Einzelwerten haben die meisten PmBs von Hersteller 3 ihren höchsten Einzelwert der $R_{3,2}$ kPa und der R_{10} kPa

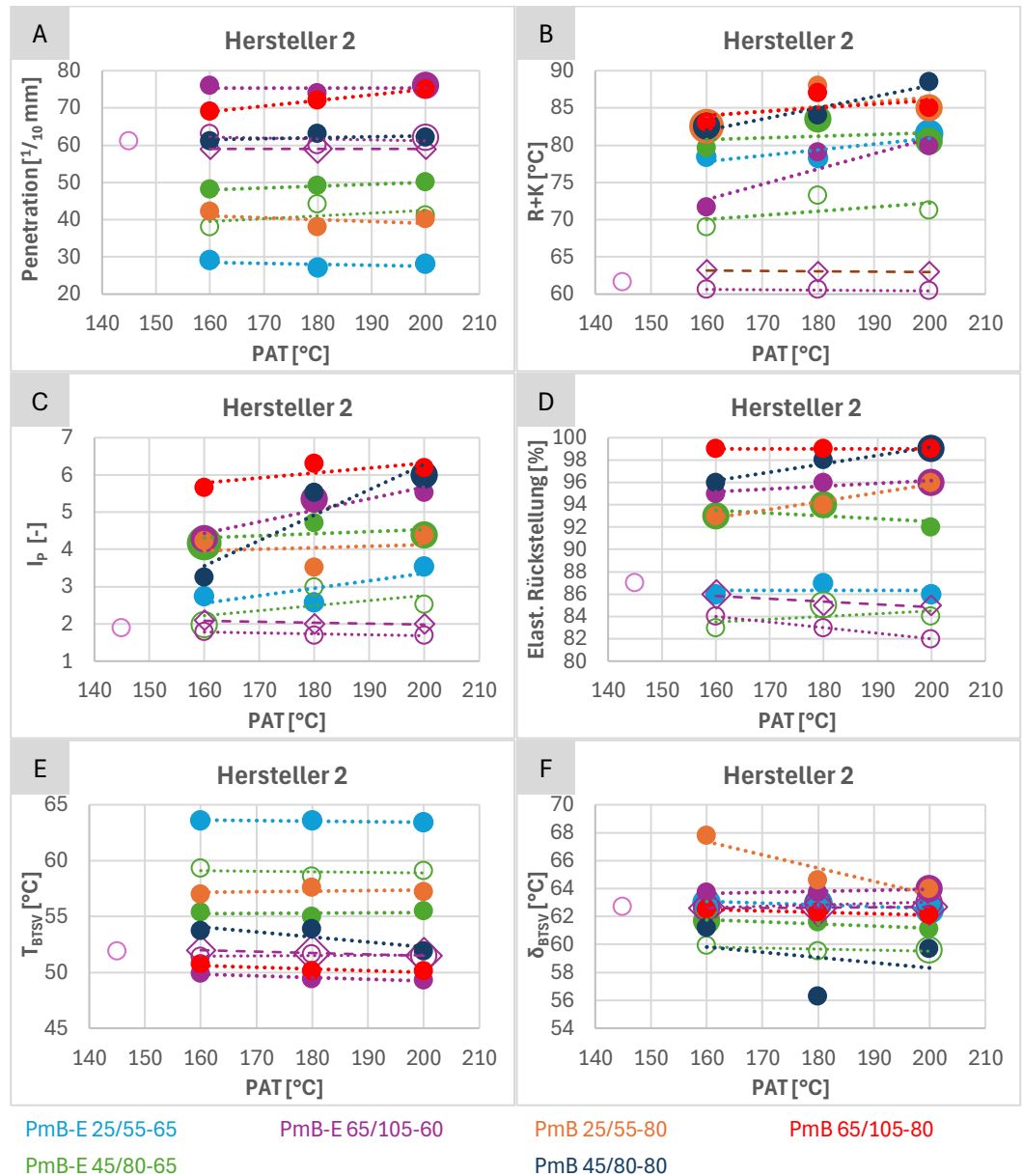


Abbildung 84: Die Ergebnisse der Penetration (A), des R+K (B), des I_p (C), der elastischen Rückstellung (D), des T_{BTSV} (E) und des δ_{BTSV} (F) der PmBs von Hersteller 2

bei 160 °C PAT, obwohl es generell keinen Trend gibt. Ebenfalls auffällig ist, dass die meisten PmBs ihren höchsten Einzelwert der R_{diff} bei 200 °C PAT haben, obwohl die meisten untersuchten PmBs ihren höchsten Einzelwert bei 160 °C PAT haben. Dasselbe sieht man auch bei der $J_{nr 3,2 \text{ kPa}}$ und der $J_{nr 10 \text{ kPa}}$, bei denen alle PmBs ihren höchsten Einzelwert bei 200 °C haben. Bei den Trendlinien lassen sich keine Unterschiede zu den generellen Trends beobachten (Abbildung 87 und Abbildung 88). Die Kurven in den Black-Diagrammen zeigen eine deutliche S-Form, die auf viele reaktive Polymere hindeutet (Abbildung 89). Bei den Kriech-Erholungskurven lässt sich kein

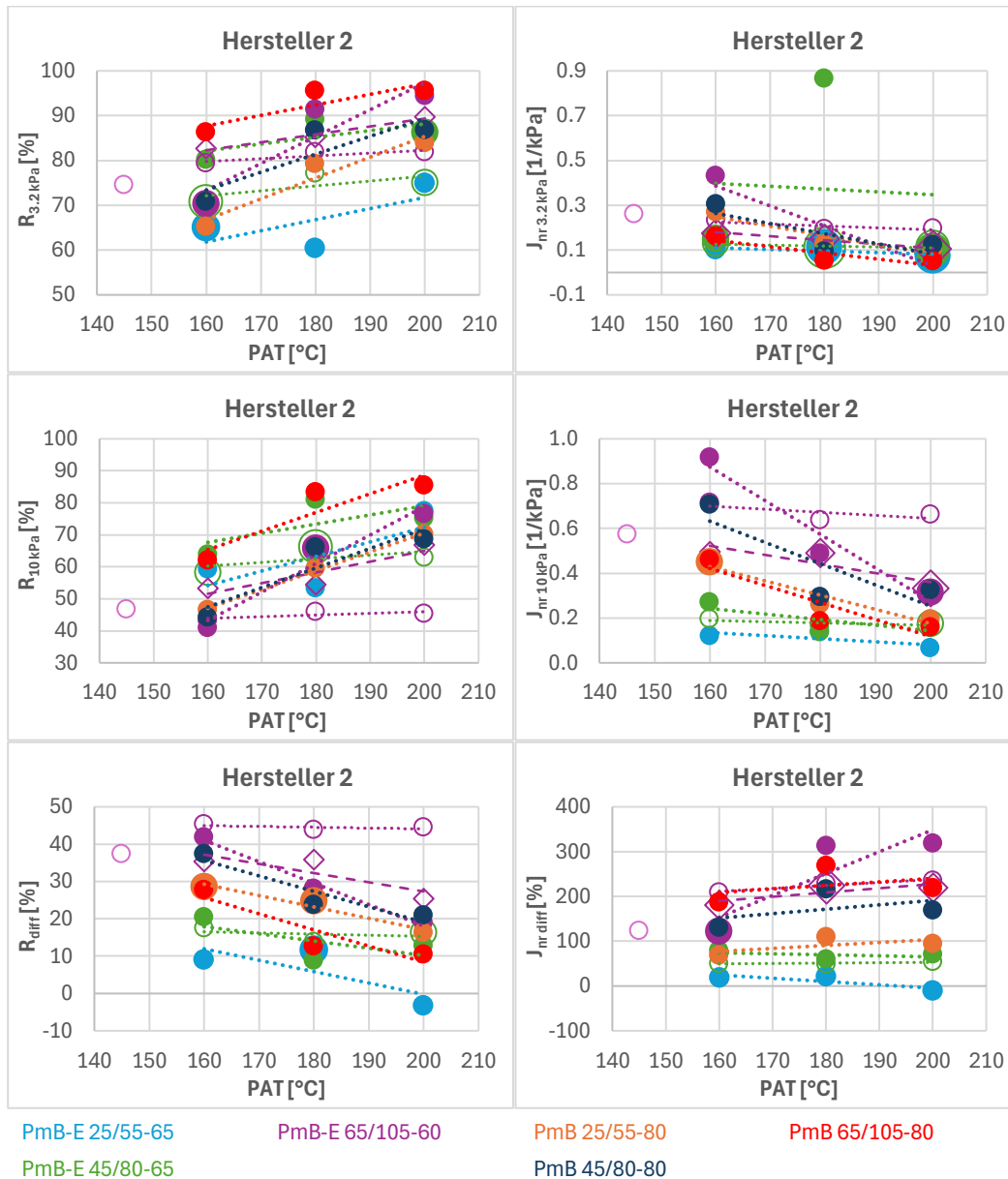


Abbildung 85: Die Ergebnisse der R (links) und der J_{nr} (rechts) der PmBs von Hersteller 2

eindeutiger Zusammenhang zwischen der PAT und der höchsten Scherspannung erkennen, es ist aber auffällig, dass die Kurven der drei PAT sehr nahe beieinander liegen (Abbildung 89).

Von Hersteller 4 wurden nur zwei PmBs mit insgesamt drei Prüfserien analysiert, was einen Vergleich mit den generellen Trends aufgrund der geringen Probengröße schwierig macht (Abbildung 90 und Abbildung 91). Beim PmB 90/150-80 bestanden beim Homogenisieren nach dem Erwärmen im Ofen Probleme. Das frische PmB enthielt nach 160 °C PAT noch Klümpchen und Verdickungen. Nach der Rückgewinnung

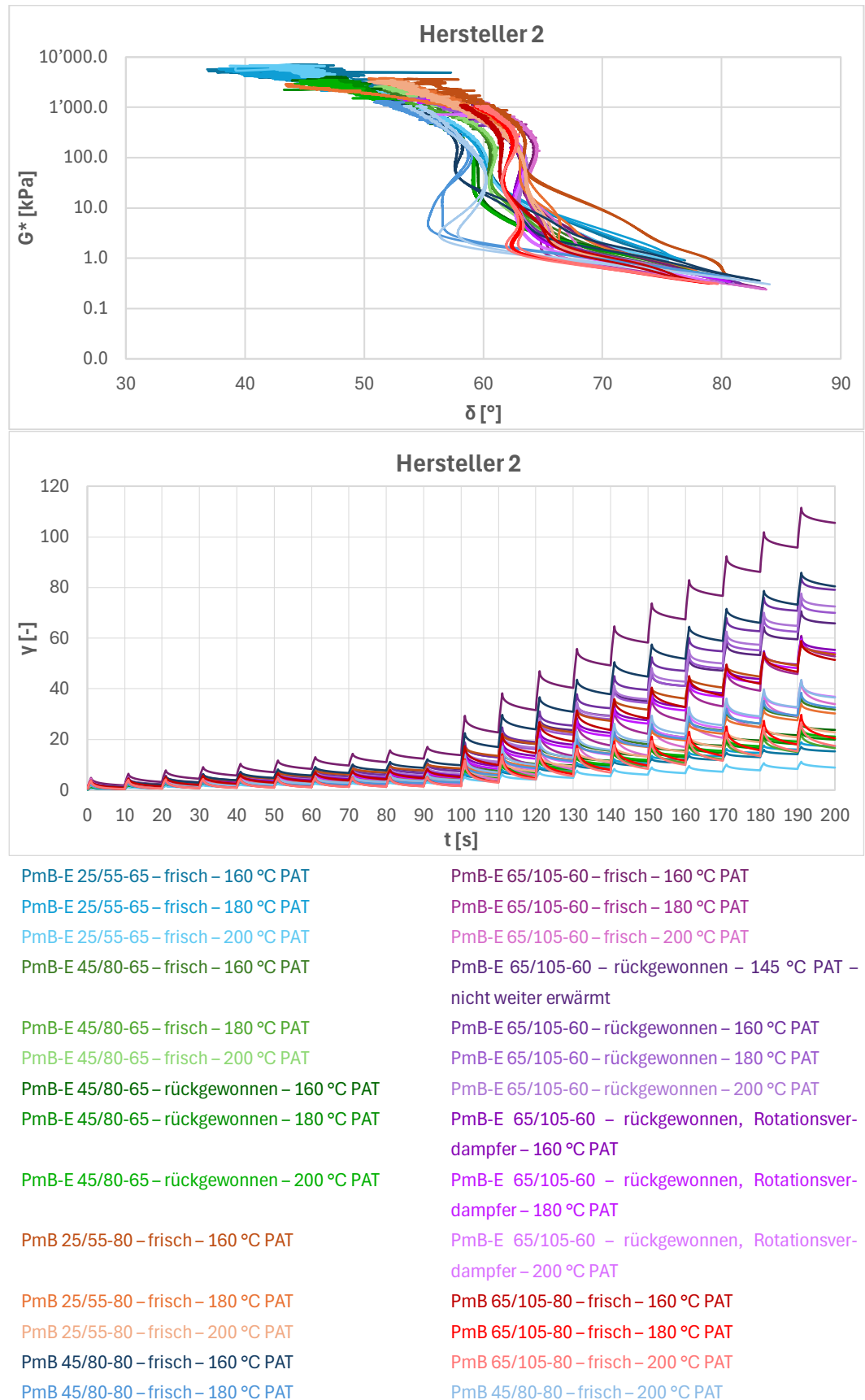


Abbildung 86: Black-Diagramme (oben) und Kriech-Erholungskurven (unten) der PmBs von Hersteller 2. G^* = komplexer Schermodul; γ = Scherdeformation; t = Zeit

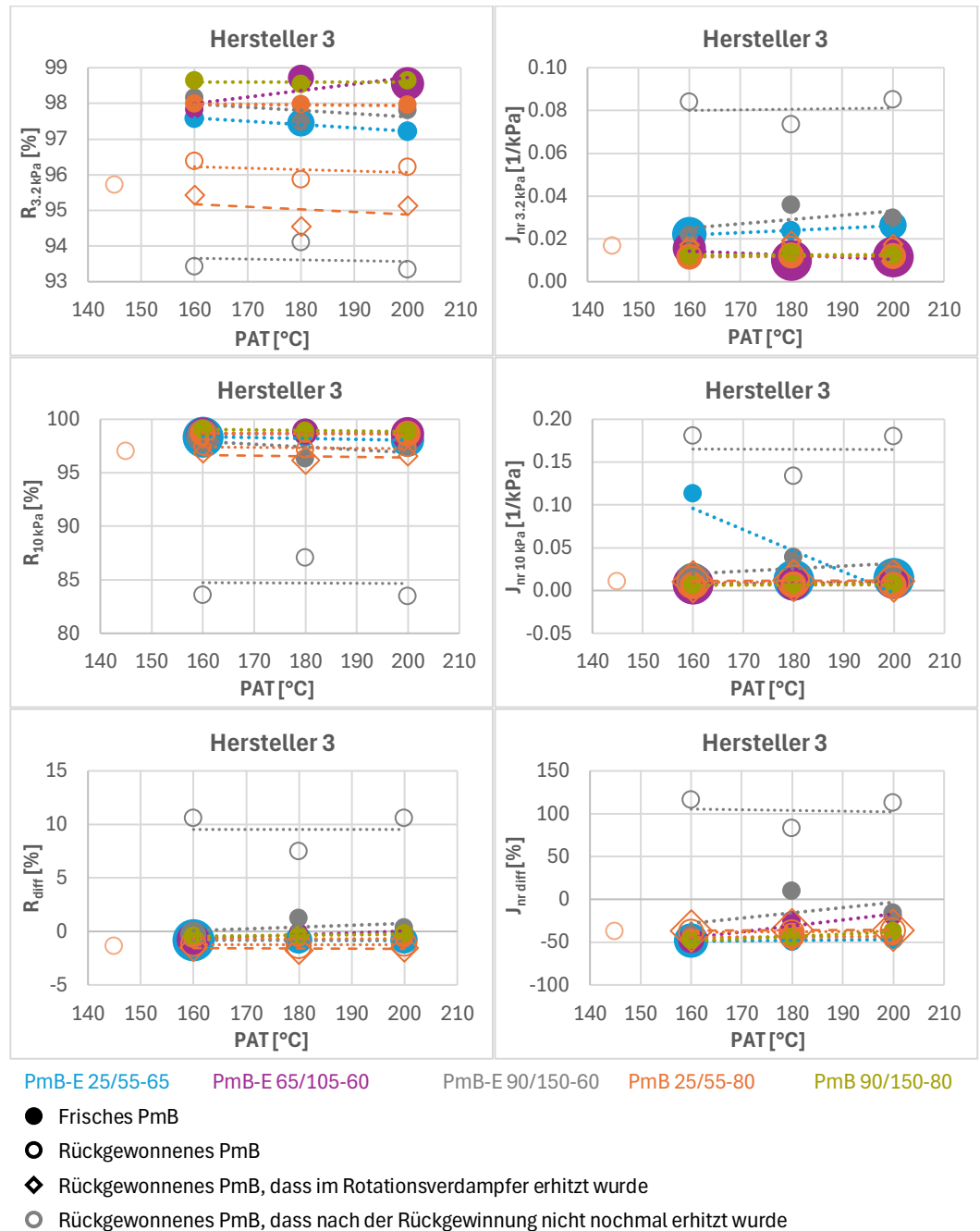


Abbildung 88: Die Ergebnisse der R (links) und der J_{nr} (rechts) der PmBs von Hersteller 3

Bei Hersteller 5 ist auffällig, dass die elastische Rückstellung des rückgewonnenen PmBs um einiges tiefer ist als bei den frischen PmBs. Bei anderen Herstellern ist dieser Unterschied nicht so gross wie bei Hersteller 5. Beim höchsten gemessenen Einzelwert und bei den Trendlinien lassen sich keine nennenswerten Unterschiede im Vergleich zu den allgemeinen Trends feststellen (Abbildung 93 und Abbildung 94). Im Black-Diagramm zeigen die Kurven ähnliche Verläufe. Nur das PmB 65/105-60 hat, ähnlich wie die PmBs von Hersteller 2, einen zusätzlichen Schwung in der Kurve (Abbildung 95). Bei den Kriech-Erholungskurven haben jeweils zwei Prüfserien die höchsten Scherspannungen bei 160 °C oder 180 °C PAT (Abbildung 95).

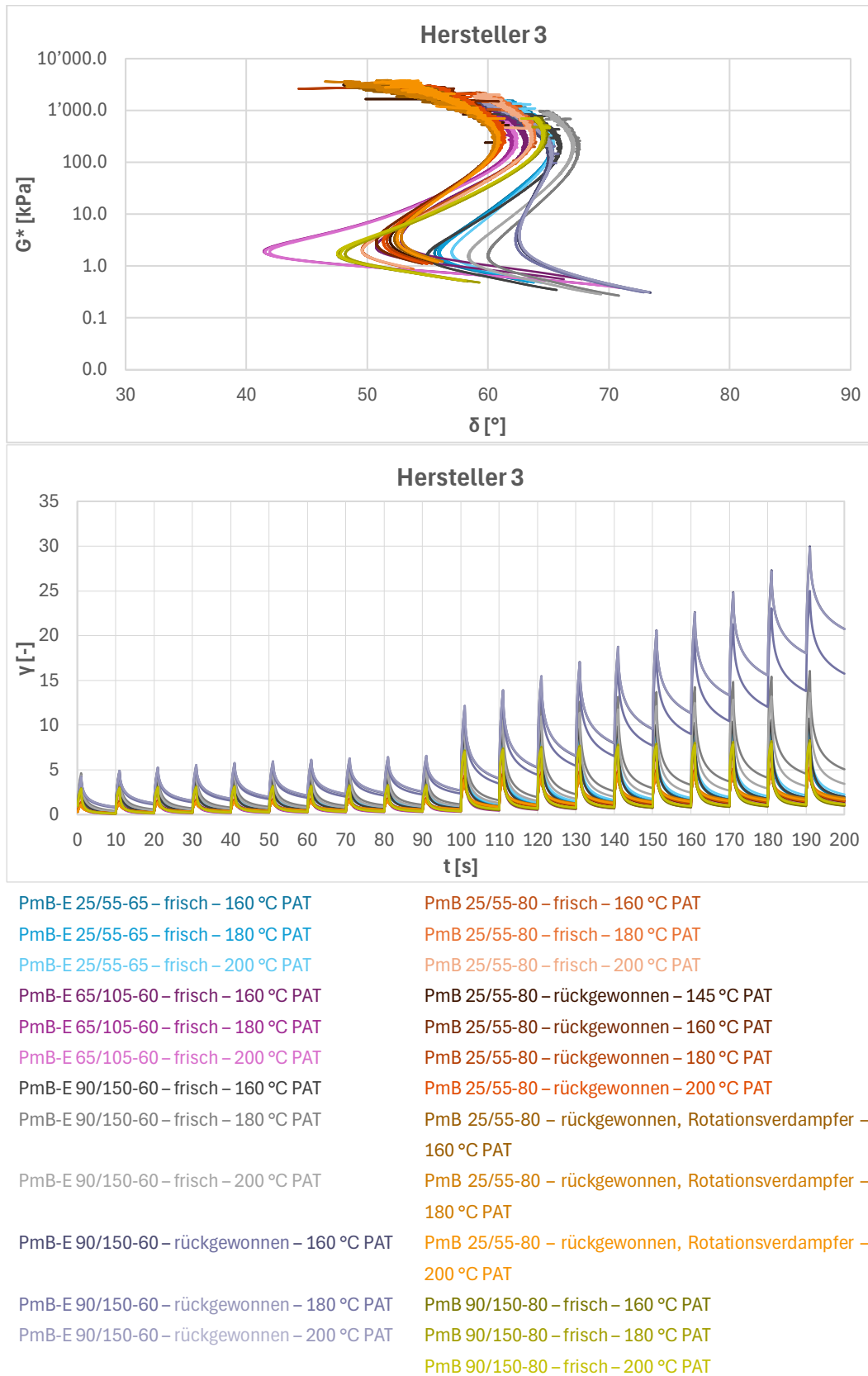


Abbildung 89: Black-Diagramme (oben) und Kriech-Erholungskurven (unten) der PmBs von Hersteller 3. G^* = komplexer Schermodul; γ = Scherdeformation; t = Zeit

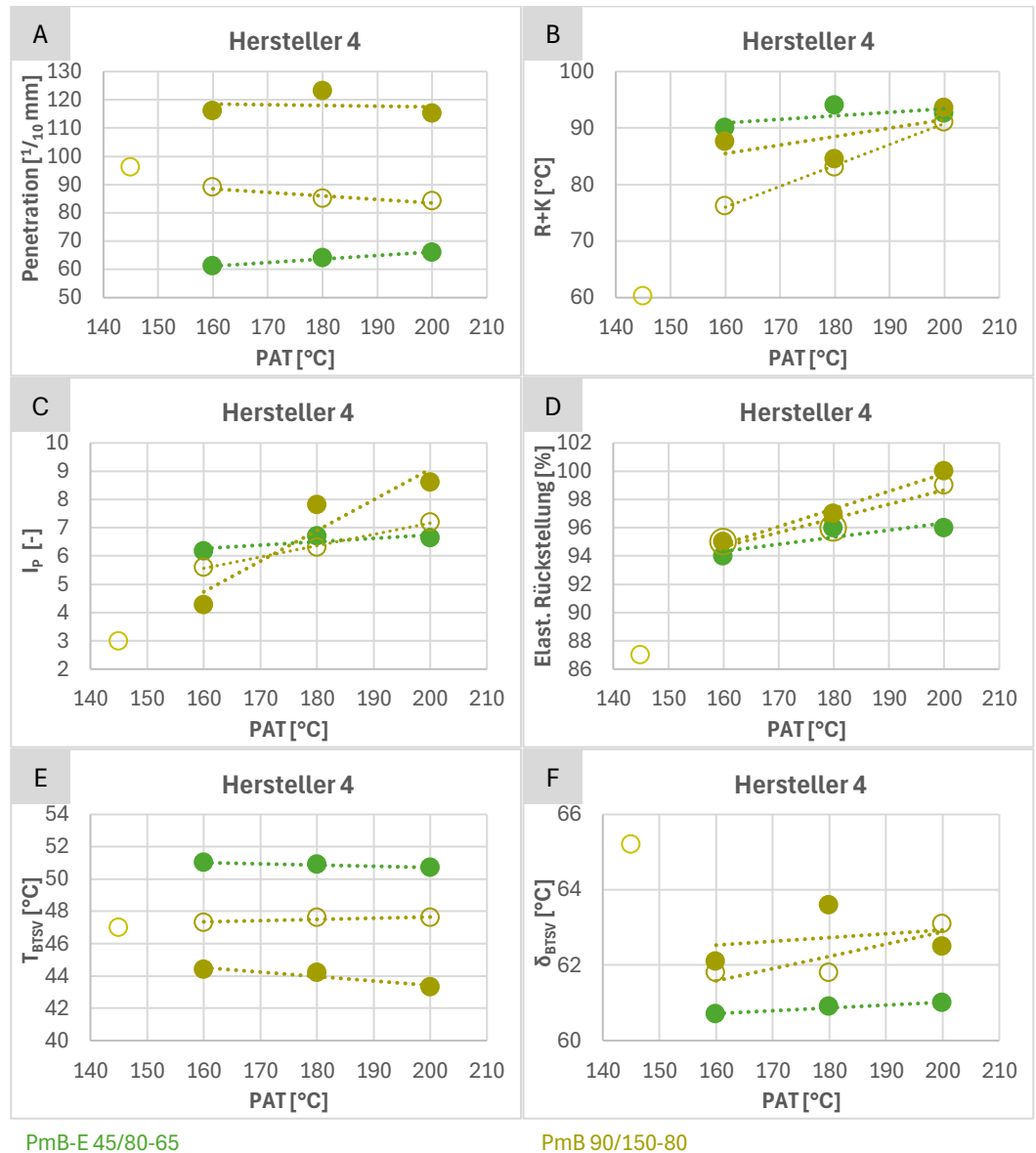
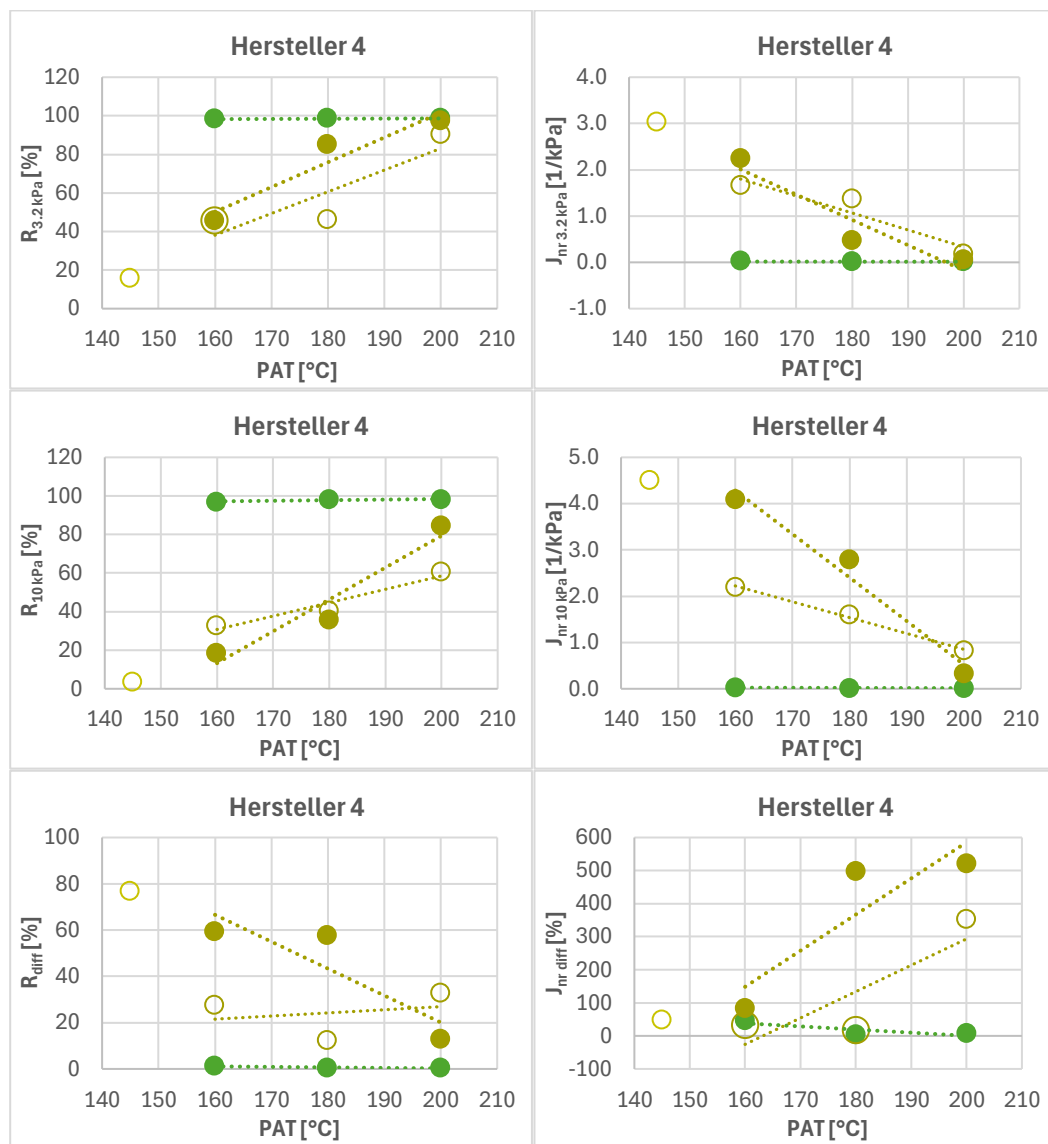


Abbildung 90: Die Ergebnisse der Penetration (A), des R+K (B), des I_p (C), der elastischen Rückstellung (D), des T_{BTSV} (E) und des δ_{BTSV} (F) der PmBs von Hersteller 4

Tabelle 15 zeigt die durchschnittlichen Steigungen der Trendlinien der einzelnen Hersteller für jeden ermittelten BKW. In den allermeisten Fällen unterscheiden sich diese Steigungen nur wenig von denen, die für alle ermittelten Werte berechnet wurden. Etwas grössere Unterschiede gibt es bei der $R_{3,2}$ kPa, der R_{10} kPa, der R_{diff} und der $J_{nr diff}$.

Tabelle 16 zeigt die durchschnittliche Differenz zwischen dem höchsten und dem tiefsten Einzelwert einer Prüfserie für jeden BKW und jeden Hersteller, im Vergleich zu den durchschnittlichen maximalen Differenzen, die mit allen Werten ermittelt wurden. Es wird deutlich, dass es Unterschiede zwischen den einzelnen Herstellern gibt, was die Streuung der Werte angeht.



PmB-E 45/80-65

PmB 90/150-80

● Frisches PmB

○ Rückgewonnenes PmB

◐ Rückgewonnenes PmB, dass nach der Rückgewinnung nicht nochmal erhitzt wurde

Abbildung 91: Die Ergebnisse der R (links) und der J_{nr} (rechts) der PmBs von Hersteller 4

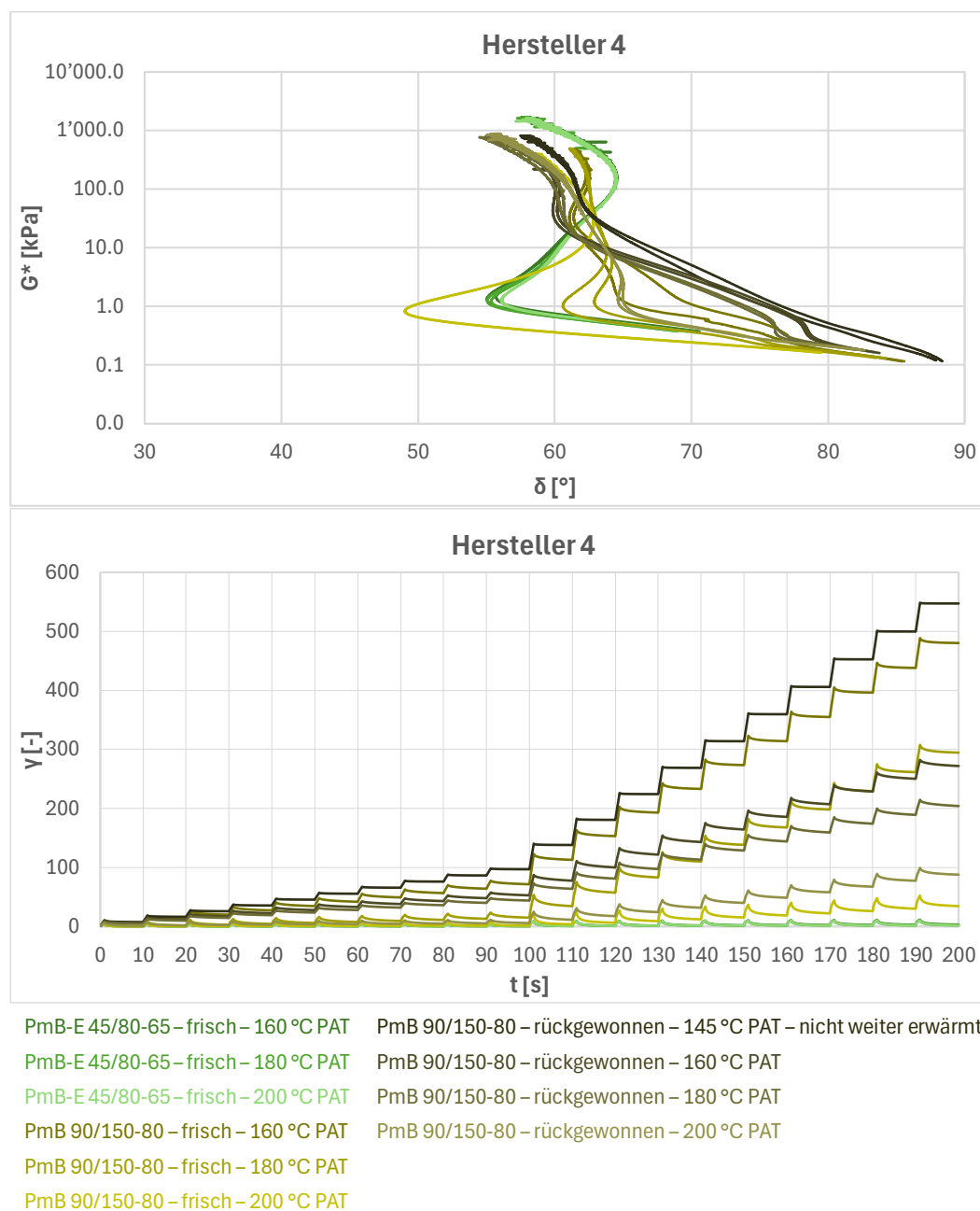


Abbildung 92: Black-Diagramme (oben) und Kriech-Erholungskurven (unten) der PmBs von Hersteller 4. G^* = komplexer Schermodul; γ = Scherdeformation; t = Zeit

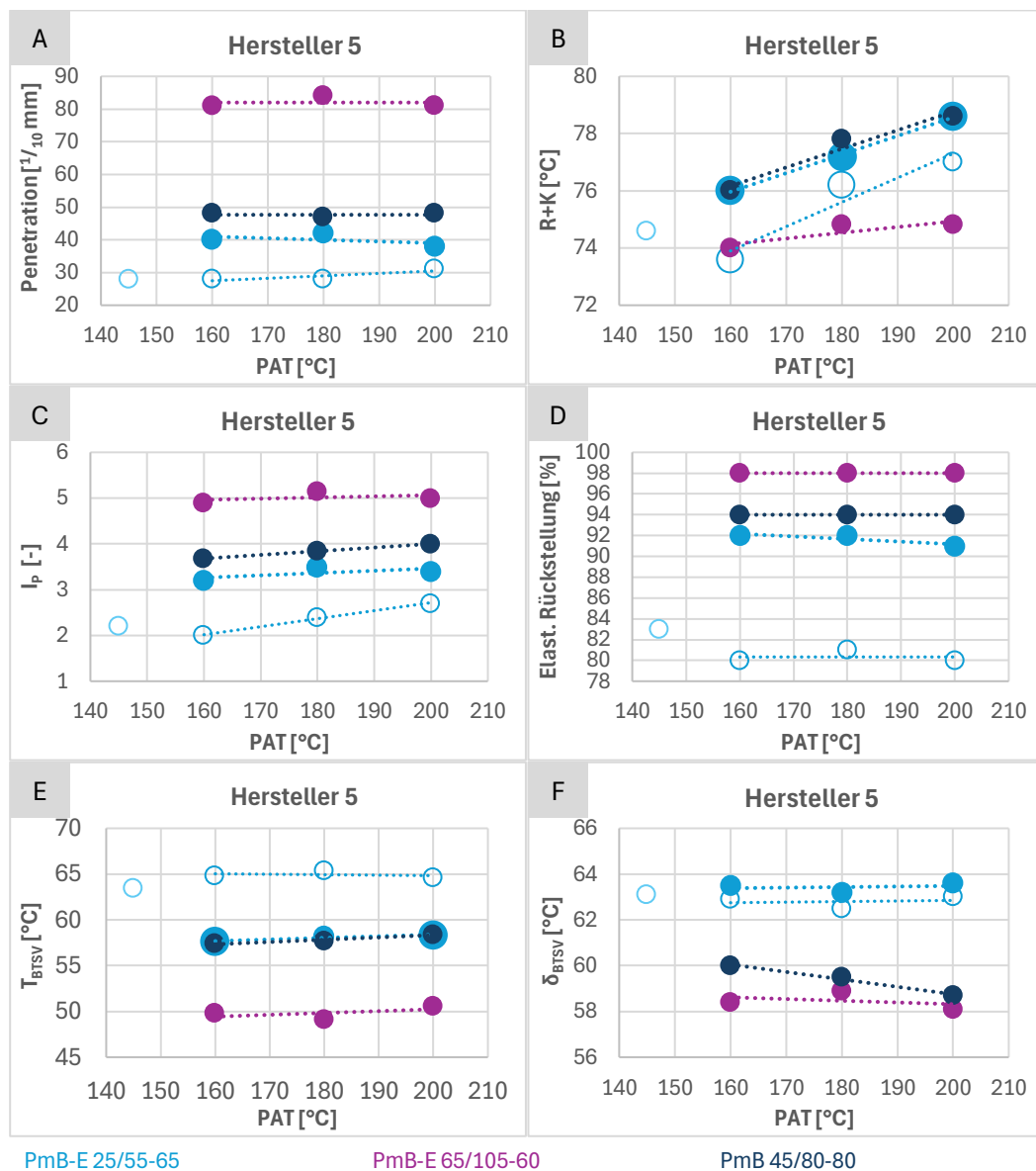


Abbildung 93: Die Ergebnisse der Penetration (A), des R+K (B), des I_p (C), der elastischen Rückstellung (D), des T_{BTSV} (E) und des δ_{BTSV} (F) der PmBs von Hersteller 4

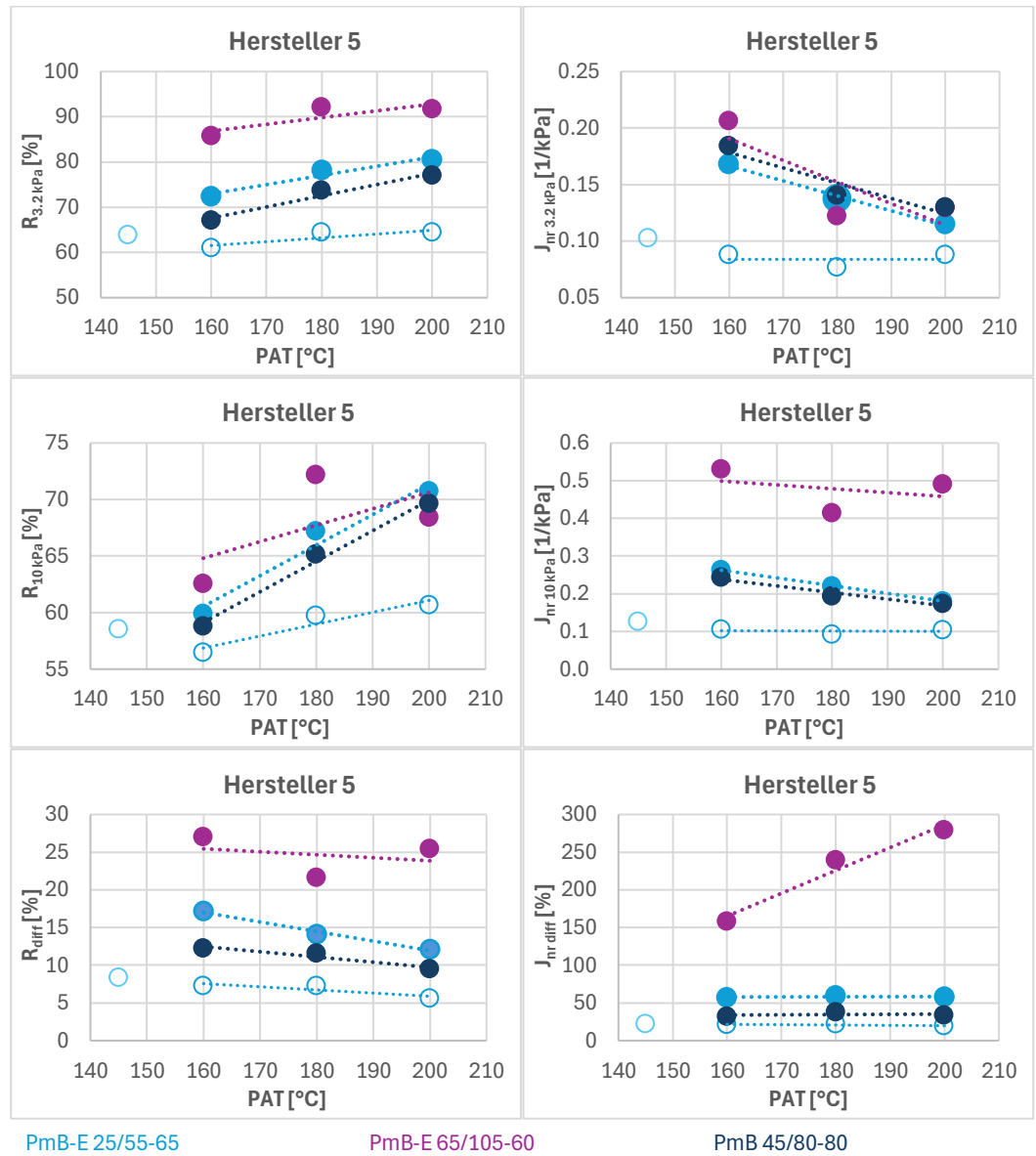


Abbildung 94: Die Ergebnisse der R (links) und der J_{nr} (rechts) der PmBs von Hersteller 5

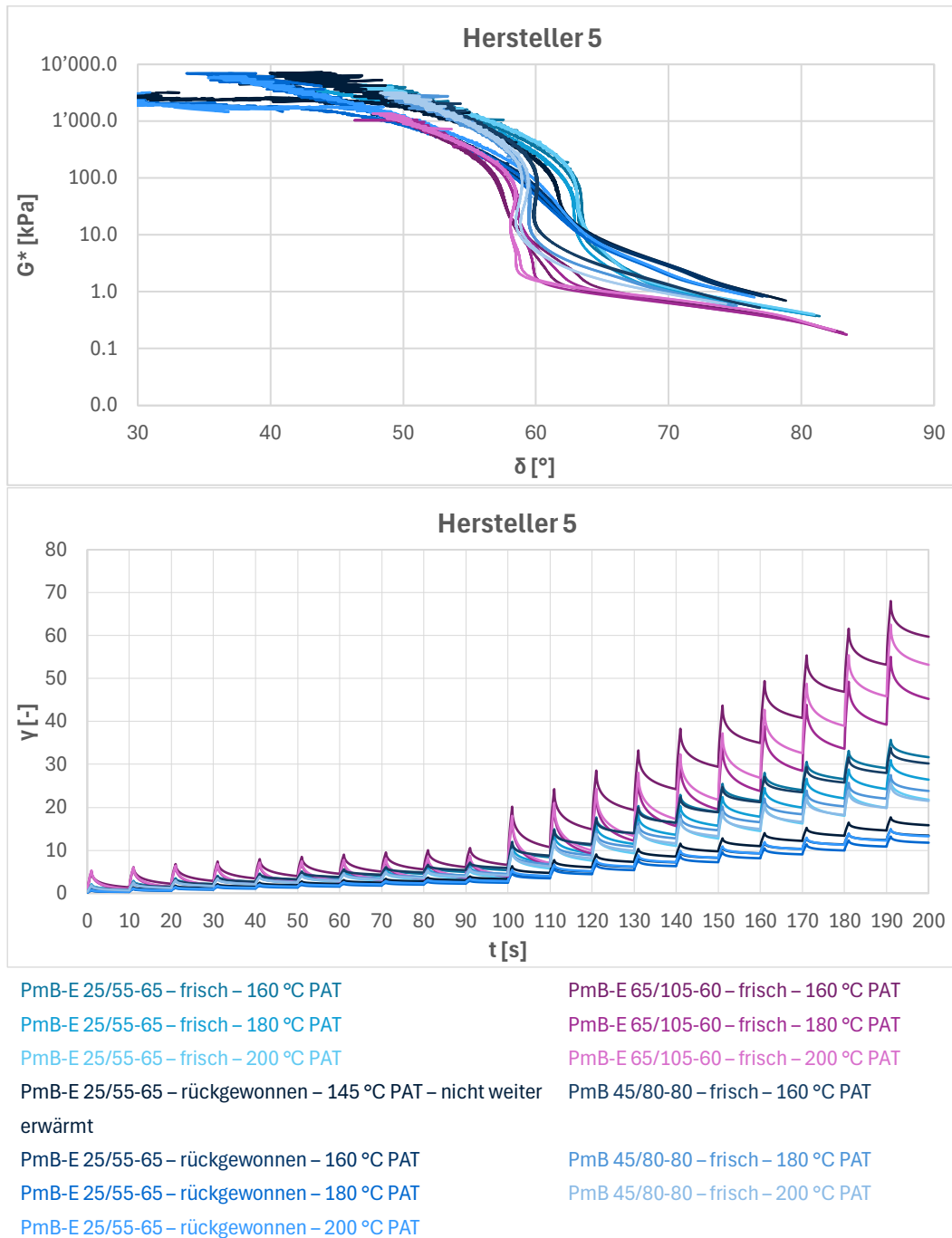


Abbildung 95: Black-Diagramme (oben) und Kriech-Erholungskurven (unten) der PmBs von Hersteller 5. G^* = komplexer Schermodul; γ = Scherdeformation; t = Zeit

Übersicht über die durchschnittliche Steigung der Trendlinien einzelner Hersteller

BKW [Einheit der Stei- gung]	Hersteller Frisch (Rückgewonnen)					Alle Werte
	Hersteller 1	Hersteller 2	Hersteller 3	Hersteller 4	Hersteller 5	
	5 (2)	6 (2+1x Rot.)	5 (2+1x Rot.)	2 (1)	3 (1)	
Penetration [mm/10 °C]	0.04 (-0.01)	0.03 (0.03)	0.25 (0.02)	0.05 (-0.13)	-0.05 (0.08)	0.08 (-)
R+K [-]	-0.01 (-0.03)	0.09 (0.02)	0.02 (0.02)	0.11 (0.37)	0.05 (0.09)	0.05 (0.05)
I _P [1/°C]	- (-0.01)	0.02 (-)	0.01 (-)	0.06 (0.04)	- (0.02)	0.01 (0.01)
Elast. Rückst. [%/°C]	- (-)	0.04 (-0.02)	-0.01 (-)	0.09 (0.10)	-0.03 (-)	0.03 (0.01)
T _{BTSV} [-]	0.05 (0.02)	-0.01 (-)	-0.03 (-)	-0.02 (0.01)	0.02 (-0.01)	- (0.01)
δ _{BTSV} [°/°C]	- (-0.01)	-0.03 (-)	0.01 (-)	0.01 (0.03)	-0.01 (-)	-0.01 (-)
R _{3.2 kPa} [%/°C]	- (-0.01)	0.35 (0.12)	- (-)	0.65 (1.12)	0.20 (0.08)	0.20 (0.15)
R _{10 kPa} [%/°C]	0.13 (-)	0.57 (0.17)	-0.01 (-)	0.84 (0.69)	0.23 (0.11)	0.30 (0.13)
R _{diff} [%/°C]	-0.14 (-0.01)	-0.37 (-0.10)	0.01 (-)	-0.59 (0.14)	-0.08 (-0.04)	-0.20 (-0.02)
J _{nr 3.2 kPa} [1/kPa °C]	- (-)	- (-)	- (-)	-0.03 (-0.04)	- (-)	- (-)
J _{nr 10 kPa} [1/kPa °C]	-0.02 (-)	-0.01 (-)	- (-)	-0.05 (-0.03)	- (-)	-0.01 (-)
J _{nr diff} [%/°C]	-4.15 (-0.20)	1.06 (0.56)	0.35 (-0.01)	4.99 (7.98)	1.03 (-0.05)	0.02 (0.92)

Tabelle 15: Übersicht über die durchschnittlichen Steigungen der Trendlinien der einzelnen Hersteller im Vergleich zu allen Werten. Die Steigungen der frischen PmBs haben keine Klammern, die Steigungen der rückgewonnenen PmBs stehen in Klammern. Die Zahlen unter den Hersteller geben an, wie viele frische bzw. rückgewonnene PmBs (in Klammern) des jeweiligen Herstellers geprüft wurden. Rot. = rückgewonnene PmBs die im Rotationsverdampfer und nicht im Ofen erhitzt wurden

Übersicht über die durchschnittliche Differenz zwischen dem höchsten und tiefsten Einzelwert einer Prüfsérie einzelner Hersteller

BKW	Hersteller Frisch (Rückgewonnen)					Alle Werte
	Hersteller 1	Hersteller 2	Hersteller 3	Hersteller 4	Hersteller 5	
	5 (2)	6 (2+1x Rot.)	5 (2+1x Rot.)	2 (1)	3 (1)	
Penetration [1/10 °C]	4.00 (3.50)	3.00 (3.00)	7.00 (2.00)	6.50 (5.00)	2.67 (3.00)	4.67 (3.00)
R+K [°C]	1.38 (3.85)	5.15 (1.53)	1.93 (2.03)	6.50 (14.80)	2.00 (3.40)	3.19 (3.66)
I _p [-]	0.22 (0.50)	1.15 (0.40)	0.42 (0.33)	2.40 (1.60)	0.27 (0.70)	0.75 (0.55)
Elast. Rückst. [%]	0.40 (1.00)	1.67 (1.67)	1.83 (1.33)	3.50 (4.00)	0.33 (1.00)	1.38 (1.60)
T _{BTSV} [°C]	1.74 (0.65)	0.75 (0.47)	1.07 (0.40)	0.70 (0.30)	1.07 (0.80)	1.12 (0.50)
δ _{BTSV} [°]	0.26 (0.40)	1.75 (0.30)	1.03 (0.13)	0.90 (1.30)	0.83 (0.50)	1.06 (0.39)
R _{3,2 kPa} [%]	0.86 (0.73)	15.26 (5.33)	0.49 (0.72)	25.94 (44.99)	8.12 (3.47)	8.29 (6.81)
R _{10 kPa} [%]	6.15 (0.99)	24.71 (8.05)	0.62 (1.51)	33.72 (27.76)	10.41 (4.21)	13.37 (6.26)
R _{diff} [%]	6.35 (1.25)	15.90 (5.23)	0.47 (1.19)	23.75 (20.52)	4.41 (1.67)	9.07 (4.40)
J _{nr 3,2 kPa} [1/kPa]	0.03 (< 0.01)	0.28 (0.04)	< 0.01 (0.01)	1.09 (1.47)	0.06 (0.01)	0.20 (0.16)
J _{nr 10 kPa} [1/kPa]	0.64 (0.01)	0.30 (0.09)	0.02 (0.02)	1.89 (1.37)	0.09 (0.01)	0.44 (0.17)
J _{nr diff} [%]	191.44 (12.24)	76.02 (24.47)	15.70 (12.27)	239.25 (335.09)	43.21 (2.96)	100.67 (47.27)

Tabelle 16: Übersicht über die durchschnittliche Differenz zwischen dem höchsten und tiefsten Einzelwert einer Prüfsérie der einzelnen Hersteller im Vergleich zu allen Werten. Die maximalen Differenzen der frischen PmBs haben keine Klammern, die maximalen Differenzen der rückgewonnenen PmBs stehen in Klammern. Die Zahlen unter den Herstellern geben an, wie viele frische bzw. rückgewonnene PmBs (in Klammern) des jeweiligen Herstellers geprüft wurden. Rot. = rückgewonnene PmBs die im Rotationsverdampfer und nicht im Ofen erhitzt wurden

4.13 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die oben beschriebenen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- **Anlieferungszustand:** Die angelieferten PmBs waren in Ordnung. Ihre Oberflächenbeschaffenheit korreliert nicht mit dem Erfüllen oder Nichterfüllen der Anforderungen.

- Aufschmelzen und Homogenisieren: Nicht alle PmBs lassen sich bei allen drei PAT restlos aufschmelzen.
- Vergleich zwischen den im Ofen und den im Rotationsverdampfer erwärmten, rückgewonnenen PmBs: Es konnte kein wesentlicher Unterschied zwischen den Prüfserien festgestellt werden.
- Vergleich mit nach der Rückgewinnung nicht erwärmten Proben: Bei manchen PmBs konnte die Probe, die nach der Rückgewinnung bei 145 °C nicht nochmal erwärmt wurde, nicht vollständig homogenisiert werden und/oder es gab Schwierigkeiten beim Abfüllen der Prüfgefässe. Die Werte unterscheiden sich von den anderen Werten, die nach der Rückgewinnung ermittelt wurden, nur wenig und/oder passen gut zu den beobachteten Trends.
- Anforderungen: Bei den frischen PmBs erfüllen alle Einzelwerte des PmB-E 25/55-65 von Hersteller 3 bei der Penetration, und alle Einzelwerte des PmB 45/80-80 von Hersteller 5 beim R+K die Anforderungen nicht. Die übrigen frischen PmBs und alle rückgewonnenen PmBs erfüllen die Anforderungen.
- Boxplots der absoluten Werte: Bei der Penetration, der T_{BTSV} , dem δ_{BTSV} und der elastischen Rückstellung der rückgewonnenen PmBs lassen sich bei den Boxplots keine grossen Unterschiede feststellen. Bei den frischen PmBs variieren die Lagen der Boxen bei der elastischen Rückstellung ein wenig und die Streuung steigt mit höheren PAT etwas an. Median und MW sind aber sehr ähnlich.
 Beim R+K, dem I_P , der $R_{3,2 \text{ kPa}}$, der $R_{10 \text{ kPa}}$ und der $J_{nr \text{ } 3,2 \text{ kPa}}$ der frischen PmBs, sieht man, dass sich die 160 °C-Box von den anderen beiden Boxen etwas unterscheidet. Bei der $R_{3,2 \text{ kPa}}$ und der $J_{nr \text{ } 3,2 \text{ kPa}}$ der rückgewonnenen PmBs unterscheiden sich der Median und/oder der MW bei 200 °C etwas mehr von denen bei 160 °C und 180 °C PAT. Bei der R_{diff} und der $J_{nr \text{ } diff}$ sind es die Mediane und/oder MW bei 180 °C, die sich von den anderen beiden PAT unterscheiden.
 Bei der $R_{10 \text{ kPa}}$ und der $J_{nr \text{ } 3,2 \text{ kPa}}$ zeigen die Mediane und/oder MW einen Aufwärtstrend hin zu höheren PAT, bei der R_{diff} und der $J_{nr \text{ } 10 \text{ kPa}}$ zeigen sie einen Abwärtstrend.
 Bei den Bindemittleigenschaften der J_{nr} sind die MW teilweise grösser als Q3 und liegen somit ausserhalb der Box. Bei manchen PmBs betrifft das alle drei PAT. Generell hat es den Anschein, dass bei den BKW, die mit dem MSCR ermittelt wurden, die Boxplots grössere Unterschiede zeigen.
 Ausreisser kommen vor allem bei der R und der J_{nr} oft bei denjenigen PmBs vor, bei denen nach dem Erwärmen noch Klümpchen und Verdickungen vorhanden waren. Bei wenigen Ausreissern handelt es sich um Einzelwerte, die sich stark von den anderen Einzelwerten derselben Prüfserie unterscheiden. Die meisten Ausreisser sind im Vergleich zu den anderen Einzelwerten innerhalb ihrer Prüfserie unauffällig.
- Relative Abweichungen: Die Ergebnisse der relativen Abweichungen zusammenzufassen ist herausfordernd, da sich kein eindeutiger Trend abzeichnet, sondern die Ergebnisse je nach BKW variieren. Auffällig ist jedoch, dass es oft die Werte bei 160 °C PAT sind, die sich von den Werten der anderen beiden PAT deutlich unterscheiden. Das betrifft sowohl Mediane, als auch MW und die Streuung. Seltener sind es die Werte bei 200 °C PAT, die Unterschiede zu den anderen beiden PAT zeigen.
 In den meisten Fällen sind Ausreisser unauffällig oder betreffen Einzelwerte, die sich im Vergleich zu den anderen beiden Einzelwerten innerhalb derselben

Prüfserie mehr oder weniger deutlich unterscheiden, oder deren Werte im Vergleich zu anderen PmBs weiter auseinanderliegen. Manche Ausreisser gehören zu Proben, die nicht komplett aufgeschmolzen werden konnten, deren Werte aber im Vergleich zu den beiden anderen Proben in der Prüfserie meist unauffällig sind.

- Höchster gemessener Einzelwert in Bezug auf die PAT: Wenn man vergleicht, bei welcher PAT die höchsten Einzelwerte pro Prüfserie gemessen wurden, lassen sich bei den frischen PmBs bei der Penetration, dem R+K, der elastischen Rückstellung, der T_{BTSV} , dem δ_{BTSV} , der $R_{3.2 \text{ kPa}}$, der $R_{10 \text{ kPa}}$ und der $J_{nr \text{ diff}}$ keine klaren Trends erkennen. Nur beim I_P wurden mehr als 50 % der höchsten gemessenen Einzelwerte bei einer PAT von 200 °C berechnet. Bei der R_{diff} und der $J_{nr \text{ } 3.2 \text{ kPa}}$ wurden mehr als 60 % der höchsten Einzelwerte bei einer PAT von 160 °C gemessen, bei der $J_{nr \text{ } 10 \text{ kPa}}$ waren es sogar mehr als 70 % (Tabelle 17).

Bei den rückgewonnenen PmBs lassen sich bei der Penetration, der elastischen Rückstellung, der T_{BTSV} , dem δ_{BTSV} , der $R_{3.2 \text{ kPa}}$, der $R_{10 \text{ kPa}}$ und der $J_{nr \text{ } 3.2 \text{ kPa}}$ keine Trends erkennen. Bei der $J_{nr \text{ } 10 \text{ kPa}}$ wurden 70 % der höchsten Einzelwerte bei 160 °C PAT gemessen, bei der R_{diff} 60 % bei 160 °C. Beim R+K waren es 50 % bei 180 °C, beim I_P 50 % bei 180 °C und bei der $J_{nr \text{ diff}}$ waren es 50 % bei 200 °C (Tabelle 18).

- Trendlinien und Regressionsanalysen: Wenn man sich die Trendlinien der einzelnen PmBs ansieht, lassen sich bei manchen Bindemittleigenschaften einige Trends in Richtung höherer PAT erahnen. Wenn man sich allerdings die Trendlinien aller Einzelwerte aller frischen PmBs bzw. aller rückgewonnenen PmBs ansieht und den p-Wert berechnet, stellt man fest, dass die Steigungen der Trendlinien in den meisten Fällen keine statistische Signifikanz haben. Nur bei der $R_{3.2 \text{ kPa}}$ der frischen PmBs gibt es eine statistische Signifikanz und bei der $R_{10 \text{ kPa}}$ und der $J_{nr \text{ } 3.2 \text{ kPa}}$ der frischen PmBs sind sie tendenziell statistisch signifikant (Tabelle 19, Tabelle 20 und Tabelle 21).
- SD: Bei der elastischen Rückstellung liegen alle Einzelwerte innerhalb der entsprechenden SD. Bei den frischen PmBs lassen sich bei der Penetration und dem R+K keine Trends bzgl. der Randwerte und der PAT erkennen. Beim I_P , der T_{BTSV} , dem δ_{BTSV} , der R und der J_{nr} gehören die meisten Einzelwerte, die ausserhalb der SD liegen, zu 160 °C PAT. Bei der R und der J_{nr} ist dieser Trend besonders stark ausgeprägt (Tabelle 22).

Bei der Penetration und beim I_P sind die Einzelwerte, die nicht innerhalb der SD liegen, zwischen den NH-PmBs und den H-PmBs gleichverteilt. Beim R+K, der R und der J_{nr} sind bei den NH-PmBs mehr Einzelwerte ausserhalb der entsprechenden SD als bei H-PmBs. Bei der T_{BTSV} und dem δ_{BTSV} ist es genau umgekehrt. Bei den rückgewonnenen PmBs liegen bei der Penetration und der elastischen Rückstellung alle Einzelwerte innerhalb der SD. Beim I_P , der T_{BTSV} , dem δ_{BTSV} , der $R_{3.2 \text{ kPa}}$, der $R_{10 \text{ kPa}}$, der $J_{nr \text{ } 3.2 \text{ kPa}}$, der $J_{nr \text{ } 10 \text{ kPa}}$ und der $J_{nr \text{ diff}}$ lassen sich keine Trends bzgl. der SD und der PAT erkennen. Beim R+K und der R_{diff} liegen die meisten Einzelwerte bei 180 °C ausserhalb der SD (Tabelle 23).

Bei der T_{BTSV} , der $R_{10 \text{ kPa}}$, der $J_{nr \text{ } 3.2 \text{ kPa}}$ und der $J_{nr \text{ } 10 \text{ kPa}}$ liegen mehr Einzelwerte der NH-PmBs ausserhalb der SD. Beim R+K, dem I_P und δ_{BTSV} liegen öfter Einzelwerte ausserhalb der SD, die zu H-PmBs gehören. Bei der $R_{3.2 \text{ kPa}}$, der R_{diff} und der $J_{nr \text{ diff}}$ sind NH-PmBs und H-PmBs gleichermassen betroffen.

Höchster Einzelwert frischer PmBs in Bezug auf die PAT

BKW	160 °C	180 °C	200 °C	160 °C & 180 °C	160 °C & 200 °C	180 °C & 200 °C	Alle Werte iden- tisch
Penetra- tion [¹ / ₁₀ °C]	3 14 %	5 24 %	9 43 %	-	4 19 %	-	-
R+K [°C]	2 10 %	8 38 %	7 33 %	1 5 %	1 5 %	2 10 %	-
I _P [-]	1 5 %	6 29 %	12 57 %	1 5 %	-	1 5 %	-
Elast. Rückst. [%]	2 10 %	-	3 14 %	2 10 %	3 14 %	4 19 %	7 33 %
T _{BTSV} [°C]	5 24 %	6 29 %	6 29 %	1 5 %	-	3 14 %	-
δ _{BTSV} [°]	7 33 %	6 29 %	5 24 %	1 5 %	-	1 5 %	1 5 %
R _{3,2 kPa} [%]	5 33 %	8 38 %	7 33 %	-	1 5 %	-	-
R _{10 kPa} [%]	6 29 %	5 24 %	10 48 %	-	-	-	-
R _{diff} [%]	14 67 %	4 19 %	3 14 %	-	-	-	-
J _{nr 3,2 kPa} [¹ /kPa]	13 62 %	6 29 %	2 10 %	-	-	-	-
J _{nr 10 kPa} [¹ /kPa]	15 71 %	4 19 %	2 10 %	-	-	-	-
J _{nr diff} [%]	5 24 %	10 48 %	6 29 %	-	-	-	-

Tabelle 17: Einzelwerte frischer PmBs: Die Zahlen geben an, wie oft der höchste Einzelwert bei den 21 frischen PmBs bei der entsprechenden PAT ermittelt wurde. Angaben sowohl als absolute Werte als auch in Prozent

- KI und z-score: Sowohl bei den frischen als auch den rückgewonnenen PmBs liegt jeder ermittelte Einzelwert von jedem BKW innerhalb des entsprechenden KI und jeder ermittelte z-score liegt innerhalb des Bereichs zwischen -2 und +2.
- MW: Beim R+K, dem I_P, der elastischen Rückstellung, der R_{3,2 kPa}, der R_{10 kPa}, der R_{diff} und der J_{nr 3,2 kPa} sind die Unterschiede zwischen den MW der frischen und der rückgewonnenen PmBs bei den NH-PmBs grösser. Bei der Penetration, der T_{BTSV}, dem δ_{BTSV}, der J_{nr 10 kPa} und der J_{nr diff} sind die Unterschiede bei den H-PmBs grösser. Bei der R und der J_{nr} sind bis auf wenige Ausnahmen die MW der frischen und der rückgewonnenen PmBs höher als die der jeweiligen rückgewonnenen PmBs (Tabelle 24).

Höchster Einzelwert rückgewonnener PmBs in Bezug auf die PAT

BKW	160 °C	180 °C	200 °C	160 °C & 180 °C	160 °C & 200 °C	180 °C & 200 °C	Alle Werte iden- tisch
Penetra- tion [¹ / ₁₀ °C]	4 40 %	1 10 %	3 30 %	-	-	1 10 %	1 10 %
R+K [°C]	1 10 %	5 50 %	2 20 %	-	1 10 %	1 10 %	-
I _P [-]	3 30 %	5 50 %	2 20 %	-	-	-	-
Elast. Rückst. [%]	4 40 %	3 30 %	1 10 %	-	-	2 20 %	-
T _{BTSV} [°C]	2 20 %	4 40 %	2 20 %	-	-	1 10 %	1 10 %
δ _{BTSV} [°]	3 30 %	1 10 %	1 10 %	2 20 %	-	2 20 %	1 10 %
R _{3,2 kPa} [%]	3 30 %	4 40 %	3 30 %	-	-	-	-
R _{10 kPa} [%]	3 30 %	4 40 %	3 30 %	-	-	-	-
R _{diff} [%]	6 60 %	2 20 %	1 10 %	-	1 10 %	-	-
J _{nr 3,2 kPa} [¹ /kPa]	4 40 %	2 20 %	3 30 %	-	1 10 %	-	-
J _{nr 10 kPa} [¹ /kPa]	7 70 %	2 20 %	1 10 %	-	-	-	-
J _{nr diff} [%]	1 10 %	4 40 %	5 50 %	-	-	-	-

Tabelle 18: Einzelwerte rückgewonnener PmBs: Die Zahlen geben an, wie oft der höchste Einzelwert bei den zehn rückgewonnenen PmBs bei der entsprechenden PAT ermittelt wurde. Angaben sowohl als absolute Werte als auch in Prozent

- Differenz: Die Unterschiede zwischen dem höchsten und dem tiefsten Einzelwert einer Messung innerhalb frischer PmBs ist in den meisten Fällen bei H-PmBs größer als bei NH-PmBs. Die einzigen beiden Ausnahmen bilden die Penetration und die J_{nr diff} (Tabelle 25).
Bei den rückgewonnenen PmBs streut nur die R_{10 kPa} in NH-PmBs stärker als in H-PmBs. Bei der T_{BTSV} gibt es bei den rückgewonnenen PmBs keinen Unterschied. Mit Ausnahme der Penetration, der T_{BTSV}, der R_{10 kPa} und der J_{nr diff} zeigen die maximalen Differenzen der Einzelwerte der rückgewonnenen PmBs dieselben Trends wie die frischen PmBs (Tabelle 25).
- r: Ein Vergleich mit den r der entsprechenden Normen, des ROBIN 2024 und des VAB/ALA 2022 zeigt, dass die Anzahl der PmBs, die innerhalb dieser r liegen, je

Trendlinien frischer PmBs

BKW	Anstieg	Abfall	Keine Steigung
Penetration [1/10 °C]	11 52 %	5 24 %	5 24 %
R+K [°C]	15 71 %	5 24 %	1 5 %
I _P [-]	14 67 %	-	7 33 %
Elast. Rückst. [%]	7 33 %	4 19 %	10 48 %
T _{BTSV} [°C]	9 43 %	9 43 %	3 14 %
δ _{BTSV} [°]	9 43 %	9 43 %	3 14 %
R _{3.2 kPa} [%]	12 57 %	3 14 %	6 29 %
R _{10 kPa} [%]	14 67 %	4 19 %	3 14 %
R _{diff} [%]	4 19 %	14 67 %	3 14 %
J _{nr 3.2 kPa} [1/kPa]	-	2 10 %	19 90 %
J _{nr 10 kPa} [1/kPa]	-	6 29 %	15 71 %
J _{nr diff} [%]	14 67 %	7 33 %	-

Tabelle 19: Trendlinien der frischen PmBs: Anzahl der 21 frischen PmBs deren Trendlinien mit zunehmender PAT ansteigen, abfallen oder keine Steigung haben. Angaben sowohl als absolute Werte als auch in Prozent

nach BKW stark variiert. Tabelle 26 und Tabelle 27 zeigen eine Übersicht über die Anzahl PmBs, die innerhalb der r liegen.

- **Black-Diagramme:** Die Black-Kurven der drei PAT sind sich bei den frischen und rückgewonnenen PmBs in den meisten Fällen sehr ähnlich. Unterschiede zeigen sich meist erst im Bereich von $G^* < 10$ kPa und sind zum Teil auch herstellerspezifisch. Rückgewonnene PmBs zeigen niedrigere Phasenwinkel als ihre frischen Pendants. Bei vielen PmBs sind die enthaltenen reaktiven Polymere gut zu erkennen. Hersteller 1 und 2 haben bestätigt, dass die ermittelten Black-Kurven für ihre Produkte repräsentativ sind.
- **Kriech-Erholungskurven:** Bei den Kriech-Erholungskurven ist auffällig, dass bei den frischen PmBs die 160 °C-Kurve in den meisten Fällen die höchsten Scherspannungen aufweist bzw. sogar deutlich höhere Scherdeformationen zeigt, verglichen mit den 180 °C- und 200 °C-Kurven. Bei den rückgewonnenen PmBs ist derselbe Trend zu beobachten, auch wenn hier die Unterschiede nicht ganz so gross sind. Die Kurven der rückgewonnenen PmBs liegen meist in einem ähnlichen Scherdeformationsbereich wie die der frischen PmBs.

Trendlinien rückgewonnener PmBs

BKW	Anstieg	Abfall	Keine Steigung
Penetration [1/10 °C]	5 50 %	4 40 %	1 10 %
R+K [°C]	5 50 %	4 40 %	1 10 %
I _p [-]	3 30 %	1 10 %	6 60 %
Elast. Rückst. [%]	4 40 %	4 40 %	2 20 %
T _{BTSV} [°C]	3 30 %	2 20 %	5 50 %
δ _{BTSV} [°]	3 30 %	2 20 %	5 50 %
R _{3,2 kPa} [%]	6 60 %	2 20 %	2 20 %
R _{10 kPa} [%]	6 60 %	1 10 %	3 30 %
R _{diff} [%]	1 10 %	5 50 %	4 40 %
J _{nr 3,2 kPa} [1/kPa]	-	1 10 %	9 90 %
J _{nr 10 kPa} [1/kPa]	-	1 10 %	9 90 %
J _{nr diff} [%]	7 70 %	3 30 %	-

Tabelle 20: Trendlinien der rückgewonnenen PmBs: Anzahl der zehn rückgewonnenen PmBs deren Trendlinien mit zunehmender PAT ansteigen, abfallen oder keine Steigung haben. Angaben sowohl als absolute Werte als auch in Prozent

- FTIR: Alle PmBs zeigen sehr ähnliche FTIR-Spektren. Die in den Spektren sichtbaren Zusätze stimmen mit den Angaben der Hersteller überein.
- Vergleich einzelne Hersteller: Der Vergleich der einzelnen Hersteller hat gezeigt, dass es nur vereinzelt Unterschiede zu den allgemeinen Trends gibt und dass die einzelnen Hersteller wenig herausstechen. Die einzige Ausnahme sind die Black-Diagramme, in denen man sehr gut die herstellerspezifischen Kurven erkennen, und einzelne Hersteller voneinander unterscheiden kann. Bei den Kriech-Erholungskurven ist auffällig, dass bei Hersteller 1, Hersteller 2 und Hersteller 5 die meisten PmBs ihre höchste Scherdeformation bei 160 °C PAT haben. Die durchschnittlichen Steigungen der Trendlinien der einzelnen Hersteller passen sehr gut zu den durchschnittlichen Steigungen aller Werte.

Steigung der Trendlinien und p-Werte frischer und rückgewonnener PmBs

BKW	Frisch		Rückgewonnen	
	Steigung	p-Wert	Steigung	p-Wert
Penetration [¹ / ₁₀ °C]	0.06	0.777	-	0.978
R+K [°C]	0.04	0.381	0.05	0.679
I _P [-]	0.02	0.194	0.01	0.821
Elast. Rückst. [%]	0.01	0.645	0.01	0.935
T _{BTSV} [°C]	-	0.962	-	0.958
δ _{BTSV} [°]	-0.01	0.806	-	0.941
R _{3.2 kPa} [%]	0.19	0.038	0.15	0.343
R _{10 kPa} [%]	0.30	0.084	0.13	0.584
R _{diff} [%]	-0.21	0.178	-0.02	0.895
J _{nr 3.2 kPa} [¹ /kPa]	-	0.086	-	0.343
J _{nr 10 kPa} [¹ /kPa]	-0.01	0.186	-	0.473
J _{nr diff} [%]	0.02	0.996	0.92	0.442

Tabelle 21: Steigung der Trendlinien und p-Werte der frischen und rückgewonnenen PmBs. Zur Berechnung wurden alle Einzelwerte aller PmBs benutzt

SD frischer PmBs

BKW	160 °C	180 °C	200 °C	Insgesamt
Penetration [1/10 °C]	2 3 %	1 2 %	1 2 %	4 6 %
R+K [°C]	5 8 %	3 5 %	5 8 %	13 21 %
I _p [-]	5 8 %	-	1 2 %	6 10 %
Elast. Rückst. [%]	-	-	-	-
T _{BTSV} [°C]	5 8 %	-	3 5 %	8 13 %
δ _{BTSV} [°]	4 6 %	2 3 %	1 3 %	7 1 %
R _{3.2 kPa} [%]	15 24 %	3 5 %	2 2 %	20 32 %
R _{10 kPa} [%]	16 25 %	2 3 %	3 5 %	21 33 %
R _{diff} [%]	11 17 %	3 5 %	5 8 %	19 30 %
J _{nr 3.2 kPa} [1/kPa]	14 22 %	3 5 %	2 3 %	19 30 %
J _{nr 10 kPa} [1/kPa]	14 22 %	2 3 %	3 5 %	19 30 %
J _{nr diff} [%]	9 14 %	7 11 %	4 6 %	20 32 %

Tabelle 22: SD der frischen PmBs. Anzahl der 63 Einzelwerte die bei der entsprechenden PAT und insgesamt ausserhalb der SD liegen. Angaben sowohl als absolute Werte als auch in Prozent

SD rückgewonnener PmBs

BKW	160 °C	180 °C	200 °C	Insgesamt
Penetration [1/10 °C]	-	-	-	-
R+K [°C]	1 3 %	5 17 %	1 3 %	7 23 %
I _P [-]	-	1 3 %	-	1 3 %
Elast. Rückst. [%]	-	-	-	-
T _{BTSV} [°C]	-	1 3 %	-	1 3 %
δ _{BTSV} [°]	-	-	1 3 %	-
R _{3.2 kPa} [%]	4 13 %	4 13 %	2 7 %	10 33 %
R _{10 kPa} [%]	3 10 %	3 10 %	2 7 %	8 27 %
R _{diff} [%]	2 7 %	6 20 %	2 7 %	10 33 %
J _{nr 3.2 kPa} [1/kPa]	3 10 %	4 13 %	2 7 %	9 30 %
J _{nr 10 kPa} [1/kPa]	3 10 %	4 13 %	2 7 %	9 30 %
J _{nr diff} [%]	4 13 %	3 10 %	3 10 %	10 33 %

Tabelle 23: SD der rückgewonnenen PmBs. Anzahl der 30 Einzelwerte die bei der entsprechenden PAT und insgesamt außerhalb der SD liegen. Angaben sowohl als absolute Werte als auch in Prozent.

Unterschiede der MW zwischen frischen und rückgewonnenen PmBs

BKW	Alle PmBs	Alle NH-PmBs	Alle H-PmBs
Penetration [1/10 °C]	17.40	14.20	20.60
R+K [°C]	6.19	9.51	2.87
I _P [-]	1.64	2.20	1.09
Elast. Rückst. [%]	6.23	9.27	3.20
T _{BTSV} [°C]	3.78	3.53	4.03
δ _{BTSV} [°]	1.47	1.03	1.90
R _{3.2 kPa} [%]	6.48	6.73	6.23
R _{10 kPa} [%]	6.56	9.89	3.24
R _{diff} [%]	6.15	7.27	5.03
J _{nr 3.2 kPa} [1/kPa]	0.06	0.09	0.04
J _{nr 10 kPa} [1/kPa]	0.14	0.10	0.08
J _{nr diff} [%]	76.17	48.85	103.50

Tabelle 24: Übersicht über die durchschnittlichen Unterschiede zwischen den MW frischer und rückgewonnener PmBs.

Durchschnittliche Differenz zwischen dem höchsten und tiefsten Einzelwert

BKW	Frische PmBs			Rückgewonnene PmBs		
	Alle PmBs	Alle NH-PmBs	Alle H-PmBs	Alle PmBs	Alle NH-PmBs	Alle H-PmBs
Penetration [¹ / ₁₀ °C]	4.67	5.18	4.10	3.00	2.80	3.20
R+K [°C]	3.19	2.85	3.56	3.66	1.92	5.40
I _P [-]	0.75	0.51	1.01	0.55	0.44	0.66
Elast. Rückst. [%]	1.38	1.36	1.40	1.60	1.40	1.80
T _{BTSV} [°C]	1.12	0.89	1.38	0.50	0.50	0.50
δ _{BTSV} [°]	1.06	0.77	1.37	0.39	0.28	0.50
R _{3.2 kPa} [%]	8.29	6.13	10.67	6.81	4.04	9.57
R _{10 kPa} [%]	13.37	10.81	16.18	6.26	6.29	6.14
R _{diff} [%]	9.07	7.45	10.85	4.40	4.09	4.70
J _{nr 3.2 kPa} [¹ /kPa]	0.20	0.13	0.27	0.16	0.03	0.30
J _{nr 10 kPa} [¹ /kPa]	0.44	0.38	0.50	0.17	0.07	0.28
J _{nr diff} [%]	100.67	104.10	96.90	47.27	21.89	72.66

Tabelle 25: Übersicht über die durchschnittliche Differenz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Einzelwert

FrISChe PmBs die innerhalb der r liegen

BKW	Norm	ROBIN 2024	VAB/ALA 2022
Penetration [1/10 °C]	12 von 21 57 %	12 von 16 75 %	-
R+K [°C]	3 von 8 38 %	2 von 13 75 %	-
I _p [-]	-	12 von 21 57 %	-
Elast. Rückst. [%]	19 von 21 90 %	-	-
T _{BTSV} [°C]	9 von 21 43 %	-	20 von 21 95 %
δ _{BTSV} [°]	7 von 21 33 %	-	17 von 21 81 %
R _{3,2 kPa} [%]	-	-	-
R _{10 kPa} [%]	-	-	-
R _{diff} [%]	0 von 21 0 %	-	-
J _{nr 3,2 kPa} [1/kPa]	-	-	-
J _{nr 10 kPa} [1/kPa]	-	-	-
J _{nr diff} [%]	4 von 21 19 %	-	-

Tabelle 26: Anzahl der frischen PmBs, die innerhalb der r der entsprechenden Norm, der berechneten r vom ROBIN 2024 und innerhalb der r des VAB/ALA 2022 liegen. Angaben sowohl als absolute Werte als auch in Prozent

Rückgewonnene PmBs die innerhalb der r liegen

BKW	Norm	ROBIN 2024	VAB/ALA 2022
Penetration [1/10 °C]	5 von 10 50 %	5 von 5 100 %	-
R+K [°C]	2 von 4 50 %	0 von 5 0 %	-
I _P [-]	-	6 von 10 60 %	-
Elast. Rückst. [%]	9 von 10 90 %	-	-
T _{BTSV} [°C]	6 von 10 60 %	-	10 von 10 100 %
δ _{BTSV} [°]	5 von 10 50 %	-	10 von 10 100 %
R _{3.2 kPa} [%]	-	-	-
R _{10 kPa} [%]	-	-	-
R _{diff} [%]	0 von 10 0 %	-	-
J _{nr 3.2 kPa} [1/kPa]	-	-	-
J _{nr 10 kPa} [1/kPa]	-	-	-
J _{nr diff} [%]	2 von 10 20 %	-	-

Tabelle 27: Anzahl der rückgewonnenen PmBs, die innerhalb der r der entsprechenden Norm, der berechneten r vom ROBIN 2024 und innerhalb der r des VAB/ALA 2022 liegen. Angaben sowohl als absolute Werte als auch in Prozent

5 Diskussion

5.1 Einfluss der Probeaufbereitungstemperatur PAT

Die Ergebnisse der Penetration, des R+K, des I_P , der elastische Rückstellung, der T_{BSTV} und des δ_{BSTV} zeigen, dass diese BKW bei den verschiedenen PAT sehr ähnlich sind. Es konnte keine eindeutige Abnahme oder Erhöhung der Werte mit aufsteigender PAT beobachtet werden. Die Steigungen der Trendlinien zeigen keine statistische Signifikanz. Bei der elastischen Rückstellung ändern sich die Werte am wenigsten. Das könnte entweder bedeuten, dass die PAT nur einen geringen Einfluss auf die elastische Rückstellung hat, oder dass dieser BKW in Bezug auf die PAT generell nicht sehr aussagekräftig ist.

Frische und rückgewonnene PmBs verhalten sich in den meisten Fällen sehr ähnlich. Es wurden auch keine nennenswerten Unterschiede zwischen Prüfserien, die nach der Rückgewinnung im Ofen oder im Rotationsverdampfer erwärmt wurden, festgestellt. Der Vergleich der Einzelwerte der NH-PmBs mit denen der H-PmBs zeigt, dass die Einzelwerte der meisten Bindemittleigenschaften bei den H-PmBs etwas stärker streuen als bei den NH-PmBs. Die Unterschiede sind aber nur sehr gering bis minimal. Ein Vergleich mit den r der Normen und der Ringversuche VAB/ALA 2022 und ROBIN 2024 zeigt, dass die Anzahl der PmBs, die innerhalb dieser r liegen, je nach BKW stark variiert. Beim MSCR kann die geringe Anzahl PmBs, die nicht innerhalb der r liegen, damit begründet werden, dass die PmBs in diesem Forschungsprojekt nicht nach Norm geprüft wurden. Bei den übrigen BKW liegen die PmBs entweder innerhalb der r oder weichen in den meisten Fällen nur wenig davon ab. Das bedeutet, dass die Streuung der Messwerte innerhalb bzw. nur wenig ausserhalb der Messunsicherheit der Prüfmethode liegt. Das wiederum deutet darauf hin, dass der Einfluss der PAT nicht gross genug ist, um die BKW stark zu verändern, aber doch gross genug, um die Wiederholbarkeit etwas zu beeinflussen.

Einzig beim MSCR konnte beobachtet werden, dass die Ergebnisse, die bei 160 °C PAT ermittelt wurden, stärker von den Ergebnissen bei 180 °C und 200 °C abweichen. Erkennbar ist das an den folgenden Punkten:

1. Die Kriech-Erholungskurven, die bei 160 °C ermittelt wurden, zeigen in den meisten PmBs die höchste Scherdeformation. Teilweise ist die Scherdeformation sogar deutlich höher als bei den 180 °C- und 200 °C-Kurven. Bei den rückgewonnenen PmBs, die nach der Rückgewinnung nicht nochmal erwärmt wurden, ist die Scherdeformation bei manchen PmBs bei den 145 °C-Kurven am höchsten.
2. Die Regressionsanalysen der frischen PmBs ergeben für die $R_{3,2 \text{ kPa}}$ eine statistische Signifikanz und für die $R_{10 \text{ kPa}}$ und die $J_{nr \ 3,2 \text{ kPa}}$ eine tendenzielle statistische Signifikanz.
3. Die meisten Werte, die ausserhalb der SD liegen, wurden bei 160 °C PAT ermittelt.
4. Der höchste gemessene Einzelwert einer Prüfserie wurde in 60-70 % der Fälle bei einer PAT von 160 °C ermittelt.
5. Die Boxplots zeigen bei 160 °C PAT generell grössere Unterschiede.

Die Penetration, der R+K, der I_P , die elastische Rückstellung, die T_{BSTV} und der δ_{BSTV} werden anscheinend nicht von der PAT beeinflusst, wenn sie zwischen 160 °C und

200 °C liegt. Daraus schliessen wir, dass PmBs während der Probeaufbereitung auf eine Temperatur zwischen 160 °C und 200 °C erwärmt werden können, ohne eine thermische Schädigung der Proben zu verursachen.

5.2 Erhitzen nach der Rückgewinnung

Die Versuche haben gezeigt, dass ein Erwärmen der PmBs nach der Rückgewinnung sinnvoll ist, da die Weiterverarbeitung der PmBs erleichtert wird, die PmBs restlos aufgeschmolzen und homogenisiert werden können und es keinen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Dies deckt sich auch mit den Beobachtungen von [80], die ebenfalls sehr ähnliche Ergebnisse zwischen nochmal erwärmten und nicht nochmal erwärmten PmBs beobachtet haben.

Hersteller 5 hat auf Nachfrage bestätigt, dass ihr PmB-E 25/55-65 nicht genug erwärmt wurde und das für dieses PmB mind. 160 °C notwendig sind. Ausserdem nimmt Hersteller 5 auf die SN EN 12594:2015-09 «Vorbereitung von Untersuchungsproben» [1] Bezug, die ein Erwärmen eines PmBs auf mind. 180 °C festlegt, und erklärt, dass es bei den in der Norm festgelegten Temperaturen keine Probleme mit ihren PmBs gibt. Wir können bestätigen, dass es bei 160 °C bis 200 °C PAT keine Probleme bei der Verarbeitung ihres PmB-E 25/55-65 gab.

Im Gegensatz dazu stehen z.B.: die PmBs von Hersteller 2, bei denen es bei 145 °C keine Probleme mit der Verarbeitung gab. In ihren Technical Data Sheets geben sie auch für verschiedene Verarbeitungsschritte je nachdem Temperaturen zwischen 120 °C und 190 °C an.

Ein Erwärmen nach der Rückgewinnung ist also sinnvoll und kann entweder im Ofen oder direkt im Rotationsverdampfer erfolgen, da kein Unterschied zwischen diesen beiden Methoden festgestellt werden konnte.

5.3 BTSV

Mit dem BTSV lässt sich die Alterung eines Bitumens nachweisen. Die T_{BTSV} , die einen Hinweis auf die Festigkeit eines Bitumens gibt [39] [81] [40], erhöht sich. Der δ_{BTSV} , der Informationen über den Grad der Bindemittelmodifikation liefert (je höher die Polymermodifikation desto höher die Elastizität und desto höher δ_{BTSV} ; [39] [40] [41]) hingegen sinkt (e.g.: [41] [71] [82] [83]). Dieser Trend lässt sich bei einem Vergleich der frischen und rückgewonnenen PmBs sehr gut erkennen, was ein eindeutiges Zeichen dafür ist, dass die untersuchten PmBs durch die Rückgewinnung gealtert wurden (Abbildung 46, Abbildung 47 und Abbildung 48).

Die Alterung eines Bitumens lässt sich auch im Black-Diagramm nachweisen, da es aufgrund der Zunahme der Steifigkeit eine Verschiebung des Funktionsverlaufs hin zu tieferen δ_{BTSV} gibt [39] [81]. Abbildung 38, Abbildung 39, Abbildung 40, Abbildung 41, Abbildung 42, Abbildung 43, Abbildung 44 und Abbildung 45 zeigen, dass die rückgewonnenen PmBs zu tieferen δ_{BTSV} verschoben sind. Die Ausmasse dieser Verschiebung sind aber unterschiedlich. Neben PmBs, bei denen die Rückgewinnung wenig Einfluss auf die Black-Diagramm-Kurven hat und deren Kurven bei unterschiedlichen PAT ähnlich aussehen, gibt es auch PmBs, bei denen die Kurven nach der Rückgewinnung stark von denen der frischen PmBs abweichen und auch die Unterschiede zwischen

den verschiedenen PAT gross sind. Das deutet darauf hin, dass die untersuchten PmBs unterschiedlich stark auf die Alterung während der Rückgewinnung reagieren. Die Unterschiede könnten herstellersistpezifisch sein, da z.B.: die H-PmBs von Hersteller 4 sich nach der Rückgewinnung besonders stark verändert haben, im Vergleich zu anderen Herstellern.

Laut [39] kann das Black-Diagramm Informationen über die Bitumenprovenienz geben, da das Verhältnis zwischen dem δ_{BTSV} und dem komplexen Schermodul bei Bitumen gleicher Herkunft (das durch herkömmliche Destillation aufbereitet wurde) dem gleichen Funktionsverlauf folgt. Bei Bitumen unterschiedlicher Härte sind die Messergebnisse lediglich auf dem Funktionsverlauf verschoben, ohne diese zu verändern. Auch in diesem Forschungsprojekt zeigen die Black-Diagramm-Kurven herstellersistpezifische Charakteristiken und Unterschiede, die eventuell auch mit den unterschiedlichen Herkünften der PmBs erklärt werden können.

5.4 Einfluss der Polymere auf die Alterung

Die Art der Polymermodifizierung und der Polymergehalt wurden in diesem Forschungsprojekt ausgeklammert, weil beides in der Laborpraxis nicht bekannt ist und für die Ermittlung der BKW keine Rolle spielt. Die Einteilung in NH-PmBs und H-PmBs erfolgte allein aufgrund der elastischen Rückstellung und nicht aufgrund des tatsächlichen Polymergehalts (siehe Kapitel 3.1).

Der Einfluss der Polymere auf die Alterung soll aber trotzdem diskutiert werden, da die Effekte der Alterung hauptsächlich von den Polymer-Bitumen-Interaktionen und ihrer Kompatibilität abhängen, die wiederum stark von der Chemie der Bestandteile beeinflusst werden. Grund dafür ist, dass das Bitumen und die Polymere verschiedenen Alterungsmechanismen unterliegen, die sich gegenseitig beeinflussen [70]. Da sich die Asphaltene im Bitumen nicht mit den Polymeren vermischen, treten unterschiedliche Phasen auf [84] in denen unterschiedliche Mechanismen wirken, die nicht einfach voneinander zu trennen sind [70]. Es konnten starke Zusammenhänge zwischen chemischen und rheologischen Ergebnissen beobachtet werden. Das bedeutet, dass beide Eigenschaften gute Indikatoren sind, um die Bitumenalterung zu bewerten [11].

Der δ_{BTSV} kann über den Grad der Bindemittelmodifikation Aufschluss geben, denn je höher die Polymermodifikation, desto höher ist die Elastizität und desto kleiner ist der δ_{BTSV} [39] [40] [41]. Mit diesem Prinzip konnten [71] PmBs mit unterschiedlichen Polymergehalten erfolgreich voneinander unterscheiden, die sie anhand ihres Polymergehalts in die Kategorien hoch (Polymergehalt $\geq 6\%$), niedrig (Polymergehalt $\approx 2\%$ oder weniger), mittel und erhöht (liegen zwischen niedrig und hoch) einordneten.

In den Black-Diagrammen kann man eindeutig PmBs identifizieren, die einen hohen Anteil an reaktiven Polymeren enthalten (siehe Kapitel 4.9.3). Auch anhand der Kurvenverläufe können herstellersistpezifische Unterschiede erkannt werden (Abbildung 38, Abbildung 39, Abbildung 40, Abbildung 41, Abbildung 42, Abbildung 43, Abbildung 44 und Abbildung 45), was gut mit unterschiedlichen Arten der Polymermodifikation erklärt werden kann.

Bei den in diesem Forschungsprojekt ermittelten BKW gibt es allerdings nur sehr geringe Unterschiede zwischen den NH-PmBs und den H-PmBs. Das könnte zwei Gründe haben:

1. Die geprüften PmBs besitzen möglicherweise ähnliche Polymergehalte. [71] weisen aber darauf hin, dass der Polymeranteil allein nicht ausreicht, um die zu erwartenden Bindemittleistung zu klassifizieren, da auch der Polymertyp, die Eigenschaften des Grundbitumens und andere Additive eine wichtige Rolle spielen.
2. Es ist möglich, dass bei den geprüften PAT die Polymere noch keiner (hohen) thermischen Belastung ausgesetzt waren. Bei höheren Temperaturen besteht die Gefahr, dass die Polymere zerstört werden. Diese Temperatur wird von den Herstellern typischerweise mit 190 °C angegeben [80]. Auch Hersteller 3 gibt zu bedenken, dass bei hohen Verbrauchstemperaturen, einem hohen Flächen-/Volumenverhältnis und längerer Erwärmung die Gefahr einer Polymerdegradation und einer Überalterung des PmBs besteht, was vor allem bei weichen PmB-Sorten kritisch sein kann, weswegen eine Erwärmung auf 200 °C eine Ausnahme sein sollte.

6 Vorschläge für Normrevisio- nen

Aufgrund der Erkenntnisse dieses Forschungsprojekts wird vorgeschlagen, den nationalen Anhang der SN EN 12697-3+A1:2020-08 «Rückgewinnung des Bindemittels: Rotationsverdampfer» [2] Ziffer 10 so umzuändern, dass sowohl frische als auch rückgewonnene PmBs ohne Ausnahme während der Probeaufbereitung auf 185 ± 5 °C für die Dauer von $1 \text{ h} \pm 10 \text{ min}$ erwärmt werden sollen. Bei rückgewonnenen PmBs kann die Erwärmung entweder im Ofen oder direkt im Rotationsverdampfer erfolgen. Dieser Änderungsvorschlag wird mit den folgenden Punkten begründet:

1. Die BKW, die bei 180 °C und 200 °C ermittelt wurden, zeigen nur sehr geringe oder keine Unterschiede.
2. Es gibt keine Anzeichen dafür gibt, dass PmBs bei dieser Temperatur thermisch geschädigt und die BKW somit verändert werden.
3. Eine Zerstörung der Polymere bei diesen Temperaturen ist unwahrscheinlich (vergleiche Herstelleraussagen in Kapitel 5.4).
4. Es macht keinen nennenswerten Unterschied, ob PmBs nach der Rückgewinnung im Ofen oder direkt im Rotationsverdampfer erwärmt werden.
5. Die Ergebnisse des MSCR deuten darauf hin, dass die Erwärmung des PmBs auf 160 °C nicht hoch genug sein könnte.
6. Nicht alle PmBs konnten bei 145 °C komplett aufgeschmolzen und homogenisiert werden. Die Produkte manche Hersteller sind sogar explizit für einen Gebrauch ab 180 °C konzipiert.
7. Der Widerspruch zur SN EN 12594:2015-09 «Vorbereitung von Untersuchungsproben» [1] wird ausgeräumt.
8. Der nicht näher definierte Begriff «hochviskos» wird entfernt.
9. Das Verfahren wird vereinheitlicht und die Vergleichbarkeit zwischen den Prüflaboren sichergestellt.

7 Forschungsbedarf

Mit dem MSCR kann das Vorhandensein und die Kapazität eines Polymernetzwerks festgestellt werden, weswegen diese Prüfung andere Prüfungen wie z.B.: die elastische Rückstellung oder die Kraftduktilität ablösen könnte [43]. In der Schweiz gibt es Überlegungen, die elastische Rückstellung mit dem MSCR zu ersetzen. SN EN 16659:2016-09 «MSCR-Prüfung (Multiple Stress Creep and Recovery Test)» [34] sieht für die ersten zehn Kriech- und Erholungszyklen eine Kriechspannung von 0.1 kPa, und 3.2 kPa für die darauffolgenden zehn Zyklen vor, wobei die Probe bei jedem Zyklus 1 s lang belastet wird, gefolgt von einer neunsekündigen Erholungsphase. Der MSCR, so wie er nach dieser Norm durchgeführt werden soll, steht allerdings in der wissenschaftlichen Literatur wegen diverser Schwächen in der Kritik [85] [86] und laut [87] gibt es noch kein optimales Verfahren bzgl. der Kriech-Erholungszeit, der Anzahl der Kriech-Erholungszyklen und der Belastungsstufen.

Bei der Kriech-Erholungszeit wird kritisiert, dass der MSCR stark modifizierte elastomere Bindemittel nur eingeschränkt charakterisieren kann, wenn deren Erholungszeit über die in der Norm geforderten 9 s hinausgeht [88]. Einige Wissenschaftler sind der Meinung, dass 9 s Erholungszeit nicht ausreichen, um eine komplette Wiederherstellung der elastischen Dehnung zuzulassen. Das gilt besonders für hochmodifizierte Bindemittel [88] [89] [90] [91] [92].

[73] hat herausgefunden, dass Bindemittel bei hoher Verkehrsbelastung eine durchschnittliche Kriechspannung von 8.2 kPa bis 11.9 kPa erfahren. Daraufhin haben [74] eine Kriechspannung von 10.0 kPa für den MSCR vorgeschlagen. Diese Kriechspannung ähnelt jenen, die auch andere Wissenschaftler vorgeschlagen haben, typischerweise wurden 10.0 kPa oder 12.8 kPa verwendet. Auch [71] haben neben den in der SN EN 16659:2016-09 «MSCR-Prüfung (Multiple Stress Creep and Recovery Test)» [34] geforderten zwei Zyklen mit 0.1 und 3.2 kPa noch einen dritten Zyklus mit 10.0 kPa durchgeführt, da sie die einzelnen PmBs mit der normgerechten Methode nicht unterscheiden konnten. Eine Erhöhung der Kriechspannung könnte nicht nur den tatsächlichen Bedingungen auf den Strassen näherkommen, sondern kann sich durch eine Erhöhung der Stresssensitivität auch positiv auf die Wiederholbarkeit der Messungen auswirken [87]. Bezüglich der Reproduzierbarkeit haben [71] empfohlen, die Anzahl der Zyklen pro Belastungsstufe auf 30 s zu erhöhen. Gemäss [87] haben auch schon andere Wissenschaftler 30 Kriech- und Erholungszyklen vorgeschlagen, um das stationäre Verhalten von Asphaltbindemitteln zu erfassen.

Auch die Wahl der Prüftemperatur ist nicht trivial. [71] schlagen vor, die Testtemperatur gemäss den lokalen klimatischen Bedingungen auszuwählen und haben basierend darauf harte PmBs bei 64 °C, und weiche PmBs bei 58 °C geprüft.

Wegen solcher Kritikpunkte nimmt die Anwendung des MSCR in Europa deutlich ab [86] und es wurden Alternativen wie der Single Shear Creep and Recovery Test (SSCRT) vorgeschlagen (siehe [92]), bei dem es sich um eine verlängerte Kriech-Erholungsprüfung mit nur einer Belastungsstufe handelt.

Während der dritten Begleitkommissionssitzung am 31.10.2025 hat Martins Zaumanis angemerkt, dass negative Ergebnisse der $J_{nr \text{ diff}}$ physikalisch nicht möglich sind, aber bei hohen Belastungen des PmBs gemessen werden können. Es stellt sich also

grundsätzlich die Frage, ob ein Verfahren, dessen Ergebnisse physikalisch unmöglich und somit nichtssagend sind, überhaupt durchgeführt werden sollte. Einige Wissenschaftler sind sich aber einig, dass der MSCR bzw. die J_{nr} gut mit der Spurrinnenbildung korreliert und nachweislich die bestmögliche Methode ist, um die Anfälligkeit von Asphaltbindemitteln auf Spurrinnenbildung zu quantifizieren [87] [88] [93]. Bezüglich des MSCR gibt es noch einige offene Fragen, die im Hinblick auf die Prüfung von PmBs und den Ersatz der elastischen Rückstellung mit dem MSCR verbleiben und eine genauere Betrachtung erfordern.

8 Fazit

Die Ergebnisse dieses Forschungsprojekts lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Penetration, der R+K, der I_P , die elastische Rückstellung, die T_{BTSV} und der δ_{BTSV} sind nicht von der PAT abhängig, wenn sie zwischen 160 °C und 200 °C liegt. Bei der elastischen Rückstellung ändern sich die Werte am wenigsten, entweder weil die PAT einen geringen Einfluss auf diesen BKW hat oder weil die elastische Rückstellung in Bezug auf die PAT wenig aussagekräftig ist.
- Nur die Ergebnisse des MSCR zeigen einen Zusammenhang mit der Probenaufbereitungstemperatur, denn vor allem die Werte bei 160 °C unterscheiden sich stärker von den Ergebnissen, die bei 180 °C und 200 °C PAT ermittelt wurden. Weil der MSCR in der wissenschaftlichen Literatur kritisch angesehen wird, wird weitere Forschung hinsichtlich des Ersatzes der elastischen Rückstellung und der Kraftduktilität durch den MSCR vorgeschlagen.
- Frische und rückgewonnene PmBs zeigen in den meisten Fällen sehr ähnliche oder gleiche Trends.
- Die Einzelwerte von H-PmBs streuen bei den meisten Bindemittleigenschaften etwas stärker als bei NH-PmBs.
- Die Anzahl der PmBs, die innerhalb der r der Normen oder der Ringversuche VAB/ALA 2022 und ROBIN 2024 liegen, variiert je nach BKW stark. Die Streuung der BKW liegt, bis auf vereinzelte Ausnahmen, innerhalb oder nur knapp ausserhalb der Messunsicherheit der Prüfmethode. Der Einfluss der PAT ist also nicht gross genug, um die BKW stark zu verändern, die Wiederholbarkeit wird aber doch etwas beeinflusst. Beim MSCR können die enormen Abweichungen zu den r damit begründet werden, dass der MSCR nicht nach Norm durchgeführt wurde.
- Die Ergebnisse von PmBs, die nach der Rückgewinnung bei 145 °C nicht nochmal erwärmt wurden, zeigen keine nennenswerten Unterschiede zu denen von PmBs, die nach der Rückgewinnung auf 160 °C, 180 °C oder 200 °C erwärmt wurden. Allerdings gab es bei den meisten der nicht nochmal erwärmten PmBs wegen der hohen Viskosität Probleme mit der Verarbeitbarkeit. Teils konnten sie auch nicht vollständig aufgeschmolzen und homogenisiert werden. Bei 160 °C bis 200 °C PAT gab es nur vereinzelt Probleme mit nicht vollständig aufgeschmolzenen PmBs.
- Es macht keinen Unterschied, ob die Erwärmung nach der Rückgewinnung im Ofen oder direkt im Rotationsverdampfer erfolgt.
- Mit dem BTSV konnte die Alterung der Bitumen durch die Rückgewinnung aufgezeigt werden, sowohl in den T_{BTSV} vs. δ_{BTSV} Diagrammen als auch in den Black-Diagrammen. Die Black-Diagramme zeigen auch, dass die untersuchten PmBs unterschiedlich stark auf die Rückgewinnung reagieren, was vermutlich auf Herstellerunterschiede und unterschiedliche Polymermodifikationen zurückzuführen ist. Anhand der Black-Diagramm-Kurven können PmBs einzelner Hersteller gut voneinander unterschieden werden.
- Es wird vorgeschlagen, den Nationalen Anhang Ziffer 10 der SN EN 12697-3+A1:2020-08 «Rückgewinnung des Bindemittels: Rotationsverdampfer» [2] so umzuarbeiten, dass während der Probenaufbereitung eine Erwärmung von frischen und rückgewonnenen PmBs auf 185 ± 5 °C obligatorisch wird. Die Dauer der

Erwärmung soll auf $1\text{ h} \pm 10\text{ min}$ festgelegt werden. Bei rückgewonnenen PmBs kann diese Erwärmung entweder im Ofen oder direkt im Rotationsverdampfer erfolgen.

Literaturverzeichnis

- [1] SN EN 12594:2015-09: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Vorbereitung von Untersuchungsproben.
- [2] SN EN 12697-3+A1:2020-08: Asphalt – Prüfverfahren – Teil 3: Rückgewinnung des Bindemittels: Rotationsverdampfer.
- [3] B. Hofko, M. Hospodka, L. Eberhardsteiner, R. Blab, J. Füssl, H. Grothe, D. Großegger und F. Handle, „Aktuelle Erkenntnisse zum Alterungsverhalten von Bitumen und Asphalt,“ *Strasse und Autobahn*, Bd. 8, pp. 591-597, 2013.
- [4] G. D. Airey, „State of the Art Report on Ageing Test Methods for Bituminous Pavement Materials,“ *International Journal of Pavement Engineering*, Bd. 4, Nr. 3, pp. 165-176, 2003.
- [5] L. Wright, A. Kanabar, E. Moul, S. Rubab und S. Hesp, „Oxidative aging of asphalt cements from an Ontario pavement trial,“ *International Journal of Pavement Research & Technology*, Bd. 4, Nr. 5, pp. 259-267, 2011.
- [6] R. Jing, A. Veryeri, A. Scarpas und S. Erken, „Rheological, fatigue and relaxation properties of aged bitumen,“ *International Journal of Pavement Engineering*, Bd. 21, Nr. 8, pp. 1024-1033, 2020.
- [7] M. Ammadi, F. Beer, K. W. Damm und D. Jakubik, „Einfluss von Kurzzeit- sowie Langzeitalterung im Labor auf Struktur von Polymeren und praxisrelevanten Eigenschaften modifizierter Bindemittel; Forschungsbericht Forschung Straßenbau und Strassenverkehrstechnik 910,“ Bundesministerium für Verkehr, Bonn, 2005.
- [8] R. Kleiziene, M. Panasienkienė und A. Vaitkus, „Effect of Aging on chemical Composition and Rheological Properties of Neat and Modified Bitumen,“ *Materials*, Bd. 12, Nr. 24, p. 4066, 2019.
- [9] P. Kandhal und W. C. Koehler, „Significant studies on asphalt durability: Pennsylvania experience,“ *Transportation Research Record*, Bd. 999, pp. 41-50, 1984.
- [10] J. Read und D. Whiteoak, *The Shell Bitumen Handbook*; 5th Edition, London, UK: Thomas Telford Publishing, 2003.
- [11] M. Fernández, G. Canon, S. Leischner, M. Rochlani, J. Noambuena-Contreras und A. González, „Effects of Microwave Heating and Long-Term Aging on the Rheological and Chemical Properties of Recovered Bitumen,“ *Materials*, Bd. 14, Nr. 24, p. 7787, 2021.
- [12] R. Gubler und M. N. Partl, „Einfluss schweizerischer Filler auf die Alterung von bituminösen Bindemitteln und Rissbildung im Belag; Nr. 1138,“ EMPA Dübendorf, Bundesamt für Strassen, Schweiz, 2005.
- [13] S. Wu, L. Pang, L. Mo, Y. Chen und G. Zhu, „Influence of aging on the evolution of structure, morphology and rheology of base and SBS modified bitumen,“ *Construction and Building Materials*, Bd. 23, Nr. 2, pp. 1005-1010, 2009.

- [14] A. Y. Suleiman und R. Mohd, „The effect of aging on bitumen properties modified with styrene-butadiene-styrene (SBS) polymer,“ *ARP Journal of Science and Technology*, Bd. 2, Nr. 7, pp. 593-596, 2012.
- [15] W. Shi, Y. Lin, S. Zhang, R. Tian, R. Liang, M. Wie, D. G. Evans und X. Duan, „Study on UV-shielding mechanisms of layered double hydroxide materials,“ *Physical Chemistry Chemical Physics*, Bd. 15, Nr. 41, pp. 18217-18222, 2013.
- [16] G. Sushmitha, „Aging of bitumen,“ *Engineering Technology Business*, pp. 1-24, 2014.
- [17] H. Xu, W. Guo und Y. Tan, „Internal structure evolution of asphalt mixtures during freeze-thaw cycles,“ *Materials & Design*, Bd. 86, pp. 436-446, 2015.
- [18] G. Sandoval, G. Thenoux, A. A. Molenar und M. Gonzalez, „The antioxidant effect of grape pomace in asphalt binder,“ *International Journal of Pavement Engineering*, Bd. 20, Nr. 2, pp. 163-171, 2016.
- [19] B. Sengoz und G. Isikyakar, „Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen,“ *Construction and Building Materials*, Bd. 22, Nr. 9, pp. 1897-1905, 2008.
- [20] J. Želimir, V. O. Bulatović, V. Rek und K. J. Marković, „Relationship between fractal, viscoelastic, and aging properties of linear and radial styrene-butadiene-styrene polymer-modified bitumen,“ *Journal of Elastomers & Plastics*, Bd. 48, Nr. 1, pp. 14-46, 2016.
- [21] J. Želimir, V. O. Bulatović, K. J. Marković und V. Rek, „Multi-fractal morphology of un-aged and aged SBS polymer-modified bitumen,“ *Plastic, Rubber and Composites*, Bd. 46, Nr. 2, pp. 77-98, 2017.
- [22] Y. Tian, L. Sun, H. Zhang, J. Harvey, J. Yang, B. Yang und X. Zuo, „Laboratory investigation on rheological, chemical and morphological evolution of high content polymer modified bitumen under long-term thermal oxidative aging,“ *Construction and Building Materials*, Bd. 303, p. 124565, 2021.
- [23] E. H. Chipperfield, J. L. Duthie und R. B. Girdler, „Asphalt Characteristics in Relation to Road Performance,“ *Association of Asphalt Paving Technologists*, Bd. 39, pp. 575-613, 1970.
- [24] A. M. Olabemiwo, A. O. Esan, H. O. Bakare und F. O. Agunbiade, „Polymer modified-natural bitumen thermal aging resistance studies,“ *International Journal of Pavement Engineering*, Bd. 20, Nr. 10, pp. 1207-1215, 2017.
- [25] G. Cuciniello, Study of the Effect of Laboratory-simulated Ageing on the Damage Resistance of Polymer-modified Bitumens in Intermediate Climates; PhD Thesis, University of Nottingham, 2019.
- [26] X. Lu und U. Isacson, „Artificial aging of polymer modified bitumens,“ *Journal of Applied Polymer Science*, Bd. 76, Nr. 12, pp. 1811-1824, 2000.
- [27] G. Parmeggiani, „Nitrogen Rolling Thin Film Oven Test,“ in *Proceedings of the 2nd Euroasphalt and Eurobitume Congress, Book Session 2: Development in Bituminous products and techniques, September 2000*, Barcelona, Spain, 2000.
- [28] SN EN 14023:2010: Anforderungen Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Rahmenwerk für die Spezifikation von polymermodifizierten Bitumen.

- [29] *SN EN 13108-1: 2022-09: Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen – Teil 1: As-phalbeton.*
- [30] *SN EN 1426:2016-03: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Nadelpenetration.*
- [31] *SN EN 1427:2016-03: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren.*
- [32] *SN EN 13398:2018-06: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der elastischen Rückstellung von modifiziertem Bitumen.*
- [33] *SN EN 17643:2023-06: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Äqui-Scherrmodultemperatur und des Phasenwinkels im Dynamischen Scherrheometer (DSR) – BTSV-Prüfung.*
- [34] *SN EN 16659:2016-09: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – MSCR-Prüfung (Multiple Stress Creep and Recovery Test).*
- [35] *SN EN 12591:2009: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Anforderungen an Strassenbaubitumen.*
- [36] *SN EN 12697-35:2018-06: Prüfverfahren – Teil 35: Labormischung.*
- [37] H. -P. Mattischek, R. Sobczak und J. Bleier, „Der Einsatz eines neuen Meßgerätes in der Bitumenprüfung – Korrelation der Nullviskosität mit dem Erweichungspunkt Ring und Kugel,“ *Bitumen*, Bd. 58, pp. 8-12, 1996.
- [38] R. Guericke, „100 Jahre Erweichungspunkt Ring und Kugel – Was kommt danach?,“ *Straße und Autobahn*, Bd. 61, Nr. 7, pp. 481-491, 2010.
- [39] M. Radenberg, N. Nytus und M. Gehrke, „Chemische und physikalische Eigenschaften der in Deutschland verwendeten Straßenbaubitumen,“ *Straße und Autobahn*, Bd. 65, Nr. 11, pp. 851-860, 2014.
- [40] A. Alisov, C. Riccardi, J. Schrader, A. Cannone Falchetto und M. P. Wistuba, „A novel method to characterise asphalt binder at high temperature,“ *Road Materials and Pavement Design*, Bd. 21, Nr. 1, pp. 143-155, 2018.
- [41] M. P. Wistuba, J. Schrader und A. Alisov, „Das Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahren,“ *Straße und Autobahn*, Bd. 8, pp. 645-652, 2018.
- [42] X. Lu, Y. Talon und P. Redelius, „Aging of bituminous binders – laboratory tests and field data, 1-12,“ in *4th Eurasphalt Eurobitume Congress, May 2008*, Kopenhagen, Dänemark, 2008.
- [43] H. Soenen, T. Blomberg, T. Pellinen und O. -V. Laukkanen, „The multiple stress creep-recovery test: a detailed analysis of repeatability and reproducibility,“ *Road Materials and Pavement Design*, Bd. 14, Nr. sup1, pp. 2-11, 2013.
- [44] R. Miró, A. H. Martínez, F. Moreno-Navarro und R. -G. del Carmen, „Effect of ageing and temperature on the fatigue behaviour of bitumens,“ *Materials & Design*, Bd. 86, pp. 129-137, 2015.
- [45] Y. Iliya und Z. Adam, „Attenuated total reflection (ATR): Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy of oxidized polymer-modified bitumens,“ *Applied Spectroscopy*, Bd. 65, Nr. 7, pp. 765-770, 2011.
- [46] R. Tauste, F. Moreno-Navarro, M. Sol-Sánchez und M. C. Rubio-Gámez, „Understanding the bitumen ageing phenomenon: A review,“ *Construction and Building Materials*, Bd. 192, pp. 593-609, 2018.

- [47] A. Diab, M. Enieb und D. Singh, „Influence of aging on properties of polymer-modified asphalt,“ *Construction and Building Materials*, Bd. 196, pp. 54-65, 2019.
- [48] E. Prosperi, E. Bocci und M. Bocci, „Effect of Bitumen Production Process and Mix Heating Temperature on the Rheological Properties of Hot Recycled Mix Asphalt,“ *Sustainability*, Bd. 14, Nr. 15, p. 9677, 2022.
- [49] J. C. Petersen, A Review of the Fundamentals of Asphalt Oxidation – Chemical, Physiochemical, Physical Properties, and Durability Relationships, Washington DC: Transport Research Circular E-C140, 2009.
- [50] B. Hofko, A. Falchetto, J. Grenfell, L. Huber, X. Lu, L. Porot, L. D. Poulikakos und Z. You, „Effect of short-term ageing temperature on bitumen properties,“ *Road Materials and Pavement Design*, Bd. 18, pp. 108-117, 2017.
- [51] O. Sirin, D. K. Paul und E. Kassern, „State of the Art Study on Aging of Asphalt Mixtures and Use of Antioxidant Additives,“ *Advances in Civil Engineering*, p. Article ID 3428961, 2018.
- [52] D. L. Presti, A. J. del Barco Carrión, G. Airey und E. Hajj, „Towards 100% recycling of reclaimed asphalt in road surface courses: Binder design methodology and case studies,“ *Journal of Cleaner Production*, Bd. 131, pp. 43-51, 2016.
- [53] K. Zhao und Y. Wang, „Influences of aging conditions on the rheological properties of asphalt binders,“ *International Journal of Pavement Engineering*, Bd. 21, Nr. 5, pp. 653-665, 2018.
- [54] M. Zaumanis, M. Arraigada, S. A. Wyss, K. Zeyer, M. C. Cavalli und L. D. Poulikakos, „Performance-based design of 100% recycled hot-mix asphalt and validation using traffic load simulator,“ *Journal of Cleaner Production*, Bd. 237, p. 117679, 2019.
- [55] *SN EN 12607-1:2017-09: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft – Teil 1: RTFOT-Verfahren.*
- [56] *SN EN 12607-2:2017-09: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft – Teil 2: TFOT-Verfahren.*
- [57] *SN EN 12607-3:2017-09: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft – Teil 3: RFT-Verfahren.*
- [58] *SN EN 14769:2013-09: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Beschleunigte Langzeit-Alterung mit einem Druckalterungsbehälter (PAV).*
- [59] G. Cuciniello, S. Leandri, S. Filippi, D. Lo Presti, G. Polacco, M. Losa und G. Airey, „Microstructure and rheological response of laboratory-aged SBS-modified bitumens,“ *Road Materials and Pavement Design*, Bd. 22, Nr. 2, pp. 372-396, 2021.
- [60] J. L. Goodrich, J. E. Goodrich und W. J. Kari, „Asphalt Composition Tests: Their Application and Relation to Field Performance, 65th Annual Meeting of the Transportation Research Board,“ *Journal of Transportation Research Board*, Bd. 1096, pp. 146-167, 1986.

- [61] G. S. Airey und S. F. Brown, „Rheological performance of aged polymer modified bitumens,“ *Journal of the Association of Asphalt Pavement Technologists*, Bd. 67, pp. 66-100, 1998.
- [62] X. Lu und U. Isacsson, „Chemical and rheological characteristics of styrene-butadiene-styrene polymer-modified bitumen,“ *Transportation Research Record*, Bd. 1661, Nr. 1, pp. 83-92, 1999.
- [63] M. S. Cortizo, D. O. Larsen, H. Bianchetto und J. L. Alessandrini, „Effect of the thermal degradation of SBS copolymers during the ageing of modified asphalts,“ *Polymer Degradation and Stability*, Bd. 86, Nr. 2, pp. 275-282, 2004.
- [64] I. Negulescu, L. Muhammad, W. Daly, C. Abadie, R. Cuero, C. Daranga und I. Glover, „Chemical and rheological characterization of wet and dry ageing of SBS copolymer-modified asphalt cement: laboratory and field evaluation,“ *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Bd. 75, pp. 267-296, 2006.
- [65] D. Lesueur, „The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification,“ *Advances in colloid and Interface Science*, Bd. 145, Nr. 1-2, pp. 42-82, 2009.
- [66] J. Zhu, B. Birgisson und N. Kringos, „Polymer modification of bitumen: Advances and challenges,“ *European Polymer Journal*, Bd. 54, pp. 18-38, 2014.
- [67] Y. Kumbargerı und K. Biligiri, „A novel approach to understanding asphalt binder aging behavior using asphaltene proportion as a performance indicator,“ *Journal of Testing and Evaluation*, Bd. 44, Nr. 1, pp. 439-449, 2015.
- [68] Y. Kumbargerı und K. Biligiri, „Rational performance indicators to evaluate asphalt materials' aging characteristics,“ *Journal of Materials and Civil Engineering*, Bd. 28, Nr. 12, p. 04016157, 2016.
- [69] G. Cuciniello, P. Leandri, S. Filippi, D. Lo Presti, M. Losa und G. D. Airey, „Effect of ageing on the morphology and creep and recovery of polymer-modified bitumens,“ *Materials and Structures*, Bd. 51, Nr. 5, p. 136, 2018.
- [70] G. Cuciniello, P. Leandri, G. Polacco, G. Airey und M. Losa, „Applicability of time-temperature superposition for laboratory-aged neat and SBS-modified bitumens,“ *Construction and Building Materials*, Bd. 263, p. 120964, 2020.
- [71] M. Zaumanis, M. Arraigada und M. Hugener, „Towards the development of classification criteria for highly polymer-modified binders,“ *Road Materials and Pavement Design*, Bd. 27, Nr. 1, pp. 125-151, 2026.
- [72] M. Pittet, A. -G. Dumont und M. Hugener, „Récupération de liants modifiés aux polymères issus d'échantillons d'enrob s. FB 1464,“ Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), 2014.
- [73] A. Arshadi, Importance of asphalt binder properties on rut resistance of asphalt mixture; MSc-Thesis, The University of Wisconsin Madison, 2014.
- [74] A. Golalipour, H. U. Bahia und H. A. Tabatabaee, „Critical Considerations toward Better Implementation of the Multiple Stress Creep and Recovery Test,“ *Journal of Materials in Civil Engineering*, Bd. 29, Nr. 5, p. 0016295, 2017.

- [75] DIN EN ISO 13528:2025-07: Statistische Verfahren für Eignungsprüfungen durch Laborvergleichsuntersuchungen.
- [76] DIN EN ISO 5725-1:2023-07: Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen – Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Begriffe.
- [77] DIN EN ISO 5725-2:2022-05: Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen – Teil 2: Verfahren zur Schätzung der Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit eines standardisierten Messverfahrens.
- [78] S. Weigel, „Estimating aging sensitivity of bitumen using FTIR spectroscopy and multivariate evaluation,“ *Engineering Research Express*, Bd. 5, Nr. 2, p. 025067, 2023.
- [79] P. Rückert und B. Lehofer, „Prüfung von bitumenhaltigen Bindemittelproben mit dem FTIR-Spektrometer Lyza 7000; Anton Paar Applikationsbericht, H89IA014DE-A,“ Anton Paar, 2024.
- [80] M. Zaubanis, M. Arraigada, G. Dosch und O. Paperna, „Standardisation of Highly Polymer-Modified Asphalt Mixtures (HPMix). VSS_2022_337,“ Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), 2025.
- [81] M. Radenberg und M. Gehrke, „Assessing bitumen in the whole service-temperature-range with the dynamic shear rheometer,“ in *Proceeding, 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Juni 2016*, Prag, Tschechien, 2016.
- [82] A. Alisov, Typisierung von Bitumen mittels instationärer Oszillationstheometrie; Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Institut für Strassenwesen, 2017.
- [83] A. Koyun, J. Büchner, M. P. Wistuba und H. Grothe, „Rheological, spectroscopic and microscopic assessment of asphalt binder aging,“ *Road Materials and Pavement Design*, Bd. 23, Nr. 1, pp. 80-97, 2022.
- [84] M. G. Bouldin, J. H. Collins und A. Berker, „Rheology and Microstructure of Polymer/Asphalt Blends,“ *Rubber Chemistry and technology*, Bd. 64, pp. 577-600, 1991.
- [85] J. Büchner, Prüfung von Asphaltmastix im Dynamischen Scherrheometer; Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Institut für Strassenwesen, Schriftenreihe Strassenwesen 38, 2021.
- [86] M. P. Wistuba, J. Grönninger, M. Hugener, M. Arraigada, B. Hofko, D. Maschauer, M. Radenberg, M. Staschkiewicz und N. Nytus, „D-A-CH-Forschungsprojekt «Mehrfachrecycling im Strassenbau»; Abschlussbericht 2022,“ Bundesamt für Strassen, 2023.
- [87] H. Liu, W. Zeiada, G. G. Al-Khateeb, A. Shanableh und M. Samarai, „Use of the multiple stress creep and recovery (MSCR) test to characterize the rutting potential of asphalt binders: A literature review,“ *Construction and Building Material*, Bd. 269, p. 121320, 2021.
- [88] G. White, „Grading Highly Modified Binders by Multiple Stress Creep Recovery,“ *Road Materials and Pavement Design*, Bd. 18, Nr. 6, pp. 1322-1327, 2017.

- [89] E. Masad, C. Huang, J. D'Angelo und D. Little, „Characterization of asphalt binder resistance to permanent deformation based on nonlinear viscoelastic analysis of multiple stress creep recovery (MSCR) test,“ *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists – Proceedings of the Technical Session*, Bd. 78, pp. 535-562, 2009.
- [90] S. E. Zoorob, J. P. Castro-Gomes, L. A. Pereira Oliveira und J. O'Connell, „Investigating the multiple stress creep recovery bitumen characterization test,“ *Construction and Building Materials*, Bd. 30, pp. 734-745, 2012.
- [91] M. D. Domingos und A. I. Faxina, „Creep-recovery behavior of asphalt binders modified with SBS and PPA,“ *Journal of Materials in Civil Engineering*, Bd. 26, Nr. 4, pp. 781-783, 2014.
- [92] E. Santagata, O. Baglieri, M. Alam und D. Dalmazzo, „A novel procedure for the evaluation of anti-rutting potential of asphalt binders,“ *International Journal of Pavement Engineering*, Bd. 16, Nr. 4, pp. 287-296, 2014.
- [93] J. Stempihar, A. Gundla und S. Underwood, „Interpreting Stress Sensitivity in the Multiple Stress Creep and Recover Test,“ *Journal of Materials in Civil Engineering*, Bd. 30, Nr. 2, p. 04017283, 2018.

Anhang

Rohdaten der Penetration									
PmB	Herst.	f / r / r-Rot	PAT [°C]	Pen. [1/10 mm]	MW	SD	z	KI	Steig. Trend- linie
PmB-E 25/55- 65	2	f	160	29	28	1	1	2	-0.03
			180	27			-1		
			200	28			0		
	3	f	160	69 ^A	70	2	-1	4	0.08
			180	69 ^A			-1		
			200	72 ^A			1		
	5	f	160	40	40	2	0	5	-0.05
			180	42			1		
			200	38			-1		
		r	145	28 ^B					
		r	160	28	29	2	-1	4	0.08
			180	28			-1		
PmB-E 45/80- 65	1	f	160	66	66	1	-1	1	-
			180	67			1		
			200	66			-1		
	2	f	160	48	49	1	-1	2	0.05
			180	49			0		
			200	50			1		
		r	160	38	41	3	-1	7	0.08
			180	44			1		
			200	41			0		
	4	f	160	61	64	3	-1	6	0.13
			180	64			0		
			200	66			1		
PmB-E 65/105- 60	2	f	160	76	75	1	1	3	-
			180	74			-1		
			200	76			1		
		r	145	61					
		r	160	63	62	2	1	4	-0.03
			180	60			-1		
	3	r-Rot	200	62	59	0	0	-	-
			160	59			-		
			180	59			-		
		f	200	59	82	10	-	25	0.43
			160	70			-1		
			180	88 ^C			1		
			200	87			1		

	5	f	160	81	82	2	-1	4	-
			180	84			1		
			200	81			-1		
PmB-E 90/150 -60	1	f	160	113	113	4	0	9	0.08
			180	109			-1		
			200	116 ^c			1		
	3	f	160	90	96	5	-1	13	0.25
			180	98			0		
			200	100			1		
		r	160	73	74	1	-1	2	0.05
			180	74			0		
			200	75			1		
PmB 25/55- 80	2	f	160	42	40	2	1	5	-0.05
			180	38			-1		
			200	40			0		
	3	f	160	58	57	1	1	3	-
			180	56			-1		
			200	58			1		
		r	145	41					
		r	160	44	44	1	-1	1	0.03
			180	44			-1		
			200	45			1		
		r-Rot	160	41	40	2	1	4	-0.03
			180	38			-1		
			200	40			0		
PmB 45/80- 80	1	f	160	64	64	3	0	6	0.08
			180	62			-1		
			200	67			1		
		r	145	45					
		r	160	45	47	2	-1	4	0.08
			180	48			1		
			200	48			1		
	2	f	160	61	62	1	-1	2	0.03
			180	63			1		
			200	62			0		
	5	f	160	48	48	1	1	1	-
			180	47			-1		
			200	48			1		
PmB 65/105- 80	1	f	160	81	80	2	1	4	-0.03
			180	78			-1		
			200	80			0		
		r	160	59	57	2	1	5	-0.10
			180	56			0		
			200	55			-1		
	2	f	160	69	72	3	-1	7	0.15

			180	72				0		
			200	75				1		
PmB 90/150 -80	1	f	160	136	135	2	0	5	0.03	
			180	133			-1			
			200	137 ^C			1			
	3	f	160	95	97	3	-1	8	0.15	
			180	96			0			
			200	101			1			
	4	f	160	116 ^C	118	4	0	11	-0.03	
			180	123			1			
			200	115			-1			
		r	145	96 ^D						
		r	160	89 ^E	86	3	1	7	-0.13	
			180	85 ^E			0			
			200	84 ^E			-1			

Tabelle 28: Übersicht über die ermittelten Werte der Penetration. Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB; Pen. = Penetration; z = z-score; Steig. = Steigung; gelb hinterlegt = Wert ausserhalb der SD; A = Wert erfüllt nicht die Anforderungen; B = im Prüfgefäß war eine unregelmässige Oberfläche erkennbar; C = Klümpchen und Verdickungen nach dem Erwärmen; D = konnte nicht vollständig homogenisiert werden, im Probenbehälter gab es Bereiche mit unterschiedlicher Viskosität; E = Klümpchen und Verdickungen beim Homogenisieren vor dem Mischen der Labormischung

Rohdaten des R+K

PmB	Herst.	f / r / r- Rot	PAT [°C]	R+K [°C]	MW	SD	z	KI	Steig. Trend- linie	Prüfflüs- sigkeit
PmB-E 25/55- 65	2	f	160	78.4	79.4	1.9	-0.5	4.6	0.08	Wasser
			180	78.2			-0.6			Wasser
			200	81.5 ^A			1.2			Wasser
	3	f	160	84.0	84.3	0.6	-0.6	1.4	0.03	Glycerin
			180	84.0			-0.6			Glycerin
			200	85.0			1.2			Glycerin
	5	f	160	76.0	77.3	1.3	-1.0	3.2	0.06	Wasser
			180	77.2			-0.1			Wasser
			200	78.6			1.0			Wasser
		r	145	74.6	75.6	1.8		4.4		Wasser
		r	160	73.6			-1.1		0.09	Wasser
			180	76.2			0.3			Wasser
			200	77.0			0.8			Wasser
		f	160	76.8	77.1	0.6	-0.4	1.6	-0.01	Wasser
			180	77.8			1.1			Wasser
			200	76.6			-0.7			Wasser
PmB-E 45/80- 65	2	f	160	76.8	77.1	0.6	-0.4	1.6	-0.01	Wasser
			180	77.8			1.1			Wasser
			200	76.6			-0.7			Wasser
	3	f	160	79.6	81.2	2.0	-0.8	5.1	0.02	Glycerin
			180	83.5			1.1			Glycerin
			200	80.5 ^B			-0.3			Glycerin
		r	160	69.0 ^B	71.1	2.1	-1.0	5.2	0.06	Glycerin
			180	73.2 ^B			1.0			Glycerin
			200	71.2 ^B			0.0			Glycerin
	4	f	160	90.0	92.2	2.0	-1.1	5.0	0.06	Glycerin
			180	94.0			0.9			Glycerin
			200	92.5			0.2			Glycerin
PmB-E 65/105- 60	2	f	160	71.6	76.8	4.5	-1.2	11.2	0.21	Wasser
			180	79.0			0.5			Wasser
			200	79.8			0.7			Wasser
		r	145	61.6	60.5	0.1		0.3		Wasser
		r	160	60.6			0.6		-0.01	Wasser
			180	60.6			0.6			Wasser
			200	60.4			-1.2			Wasser
		r-Rot	160	63.2			1.2		-0.01	Wasser
			180	63.0			-0.6			Wasser
			200	63.0			-0.6			Wasser
	3	f	160	87.0	88.8	1.8	-1.0	4.4	0.05	Glycerin
			180	90.5 ^C			0.9			Glycerin
			200	89.0			0.1			Glycerin
	5	f	160	74.0	74.5	0.5	-1.2	1.1	0.02	Wasser
			180	74.8			0.6			Wasser
			200	74.8			0.6			Wasser

PmB-E 90/150- 60	1	f	160	68.4	68.3	0.1	0.6	0.3	-0.01	Wasser
			180	68.4			0.6			Wasser
			200	68.2 ^C			-1.2			Wasser
	3	f	160	77.6	76.1	1.4	1.1	3.4	-0.05	Wasser
			180	75.0			-0.8			Wasser
			200	75.6			-0.3			Wasser
		r	160	69.6	70.3	0.8	-0.8	2.1	0.01	Wasser
			180	71.2			1.1			Wasser
			200	70.0			-0.3			Wasser
PmB 25/55- 80	2	f	160	82.5 ^B	85.2	2.8	-1.0	6.8	0.06	Glycerin
			180	88.0			1.0			Glycerin
			200	85.0			-0.1			Glycerin
	3	f	160	88.5	89.5	0.9	-1.2	2.2	0.04	Glycerin
			180	90.0			0.6			Glycerin
			200	90.0			0.6			Glycerin
		r	145	88.0						Glycerin
		r	160	87.5	88.8	1.5	-0.9	3.8	0.03	Glycerin
			180	90.5			1.1			Glycerin
			200	88.5			-0.2			Glycerin
		r-Rot	160	87.5	87.0	0.9	0.6	2.2	-	Glycerin
			180	86.0			-1.2			Glycerin
			200	87.5			0.6			Glycerin
PmB 45/80- 80	1	f	160	82.0	82.5	0.5	-1.0	1.2	0.01	Glycerin
			180	83.0			1.0			Glycerin
			200	82.5			0.0			Glycerin
		r	145	74.2						Glycerin
		r	160	76.2 ^B	76.9	2.2	-0.3	5.5	-0.03	Glycerin
			180	79.4 ^B			1.1			Glycerin
			200	75.2 ^B			-0.8			Glycerin
	2	f	160	82.5	85.0	3.1	-0.8	7.8	0.15	Glycerin
			180	84.0			-0.3			Glycerin
			200	88.5			1.1			Glycerin
	5	f	160	76.0 ^D	77.5	1.3	-1.1	3.3	0.06	Wasser
			180	77.8 ^D			0.3			Wasser
			200	78.6 ^D			0.9			Wasser
PmB 65/105- 80	1	f	160	91.0	89.7	1.3	1.1	3.1	-0.04	Glycerin
			180	88.5			-0.9			Glycerin
			200	89.5			-0.1			Glycerin
		r	160	88.0	88.5	1.8	-0.3	4.5	-0.03	Glycerin
			180	90.5			1.1			Glycerin
			200	87.0			-0.8			Glycerin
	2	f	160	83.0 ^B	85.0	2.0	-1.0	5.0	0.05	Glycerin
			180	87.0			1.0			Glycerin
			200	85.0			0.0			Glycerin
	1	f	160	90.5	90.2	1.0	0.3	2.6	-0.04	Glycerin

PmB 90/150- 80			180	91.0			0.8			Glycerin
			200	89.0 ^C			-1.1			Glycerin
	3	f	160	86.0	85.5	0.9	0.6	2.2	-	Glycerin
			180	84.5 ^E						Glycerin
			200	86.0						Glycerin
	4	f	160	87.5 ^C	88.5	4.6	-0.2	11.4	0.15	Glycerin
			180	84.5						Glycerin
			200	93.5						Glycerin
		r	145	60.2 ^{B,F}					Glycerin	
		r	160	76.2 ^{B,G}	83.4	7.4	-1.0	18.4	0.37	Glycerin
			180	83.0 ^{B,G}						Glycerin
			200	91.0 ^G						Glycerin

Tabelle 29: Übersicht über die ermittelten Werte des R+K. Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB; z = z-score; Steig. = Steigung; gelb hinterlegt = Wert ausserhalb der SD; A = hätte gemäss SN EN 1427:2016-03 «Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren» [31] mit Glycerin geprüft werden sollen; B = hätte gemäss SN EN 1427:2016-03 «Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren» [31] mit Wasser geprüft werden sollen; C = Klümpchen und Verdickungen nach dem Erwärmen; D = Wert erfüllt nicht die Anforderungen; E = hätte gemäss SN EN 1427:2016-03 «Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren» [31] wiederholt werden müssen; F = konnte nicht vollständig homogenisiert werden; G = Klümpchen und Verdickungen beim Homogenisieren vor dem Mischen der Labormischung

Rohdaten des I _P									
PmB	Herst.	f / r / r-Rot	PAT [°C]	I _P [-]	MW	SD	z	KI	Steig. Trend- linie
PmB-E 25/55- 65	2	f	160	2.8	3.0	0.5	-0.4	1.3	0.02
			180	2.6			-0.8		
			200	3.6			1.1		
	3	f	160	5.8	5.9	0.1	-0.6	0.3	0.01
			180	5.8			-0.6		
			200	6.0			1.2		
	5	f	160	3.2	3.4	0.2	-1.1	0.4	-
			180	3.5			0.9		
			200	3.4			0.2		
		r	145	2.2	2.4	0.4		0.9	0.02
		r	160	2.0			-1.0		
			180	2.4			0.1		
PmB-E 45/80- 65	1	f	160	4.7	4.7	0.1	0.0	0.2	-
			180	4.8			1.0		
			200	4.6			-1.0		
	2	f	160	4.2	4.4	0.3	-0.9	0.6	0.01
			180	4.7			1.1		
			200	4.4			-0.1		
		r	160	2.0	2.5	0.5	-1.0	1.2	0.01
			180	3.0			1.0		
			200	2.5			0.0		
	4	f	160	6.2	6.5	0.3	-1.2	0.7	0.01
			180	6.7			0.6		
			200	6.7			0.6		
PmB-E 65/105- 60	2	f	160	4.3	5.0	0.6	-1.1	1.6	0.03
			180	5.3			0.4		
			200	5.5			0.7		
		r	145	1.9	1.7	0.1		0.1	-
		r	160	1.8			1.2		
			180	1.7			-0.6		
		r-Rot	200	1.7			-0.6		
			160	2.1	2.0	0.1	1.2	0.1	-
			180	2.0			-0.6		
			200	2.0			-0.6		
	3	f	160	6.2	6.9	0.6	-1.1	1.5	0.02
			180	7.3 ^A			0.7		
			200	7.1			0.4		
	5	f	160	4.9	5.0	0.1	-1.0	0.2	-
			180	5.1			1.0		
			200	5.0			0.0		

PmB-E 90/150- 60	1	f	160	5.1	5.1	0.1	0.0	0.2	-
			180	5.0			-1.0		
			200	5.2 ^A			1.0		
	3	f	160	5.8	5.8	0.1	0.0	0.2	-
			180	5.7			-1.0		
			200	5.9			1.0		
		r	160	3.9	4.0	0.2	-0.9	0.4	-
			180	4.2			1.1		
			200	4.0			-0.2		
PmB 25/55- 80	2	f	160	4.2	4.0	0.5	0.4	1.2	0.01
			180	3.5			-1.1		
			200	4.4			0.8		
	3	f	160	5.8	5.9	0.1	-1.0	0.2	0.01
			180	5.9			0.0		
			200	6.0			1.0		
		r	145	4.8					
		r	160	5.0	5.1	0.2	-0.9	0.4	-
			180	5.3			1.1		
			200	5.1			-0.2		
		r-Rot	160	4.8	4.6	0.2	0.8	0.5	-
			180	4.4			-1.1		
			200	4.7			0.3		
PmB 45/80- 80	1	f	160	5.3	5.4	0.1	-1.0	0.2	0.01
			180	5.4			0.0		
			200	5.5			1.0		
		r	145	3.2					
		r	160	3.5	3.7	0.3	-0.6	0.9	-
			180	4.1			1.2		
			200	3.5			-0.6		
	2	f	160	3.3	4.9	1.4	-1.1	3.6	0.07
			180	5.5			0.4		
			200	6.0			0.7		
	5	f	160	3.7	3.8	0.2	-0.9	0.4	0.01
			180	3.8			-0.2		
			200	4.0			1.1		
PmB 65/105- 80	1	f	160	7.1	6.9	0.2	1.0	0.5	-
			180	6.7			-1.0		
			200	6.9			0.0		
		r	160	5.8	5.7	0.2	0.3	0.5	-0.01
			180	5.9			0.8		
			200	5.5			-1.1		
	2	f	160	5.7	6.1	0.3	-1.1	0.8	0.01
			180	6.3			0.7		
			200	6.2			0.4		
	1	f	160	8.9	8.9	0.1	0.6	0.1	-

PmB 90/150- 80			180	8.9			0.6		
			200	8.8 ^A			-1.2		
	3	f	160	7.1	7.1	0.2	0.0	0.5	0.01
			180	6.9			-1.0		
			200	7.3			1.0		
	4	f	160	4.3 ^A	6.9	2.3	-1.1	5.7	0.11
			180	7.8			0.4		
			200	8.6			0.7		
			145	3.0 ^B					
		r	160	5.6 ^C	6.4	0.8	-1.0	2.0	0.04
			180	6.3 ^C			-0.1		
			200	7.2 ^C			1.0		

Tabelle 30: Übersicht über die ermittelten Werte des I_p. Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB; z = z-score; Steig. = Steigung; gelb hinterlegt = Wert ausserhalb der SD; A = Klümpchen und Verdickungen nach dem Erwärmen; B = konnte nicht vollständig homogenisiert werden; C = Klümpchen und Verdickungen beim Homogenisieren vor dem Mischen der Labormischung

Rohdaten der elastischen Rückstellung

PmB	Herst.	f / r / r-Rot	PAT [°C]	Elast. Rückst. [%]	MW	SD	z	KI	Steig. Trend- linie
PmB-E 25/55- 65	2	f	160	86	86	1	-1	1.4	-
			180	87			1		
			200	86			-1		
	3	f	160	94	94	0	-	-	-
			180	94			-		
			200	94			-		
	5	f	160	92	92	1	1	1.4	-0.03
			180	92			1		
			200	91			-1		
		r	145	83	80	1	-	1.4	-
		r	160	80			-1		
			180	81			1		
PmB-E 45/80- 65	1	f	160	89	89	1	1	1.4	-0.03
			180	89			1		
			200	88			-1		
	2	f	160	93	93	1	0	2.5	-0.03
			180	94			1		
			200	92			-1		
		r	160	83	84	1	-1	2.5	0.03
			180	85			1		
			200	84			0		
	4	f	160	94	95	1	-1	2.9	0.05
			180	96			1		
			200	96			1		
PmB-E 65/105- 60	2	f	160	95	96	1	-1	1.4	0.03
			180	96			1		
			200	96			1		
		r	145	87	83	1	-	2.5	-0.05
		r	160	84			1		
			180	83			0		
		r-Rot	200	82			-1		
			160	86	85	1	1	1.4	-0.03
			180	85			-1		
			200	85			-1		
	3	f	160	96	98	2	-1	4.3	0.08
			180	99 ^A			1		
			200	99			1		
	5	f	160	98	98	0	-	-	-
			180	98			-		
			200	98			-		

PmB-E 90/150- 60	1	f	160	91	91	0	-	-	-
			180	91			-		
			200	91 ^A			-		
	3	f	160	96	94	2	1	5.2	-0.10
			180	95			0		
			200	92			-1		
		r	160	91	91	1	-1	1.4	-
			180	92			1		
			200	91			-1		
PmB 25/55- 80	2	f	160	93	94	2	-1	3.8	0.08
			180	94			0		
			200	96			1		
	3	f	160	95	95	1	1	1.4	-
			180	94			-1		
			200	95			1		
		r	145	91					
		r	160	92	93	1	-1	1.4	0.03
			180	93			1		
			200	93			1		
		r-Rot	160	92	91	1	1	2.5	-0.03
			180	90			-1		
			200	91			0		
PmB 45/80- 80	1	f	160	89	89	0	-	-	-
			180	89			-		
			200	89			-		
		r	145	83					
		r	160	83	84	1	-1	1.4	0.03
			180	84			1		
			200	84			1		
	2	f	160	96	98	2	-1	3.8	0.08
			180	98			0		
			200	99			1		
	5	f	160	94	94	0	-	-	-
			180	94			-		
			200	94			-		
PmB 65/105- 80	1	f	160	97	98	1	-1	1.4	0.03
			180	98			1		
			200	98			1		
		r	160	94	93	1	1	1.4	-0.03
			180	93			-1		
			200	93			-1		
	2	f	160	99	99	0	-	-	-
			180	99			-		
			200	99			-		
	1	f	160	99	99	0	-	-	-

PmB 90/150- 80			180	99			-		
			200	99 ^A			-		
	3	f	160	98	98	1	1	1.4	-
			180	97			-1		
			200	98			1		
	4	f	160	95 ^A	97	3	-1	6.3	0.13
			180	97			0		
			200	100			1		
		r	145	87 ^B					
		r	160	95 ^C	97	2	-1	5.2	0.10
			180	96 ^C			0		
			200	99 ^C			1		

Tabelle 31: Übersicht über die ermittelten Werte der elastischen Rückstellung. Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB; Elast. Rückst. = elastische Rückstellung; z = z-score; Steig. = Steigung; A = Klümpchen und Verdickungen nach dem Erwärmen; B = konnte nicht vollständig homogenisiert werden; C = Klümpchen und Verdickungen beim Homogenisieren vor dem Mischen der Labormischung

Rohdaten der T _{BTSV}									
PmB	Herst.	f / r / r-Rot	PAT [°C]	T _{BTSV} [°C]	MW	SD	z	KI	Steig. Trend- linie
PmB-E 25/55- 65	2	f	160	63.6	63.5	0.1	0.6	0.3	-0.01
			180	63.6			0.6		
			200	63.4			-1.2		
	3	f	160	50.5	50.5	0.2	0.2	0.4	0.00
			180	50.3			-1.1		
			200	50.6			0.9		
	5	f	160	57.6	58.0	0.4	-1.1	0.9	0.02
			180	58.2			0.4		
			200	58.3			0.7		
		r	145	63.4	64.9	0.4		1.0	-0.01
		r	160	64.8			-0.3		
			180	65.4			1.1		
PmB-E 45/80- 65	1	f	160	50.0	50.0	0.1	-0.6	0.1	-
			180	50.1			1.2		
			200	50.0			-0.6		
	2	f	160	55.4	55.3	0.3	0.4	0.7	0.00
			180	55.0			-1.1		
			200	55.5			0.8		
		r	160	59.3	59.0	0.4	0.8	0.9	0.00
			180	58.6			-1.1		
			200	59.1			0.3		
	4	f	160	51.0	50.9	0.2	0.9	0.4	-0.01
			180	50.9			0.2		
			200	50.7			-1.1		
PmB-E 65/105- 60	2	f	160	49.9	49.5	0.3	1.1	0.8	-0.02
			180	49.4			-0.4		
			200	49.3			-0.7		
		r	145	51.9	51.5	0.1		0.2	0.00
		r	160	51.4			-1.0		
			180	51.6			1.0		
			200	51.5			0.0		
		r-Rot	160	52.0	51.7	0.3	1.1	0.6	-0.01
			180	51.7			-0.1		
			200	51.5			-0.9		
	3	f	160	51.3	49.2	1.9	1.1	4.7	-0.09
			180	48.7 ^A			-0.3		
			200	47.6			-0.8		
	5	f	160	49.8	49.8	0.8	0.0	1.9	0.02
			180	49.1			-1.0		
			200	50.6			1.0		

PmB-E 90/150- 60	1	f	160	42.5	43.6	0.9	-1.2	2.3	0.04
			180	44.1			0.6		
			200	44.1 ^A			0.6		
	3	f	160	46.7	46.7	0.2	0.2	0.4	-0.01
			180	46.8			0.9		
			200	46.5			-1.1		
		r	160	49.5	49.5	0.2	-0.2	0.4	0.01
			180	49.4			-0.9		
			200	49.7			1.1		
PmB 25/55- 80	2	f	160	57.0	57.3	0.3	-0.9	0.8	0.01
			180	57.6			1.1		
			200	57.2			-0.2		
	3	f	160	54.1	53.6	0.6	0.8	1.4	-0.01
			180	53.0			-1.1		
			200	53.8			0.3		
		r	145	58.1 ^B	56.9	0.2	-0.6	0.4	-
			160	56.8			-0.6		
			180	57.1			1.2		
		r-Rot	160	58.2	58.5	0.3	-0.9	0.8	0.00
			180	58.8			1.1		
			200	58.4			-0.2		
PmB 45/80- 80	1	f	160	50.3	50.6	0.3	-1.1	0.7	0.01
			180	50.8			0.8		
			200	50.7			0.4		
		r	145	55.1	54.7	0.0	-0.8	0.0	0.00
			160	54.7			-0.8		
			180	54.7			-0.8		
	2	f	160	53.7	53.2	1.1	0.5	2.7	-0.05
			180	53.9			0.7		
			200	51.9			-1.1		
	5	f	160	57.4	57.8	0.5	-0.8	1.3	0.03
			180	57.7			-0.3		
			200	58.4			1.1		
PmB 65/105- 80	1	f	160	49.1	49.3	0.2	-1.2	0.4	0.01
			180	49.4			0.6		
			200	49.4			0.6		
		r	160	53.0	53.7	0.7	-1.1	1.7	0.03
			180	53.9			0.3		
			200	54.3			0.9		
	2	f	160	50.7	50.3	0.3	1.2	0.9	-0.02
			180	50.1			-0.6		
			200	50.1			-0.6		
	1	f	160	35.5	39.3	3.3	-1.1	8.2	0.13

PmB 90/150- 80			180	41.7			0.7		
			200	40.6 ^A			0.4		
	3	f	160	46.9	46.9	0.2	0.0	0.5	0.01
			180	46.7			-1.0		
			200	47.1			1.0		
	4	f	160	44.4 ^A	44.0	0.6	0.7	1.5	-0.03
			180	44.2			0.4		
			200	43.3			-1.1		
		r	145	47.0 ^C					
		r	160	47.3 ^D	47.5	0.2	-1.2	0.4	0.01
			180	47.6 ^D			0.6		
			200	47.6 ^D			0.6		

Tabelle 32: Übersicht über die ermittelten Werte des T_{BTSV} . Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB; z = z-score; Steig. = Steigung; gelb hinterlegt = Wert ausserhalb der SD; A = Klümpchen und Verdickungen nach dem Erwärmen; B = zum Abfüllen der DSR-Formen musste das PmB nochmal für 15 min im Ofen auf 150 °C erwärmt werden; C = konnte nicht vollständig homogenisiert werden; D = körnige Struktur während des Trimmens im DSR sichtbar

Rohdaten der δ_{BTSV}										
PmB	Herst.	f / r / r-Rot	PAT [°C]	δ_{BTSV} [°]	MW	SD	z	KI	Steig. Trend- linie	
PmB-E 25/55- 65	2	f	160	63.0	62.8	0.3	0.6	0.7	-0.01	
			180	63.0			0.6			
			200	62.5			-1.2			
	3	f	160	60.7	60.9	0.3	-0.8	0.7	0.01	
			180	60.8			-0.4			
			200	61.2			1.1			
	5	f	160	63.5	63.4	0.2	0.3	0.5	0.00	
			180	63.2			-1.1			
			200	63.6			0.8			
		r	145	63.1						
			r	160	62.9	62.8	0.3	0.4	0.7	0.00
		180		62.5	-1.1					
PmB-E 45/80- 65	1	f	160	68.0	68.0	0.0	-	-	-	
			180	68.0			-			
			200	68.0			-			
	2	f	160	61.7	61.5	0.3	0.7	0.8	-0.02	
			180	61.6			0.4			
			200	61.1			-1.1			
		r	160	59.9	59.7	0.2	1.1	0.5	-0.01	
			180	59.5			-0.8			
			200	59.6			-0.3			
	4	f	160	60.7	60.9	0.2	-1.1	0.4	0.01	
			180	60.9			0.2			
			200	61.0			0.9			
PmB-E 65/105- 60	2	f	160	63.7	63.8	0.2	-0.6	0.4	0.01	
			180	63.7			-0.6			
			200	64.0			1.2			
		r	145	62.7						
			r	160	62.6	62.8	0.2	-1.1	0.5	0.01
				180	62.9			0.3		
		200		63.0	0.8					
		r-Rot	160	62.6	62.6	0.1	-0.6	0.1	0.00	
			180	62.6			-0.6			
	200		62.7	1.2						
	3	f	160	56.0	54.7	1.1	1.1	2.7	-0.04	
			180	54.0 ^A			-0.7			
			200	54.2			-0.5			
	5	f	160	58.4	58.5	0.4	-0.2	1.0	-0.01	
			180	58.9			1.1			
			200	58.1			-0.9			

PmB-E 90/150- 60	1	f	160	68.6	68.7	0.1	-1.0	0.2	0.01
			180	68.7			0.0		
			200	68.8 ^A			1.0		
	3	f	160	61.2	62.8	1.5	-1.1	3.7	0.05
			180	64.1			0.9		
			200	63.1			0.2		
		r	160	63.4	63.4	0.0	-	-	-
			180	63.4			-		
			200	63.4			-		
PmB 25/55- 80	2	f	160	67.8	65.5	2.0	1.1	5.1	-0.09
			180	64.6			-0.4		
			200	64.0			-0.7		
	3	f	160	56.0	56.2	0.2	-1.2	0.4	0.01
			180	56.3			0.6		
			200	56.3			0.6		
		r	145	54.8 ^B	54.7	0.2	-1.2	0.4	0.01
		r	160	54.5					
			180	54.8			0.6		
			200	54.8			0.6		
		r-Rot	160	55.0		0.1	-1.2	0.1	0.00
			180	55.1			0.6		
			200	55.1			0.6		
PmB 45/80- 80	1	f	160	67.2	67.1	0.1	1.2	0.1	0.00
			180	67.1			-0.6		
			200	67.1			-0.6		
		r	145	64.7	64.6	0.1	0.6	0.1	0.00
		r	160	64.6			0.6		
			180	64.6			0.6		
			200	64.5			-1.2		
	2	f	160	61.2	59.1	2.5	0.8	6.2	-0.04
			180	56.3			-1.1		
			200	59.7			0.3		
	5	f	160	60.0	59.4	0.7	0.9	1.6	-0.03
			180	59.5			0.2		
			200	58.7			-1.1		
PmB 65/105- 80	1	f	160	60.8	60.7	0.1	1.0	0.2	0.00
			180	60.7			0.0		
			200	60.6			-1.0		
		r	160	57.3	56.9	0.4	1.1	0.9	-0.02
			180	56.8			-0.3		
			200	56.6			-0.8		
	2	f	160	62.5	62.3	0.2	1.0	0.5	-0.01
			180	62.3			0.0		
			200	62.1			-1.0		
	1	f	160	58.6	59.1	0.4	-1.1	1.1	0.02

PmB 90/150- 80			180	59.4			0.7		
			200	59.3 ^A			0.5		
	3	f	160	56.9	56.9	0.2	0.0	0.5	0.00
			180	57.1			1.0		
			200	56.7			-1.0		
			160	62.1 ^A	62.7	0.8	-0.8	1.9	0.01
	4	f	180	63.6			1.1		
			200	62.5			-0.3		
		r	145	65.2 ^C					
		r	160	61.8 ^D	62.2	0.8	-0.6	1.9	0.03
			180	61.8 ^D			-0.6		
			200	63.1 ^D			1.2		

Tabelle 33: Übersicht über die ermittelten Werte des δ_{BTSV} . Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB; z = z-score; Steig. = Steigung; gelb hinterlegt = Wert ausserhalb der SD; A = Klümpchen und Verdickungen nach dem Erwärmen; B = zum Abfüllen der DSR-Formen musste das PmB nochmal für 15 min im Ofen auf 150 °C erwärmt werden; C = konnte nicht vollständig homogenisiert werden; D = körnige Struktur während des Trimmens im DSR sichtbar

Rohdaten der R _{3,2} kPa									
PmB	Herst.	f / r / r-Rot	PAT [°C]	R _{3,2} kPa [%]	MW	SD	z	KI	Steig. Trend- linie
PmB-E 25/55- 65	2	f	160	65.01	66.79	7.43	-0.24	18.45	0.25
			180	60.41			-0.86		
			200	74.94			1.10		
	3	f	160	97.57	97.41	0.19	0.87	0.47	-0.01
			180	97.45			0.23		
			200	97.20			-1.09		
	5	f	160	72.37	77.03	4.20	-1.11	10.43	0.20
			180	78.21			0.28		
			200	80.52			0.83		
		r	145	63.85					
		r	160	60.94	63.22	1.98	-1.15	4.91	0.08
			180	64.41			0.60		
			200	64.32			0.55		
PmB-E 45/80- 65	1	f	160	95.36	95.17	0.17	1.15	0.42	-0.01
			180	95.06			-0.64		
			200	95.08			-0.52		
	2	f	160	80.21	85.17	4.53	-1.09	11.25	0.15
			180	89.09			0.87		
			200	86.21			0.23		
		r	160	70.72	74.32	3.28	-1.10	8.15	0.11
			180	77.14			0.86		
			200	75.10			0.24		
	4	f	160	98.20	98.46	0.22	-1.15	0.56	0.01
			180	98.61			0.69		
			200	98.56			0.46		
PmB-E 65/105- 60	2	f	160	70.34	85.34	13.08	-1.15	32.49	0.60
			180	91.29			0.46		
			200	94.38			0.69		
		r	145	74.54					
		r	160	79.36	81.02	1.44	-1.15	3.57	0.06
			180	81.84			0.57		
			200	81.86			0.58		
		r-Rot	160	82.66	85.83	3.59	-0.88	8.92	0.18
			180	85.09			-0.21		
			200	89.73			1.09		
	3	f	160	97.82	98.36	0.47	-1.14	1.18	0.02
			180	98.71 ^A			0.74		
			200	98.55			0.40		
	5	f	160	85.73	89.82	3.55	-1.15	8.82	0.15
			180	92.04			0.62		
			200	91.70			0.53		

PmB-E 90/150- 60	1	f	160	91.03	91.94	1.65	-0.55	4.09	0.00
			180	93.84			1.15		
			200	90.95 ^A			-0.60		
	3	f	160	98.15	97.80	0.34	1.02	0.85	-0.01
			180	97.47			-0.98		
			200	97.79			-0.04		
		r	160	93.42	93.61	0.42	-0.47	1.03	0.00
			180	94.09			1.15		
			200	93.33			-0.68		
PmB 25/55- 80	2	f	160	65.22	76.09	9.70	-1.12	24.09	0.47
			180	79.21			0.32		
			200	83.85			0.80		
	3	f	160	97.98	97.96	0.02	1.00	0.05	0.00
			180	97.96			0.00		
			200	97.94			-1.00		
		r	145	95.71 ^B	96.14	0.27	0.85	0.66	0.00
			160	96.37			-1.10		
			180	95.85			0.25		
		r-Rot	160	95.42	95.03	0.45	0.87	1.11	-0.01
			180	94.54			-1.09		
			200	95.13			0.22		
PmB 45/80- 80	1	f	160	95.55	95.80	0.34	-0.74	0.85	0.00
			180	96.19			1.14		
			200	95.67			-0.39		
		r	145	83.97	86.30	0.31	-0.96	0.76	0.01
			160	86.01			1.04		
			180	86.62			-0.08		
	2	f	160	70.73	81.40	9.24	-1.15	22.96	0.40
			180	86.69			0.57		
			200	86.79			0.58		
	5	f	160	67.03	72.54	5.04	-1.09	12.53	0.25
			180	73.66			0.22		
			200	76.93			0.87		
PmB 65/105- 80	1	f	160	97.71	97.87	0.15	-1.09	0.37	0.00
			180	98.00			0.88		
			200	97.90			0.20		
		r	160	96.75	96.25	0.44	1.13	1.10	-0.02
			180	96.09			-0.36		
			200	95.91			-0.77		
	2	f	160	86.17	92.41	5.41	-1.15	13.43	0.24
			180	95.50			0.57		
			200	95.57			0.58		
	1	f	160	99.17	99.28	0.10	-1.13	0.25	0.00

PmB 90/150- 80			180	99.36			0.77		
			200	99.32 ^A			0.37		
	3	f	160	98.63	98.60	0.06	0.58	0.14	-
			180	98.53			-1.15		
			200	98.63			0.58		
			160	45.63 ^A			-1.12	66.82	1.29
	4	f	180	84.92	75.88	26.90	0.34		
			200	97.10			0.79		
			r	145			15.69 ^C		
			r	160			45.40 ^D		
		r	180	46.00 ^D	60.60	25.80	-0.59	64.10	1.12
			200	90.39 ^D			-0.57		
							1.15		

Tabelle 34: Übersicht über die ermittelten Werte des $R_{3,2 \text{ kPa}}$. Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB; z = z-score; Steig. = Steigung; gelb hinterlegt = Wert ausserhalb der SD; A = Klümpchen und Verdickungen nach dem Erwärmen; B = zum Abfüllen der DSR-Formen musste das PmB nochmal für 15 min im Ofen auf 150 °C erwärmt werden; C = konnte nicht vollständig homogenisiert werden; D = körnige Struktur während des Trimmens im DSR sichtbar

Rohdaten der R ₁₀ kPa									
PmB	Herst.	f / r / r-Rot	PAT [°C]	R ₁₀ kPa [%]	MW	SD	z	KI	Steig. Trend- linie
PmB-E 25/55- 65	2	f	160	59.14	63.26	12.50	-0.33	31.05	0.45
			180	53.34			-0.79		
			200	77.30			1.12		
	3	f	160	98.35	98.21	0.17	0.82	0.42	-0.01
			180	98.26			0.29		
			200	98.02			-1.11		
	5	f	160	59.93	65.96	5.51	-1.09	13.70	0.27
			180	67.19			0.22		
			200	70.75			0.87		
		r	145	58.51					
		r	160	56.49	58.98	2.21	-1.13	5.48	0.11
			180	59.74			0.35		
			200	60.70			0.78		
		f	160	81.06	80.69	0.33	1.14	0.81	-0.02
			180	80.56			-0.40		
			200	80.45			-0.74		
PmB-E 45/80- 65	1	f	160	81.06	80.69	0.33	1.14	0.81	-0.02
			180	80.56			-0.40		
			200	80.45			-0.74		
	2	f	160	63.76	73.37	8.84	-1.09	21.96	0.29
			180	81.15			0.88		
			200	75.20			0.21		
		r	160	58.31	62.53	4.07	-1.04	10.12	0.11
			180	66.44			0.96		
			200	62.84			0.08		
	4	f	160	96.94	97.80	0.75	-1.15	1.86	0.03
			180	98.30			0.66		
			200	98.17			0.49		
PmB-E 65/105- 60	2	f	160	40.92	61.07	18.27	-1.10	45.39	0.89
			180	65.72			0.25		
			200	76.56			0.85		
		r	145	46.72					
		r	160	43.38	44.95	1.38	-1.13	3.44	0.05
			180	46.00			0.76		
			200	45.46			0.37		
		r-Rot	160	53.47	58.28	7.47	-0.64	18.54	0.34
			180	54.49			-0.51		
			200	66.88			1.15		
	3	f	160	98.58	98.68	0.14	-0.71	0.35	0.00
			180	98.84 ^A			1.14		
			200	98.62			-0.43		
	5	f	160	62.59	67.72	4.83	-1.06	11.99	0.15
			180	72.17			0.92		
			200	68.41			0.14		

PmB-E 90/150- 60	1	f	160	10.85	20.44	8.63	-1.11	21.45	0.42
			180	22.89			0.28		
			200	27.59 ^A			0.83		
	3	f	160	98.48	97.41	1.09	0.98	2.71	-0.03
			180	96.30			-1.02		
			200	97.45			0.04		
		r	160	83.56	84.70	2.04	-0.56	5.06	0.00
			180	87.05			1.15		
			200	83.48			-0.60		
PmB 25/55- 80	2	f	160	46.62	58.81	11.79	-1.03	29.28	0.59
			180	59.65			0.07		
			200	70.15			0.96		
	3	f	160	98.71	98.66	0.04	1.12	0.10	0.00
			180	98.63			-0.80		
			200	98.65			-0.32		
		r	145	97.04 ^B	97.33	0.15	1.01	0.36	0.00
			160	97.48			-0.99		
			180	97.19			-0.02		
		r-Rot	160	96.84	96.54	0.34	0.89	0.83	-0.01
			180	96.18			-1.08		
			200	96.61			0.20		
PmB 45/80- 80	1	f	160	77.97	84.00	5.43	-1.11	13.49	0.19
			180	88.50			0.83		
			200	85.53			0.28		
		r	145	71.87	74.59	1.05	-0.71	2.62	0.01
			160	73.85			1.14		
			180	75.80			-0.44		
		r	200	74.13			-0.44	33.32	0.61
			160	44.24	59.66	13.41	-1.15		
			180	66.09			0.48		
			200	68.64			0.67		
	5	f	160	58.82	64.53	5.44	-1.05	13.50	0.27
			180	65.14			0.11		
			200	69.64			0.94		
PmB 65/105- 80	1	f	160	92.90	94.56	1.45	-1.14	3.61	0.06
			180	95.59			0.71		
			200	95.19			0.43		
		r	160	96.24	96.22	0.02	1.09	0.04	0.00
			180	96.21			-0.87		
			200	96.22			-0.22		
	2	f	160	62.18	77.01	12.89	-1.15	32.01	0.58
			180	83.36			0.49		
			200	85.49			0.66		
	1	f	160	98.94	99.03	0.08	-1.10	0.20	0.00

PmB 90/150- 80			180	99.05			0.24		
			200	99.10 ^A			0.86		
	3	f	160	99.07	98.95	0.11	1.09	0.27	-0.01
			180	98.93			-0.22		
			200	98.86			-0.87		
	4	f	160	18.52 ^A	46.32	34.26	-0.81	85.10	1.65
			180	35.85			-0.31		
			200	84.59			1.12		
		r	145	3.66 ^C					
		r	160	32.94 ^D	44.66	14.38	-0.81	35.71	0.69
			180	40.33 ^D			-0.30		
			200	60.70 ^D			1.12		

Tabelle 35: Übersicht über die ermittelten Werte des $R_{10 \text{ kPa}}$. Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB; z = z-score; Steig. = Steigung; gelb hinterlegt = Wert ausserhalb der SD; A = Klümpchen und Verdickungen nach dem Erwärmen; B = zum Abfüllen der DSR-Formen musste das PmB nochmal für 15 min im Ofen auf 150 °C erwärmt werden; C = konnte nicht vollständig homogenisiert werden; D = körnige Struktur während des Trimmens im DSR sichtbar

Rohdaten der R_{diff}									
PmB	Herst.	f / r / r-Rot	PAT [°C]	R_{diff} [%]	MW	SD	z	KI	Steig. Trend- linie
PmB-E 25/55- 65	2	f	160	9.04		7.92	0.40	19.67	-0.30
			180	11.70			0.74		
			200	-3.15			-1.14		
	3	f	160	-0.80		0.03	1.06	0.06	0.00
			180	-0.83			-0.13		
			200	-0.85			-0.93		
	5	f	160	17.20		2.56	1.07	6.35	-0.13
			180	14.09			-0.15		
			200	12.13			-0.92		
		r	145	8.37					
		r	160	7.30		0.95	0.60	2.36	-0.04
			180	7.25			0.55		
PmB-E 45/80- 65	1	f	160	15.00		0.20	-1.08	0.49	0.01
			180	15.25			0.19		
			200	15.39			0.89		
	2	f	160	20.51		5.91	1.09	14.67	-0.19
			180	8.91			-0.87		
			200	12.77			-0.22		
		r	160	17.55		1.87	0.87	4.64	-0.03
			180	13.88			-1.09		
			200	16.33			0.22		
	4	f	160	1.29		0.54	1.15	1.35	-0.02
			180	0.31			-0.65		
			200	0.39			-0.50		
PmB-E 65/105- 60	2	f	160	41.82		11.55	1.06	28.69	-0.57
			180	28.01			-0.14		
			200	18.88			-0.93		
		r	145	37.32					
		r	160	45.33		0.77	1.04	1.91	-0.02
			180	43.80			-0.95		
			200	44.46			-0.09		
		r-Rot	160	35.32		5.88	0.52	14.62	-0.25
			180	35.97			0.63		
			200	25.47			-1.15		
	3	f	160	-0.77		0.39	-1.15	0.96	0.02
			180	-0.13 ^A			0.50		
			200	-0.07			0.65		
	5	f	160	26.99		2.78	0.84	6.89	-0.04
			180	21.59			-1.11		
			200	25.40			0.27		

PmB-E 90/150- 60	1	f	160	88.08	9.40	1.10	23.34	-0.46
			180	75.61		-0.23		
			200	69.67 ^A		-0.86		
	3	f	160	-0.33	0.77	-0.96	1.90	0.02
			180	1.20		1.03		
			200	0.35		-0.07		
		r	160	10.55	1.77	0.58	4.40	0.00
			180	7.48		-1.15		
			200	10.55		0.58		
PmB 25/55- 80	2	f	160	28.53	6.23	0.86	15.48	-0.30
			180	24.69		0.24		
			200	16.34		-1.10		
	3	f	160	-0.74	0.03	-0.73	0.08	0.00
			180	-0.68		1.14		
			200	-0.73		-0.41		
		r	145	-1.39 ^B	0.14	0.58	0.34	0.00
			160	-1.16		-1.15		
			180	-1.40		0.58		
		r-Rot	160	-1.49	0.13	0.83	0.32	0.00
			180	-1.74		-1.11		
			200	-1.56		0.28		
PmB 45/80- 80	1	f	160	18.40	5.42	1.12	13.45	-0.20
			180	7.99		-0.80		
			200	10.60		-0.32		
		r	145	14.42	0.94	0.61	2.32	0.00
			160	14.14		-1.15		
			180	12.49		0.54		
	2	f	160	37.45	8.84	1.14	21.97	-0.41
			180	23.76		-0.41		
			200	20.91		-0.73		
	5	f	160	12.25	1.44	0.80	3.59	-0.07
			180	11.57		0.33		
			200	9.48		-1.12		
PmB 65/105- 80	1	f	160	4.92	1.34	1.15	3.33	-0.05
			180	2.46		-0.69		
			200	2.76		-0.46		
		r	160	0.53	0.44	1.13	1.10	-0.02
			180	-0.12		-0.34		
			200	-0.32		-0.79		
	2	f	160	27.84	9.42	1.15	23.40	-0.43
			180	12.72		-0.46		
			200	10.55		-0.69		
	1	f	160	0.23	0.05	-0.58	0.11	0.00

PmB 90/150- 80			180	0.31		1.15		
			200	0.23 ^A		-0.58		
	3	f	160	-0.44	0.11	-0.76	0.26	0.01
			180	-0.40		-0.38		
			200	-0.24		1.13		
	4	f	160	59.40 ^A	26.40	0.61	65.59	-1.16
			180	57.78		0.55		
			200	12.88		-1.15		
		r	145	76.69 ^C	10.64		26.42	0.14
		r	160	27.45 ^D		0.30		
			180	12.33 ^D		-1.12		
			200	32.85 ^D		0.81		

Tabelle 36: Übersicht über die ermittelten Werte des R_{diff} . Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB; z = z-score; Steig. = Steigung; gelb hinterlegt = Wert ausserhalb der SD; A = Klümpchen und Verdickungen nach dem Erwärmen; B = zum Abfüllen der DSR-Formen musste das PmB nochmal für 15 min im Ofen auf 150 °C erwärmt werden; C = konnte nicht vollständig homogenisiert werden; D = körnige Struktur während des Trimmens im DSR sichtbar

Rohdaten der $J_{nr\ 3.2\ kPa}$									
PmB	Herst.	f / r / r-Rot	PAT [°C]	$J_{nr\ 3.2}$ kPa [%]	MW	SD	z	KI	Steig. Trend- linie
PmB-E 25/55- 65	2	f	160	0.1014	5.86	7.92	0.40	19.67	-0.30
			180	0.1128			0.74		
			200	0.0732			-1.14		
	3	f	160	0.0220	-0.83	0.03	1.06	0.06	0.00
			180	0.0237			-0.13		
			200	0.0263			-0.93		
	5	f	160	0.1676	14.47	2.56	1.07	6.35	-0.13
			180	0.1379			-0.15		
			200	0.1147			-0.92		
		r	145	0.1027					
		r	160	0.0877	6.73	0.95	0.60	2.36	-0.04
			180	0.0764			0.55		
PmB-E 45/80- 65	1	f	160	0.0672	15.21	0.20	-1.08	0.49	0.01
			180	0.0715			0.19		
			200	0.0703			0.89		
	2	f	160	0.1506	14.06	5.91	1.09	14.67	-0.19
			180	0.8660			-0.87		
			200	0.1003			-0.22		
		r	160	0.1301	15.92	1.87	0.87	4.64	-0.03
			180	0.1102			-1.09		
			200	0.1136			0.22		
	4	f	160	0.0178	0.66	0.54	1.15	1.35	-0.02
			180	0.0134			-0.65		
			200	0.0142			-0.50		
PmB-E 65/105- 60	2	f	160	0.4316	29.57	11.55	1.06	28.69	-0.57
			180	0.1180			-0.14		
			200	0.0755			-0.93		
		r	145	0.2583					
		r	160	0.2318	44.53	0.77	1.04	1.91	-0.02
			180	0.1940			-0.95		
			200	0.1973			-0.09		
		r-Rot	160	0.1763	32.25	5.88	0.52	14.62	-0.25
			180	0.1518			0.63		
			200	0.1047			-1.15		
	3	f	160	0.0155	-0.32	0.39	-1.15	0.96	0.02
			180	0.0100			0.50		
			200	0.0117			0.65		
	5	f	160	0.2059	24.66	2.78	0.84	6.89	-0.04
			180	0.1218			-1.11		
			200	0.1293			0.27		

PmB-E 90/150- 60	1	f	160	0.2779	77.79	9.40	1.10	23.34	-0.46
			180	0.1566			-0.23		
			200	0.1841			-0.86		
	3	f	160	0.0217	0.41	0.77	-0.96	1.90	0.02
			180	0.0358			1.03		
			200	0.0297			-0.07		
		r	160	0.0837	9.53	1.77	0.58	4.40	0.00
			180	0.0733			-1.15		
			200	0.0848			0.58		
PmB 25/55- 80	2	f	160	0.2685	23.19	6.23	0.86	15.48	-0.30
			180	0.1250			0.24		
			200	0.1008			-1.10		
	3	f	160	0.0115	-0.72	0.03	-0.73	0.08	0.00
			180	0.0122			1.14		
			200	0.0120			-0.41		
		r	145	0.0167	-1.24	0.14	0.58	0.34	0.00
			160	0.0153			-1.15		
			180	0.0170			0.58		
		r-Rot	160	0.0172	-1.60	0.13	0.83	0.32	0.00
			180	0.0192			-1.11		
			200	0.0175			0.28		
PmB 45/80- 80	1	f	160	0.0583	12.33	5.42	1.12	13.45	-0.20
			180	0.0483			-0.80		
			200	0.0603			-0.32		
		r	145	0.1250	13.57	0.94	0.61	2.32	0.00
			160	0.1158			-1.15		
			180	0.1107			0.54		
		r	160	0.1166			0.54	21.97	-0.41
			180	0.3037			1.14		
			200	0.0939			-0.41		
	2	f	160	0.1215	27.37	8.84	-0.73	3.59	-0.07
			180	0.1839			0.80		
			200	0.1402			0.33		
PmB 65/105- 80	1	f	160	0.0266	3.38	1.34	1.15	3.33	-0.05
			180	0.0220			-0.69		
			200	0.0229			-0.46		
		r	160	0.0238	0.03	0.44	1.13	1.10	-0.02
			180	0.0255			-0.34		
			200	0.0254			-0.79		
	2	f	160	0.1611	17.04	9.42	1.15	23.40	-0.43
			180	0.0512			-0.46		
			200	0.0498			-0.69		
	1	f	160	0.0101	0.26	0.05	-0.58	0.11	0.00

PmB 90/150- 80			180	0.0080			1.15		
			200	0.0088			-0.58		
	3	f	160	0.0119	-0.36	0.11	-0.76	0.26	0.01
			180	0.0134			-0.38		
			200	0.0122			1.13		
	4	f	160	2.2348	43.35	26.40	0.61	65.59	-1.16
			180	0.4675			0.55		
			200	0.0529			-1.15		
		r	145	3.0304					
		r	160	1.6491	24.21	10.64	0.30	26.42	0.14
			180	1.3719			-1.12		
			200	0.1816			0.81		

Tabelle 37: Übersicht über die ermittelten Werte des $J_{nr\ 3.2\ kPa}$. Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB; z = z-score; Steig. = Steigung; gelb hinterlegt = Wert ausserhalb der SD; A = Klümpchen und Verdickungen nach dem Erwärmen; B = zum Abfüllen der DSR-Formen musste das PmB nochmal für 15 min im Ofen auf 150 °C erwärmt werden; C = konnte nicht vollständig homogenisiert werden; D = körnige Struktur während des Trimmens im DSR sichtbar

Rohdaten der J _{nr 10 kPa}									
PmB	Herst.	f / r / r-Rot	PAT [°C]	J _{nr 10 kPa} [%]	MW	SD	z	KI	Steig. Trend- linie
PmB-E 25/55- 65	2	f	160	0.1207	0.1078	0.0375	0.3444	0.0930	0.00
			180	0.1371			0.7823		
			200	0.0656			-1.1267		
	3	f	160	0.1130	0.0464	0.0577	1.1545	0.1432	0.00
			180	0.0122			-		
			200	0.0141			-		
	5	f	160	0.2632	0.2215	0.0411	1.0135	0.1021	0.00
			180	0.2204			-		
			200	0.1810			-		
		r	145	0.1254	0.1013	0.0070	0.6874	0.0175	0.00
		r	160	0.1061			-1.1472		
			180	0.0932			0.4598		
		r	160	0.1061	0.1013	0.0070	0.6874	0.0175	0.00
			180	0.0932			-1.1472		
			200	0.1045			0.4598		
PmB-E 45/80- 65	1	f	160	0.2380	0.2425	0.0039	-1.1486	0.0097	0.00
			180	0.2451			0.6771		
			200	0.2443			0.4714		
	2	f	160	0.2700	0.1930	0.0686	1.1221	0.1705	0.00
			180	0.1383			-0.7971		
			200	0.1707			-		
		r	160	0.1961	0.1784	0.0162	1.0889	0.0403	0.00
			180	0.1642			-		
			200	0.1750			-0.2116		
	4	f	160	0.0260	0.0184	0.0066	1.1491	0.0164	0.00
			180	0.0140			-		
			200	0.0153			-		
PmB-E 65/105- 60	2	f	160	0.9171	0.5742	0.3095	1.1079	0.7689	-0.02
			180	0.4900			-		
			200	0.3155			-		
	r	r	145	0.5757	0.6722	0.0405	1.1019	0.1005	0.00
			160	0.7168			-		
			180	0.6378			-		
	r-Rot	r-Rot	160	0.4972	0.4415	0.0923	0.6037	0.2293	0.00
			180	0.6378			-		
			200	0.6620			-		
	r-Rot	r-Rot	160	0.4972	0.4415	0.0923	0.6037	0.2293	0.00
			180	0.6378			-		
			200	0.6620			-		

			180	0.4923			0.5506		
			200	0.3349			-1.1543		
PmB-E 90/150- 60	3	f	160	0.0080	0.0083	0.0010	-	0.0024	0.00
							0.3046		
			180	0.0075 ^A			-		
	5	f					0.8123		
			200	0.0094			1.1169		
			160	0.5315	0.4786	0.0598	0.8838	0.1486	0.00
			180	0.4137			-1.0855		
			200	0.4907			0.2017		
	1	f	160	5.6985	3.8905	1.5945	1.1339	3.9609	-0.08
			180	3.2878			-		
							0.3780		
			200	2.6853 ^A			-		
							0.7559		
	3	f	160	0.0129	0.0257	0.0132	-	0.0327	0.00
							0.9696		
			180	0.0392			1.0278		
			200	0.0249			-		
							0.0582		
		r	160	0.1807	0.1650	0.0268	0.5866	0.0666	0.00
			180	0.1340			-1.1547		
			200	0.1802			0.5680		
PmB 25/55- 80	2	f	160	0.4498	0.3027	0.1317	1.1170	0.3272	-0.01
			180	0.2625			-		
							0.3049		
			200	0.1957			-		
							0.8120		
	3	f	160	0.0063	0.0067	0.0004	-1.0441	0.0009	0.00
			180	0.0070			0.9492		
			200	0.0067			0.0949		
		r	145	0.0105 ^B					
			160	0.0095	0.0100	0.0005	-1.1286	0.0012	0.00
			180	0.0104			0.7759		
			200	0.0102			0.3527		
			160	0.0108	0.0115	0.0008	-	0.0021	0.00
		r-Rot					0.8006		
			180	0.0124			1.1209		
			200	0.0112			-		
							0.3203		
PmB 45/80- 80	1	f	160	0.2588	0.1793	0.0736	1.0813	0.1827	0.00
			180	0.1137			-		
							0.8914		
			200	0.1653			-		
							0.1899		
		r	145	0.2022					
			160	0.1963	0.1912	0.0104	0.4889	0.0259	0.00
			180	0.1792			-1.1504		

PmB 65/105- 80	2	f	200	0.1981	0.4431	0.2284	0.6615	0.5673	-0.01
			160	0.7062			1.1521		
			180	0.2962			-		
							0.6433		
	5	f	200	0.3269	0.2034	0.0360	-	0.0894	0.00
							0.5088		
			160	0.2433			1.1101		
			180	0.1933			-		
	1	f			0.0497	0.0156	0.2798	0.0388	0.00
			200	0.1735			-		
							0.8303		
			160	0.0676			1.1478		
PmB 90/150- 80	2	f	180	0.0390	0.0213	0.0013	-	0.0033	0.00
							0.6827		
			200	0.0424			-0.4651		
	r	r	160	0.0228	0.0213	0.0013	1.1014	0.0033	0.00
			180	0.0210			-		
							0.2503		
			200	0.0202			-0.8511		
	2	f	160	0.4626	0.2699	0.1676	1.1501	0.4163	-0.01
			180	0.1884			-		
							0.4861		
			200	0.1586			-		
PmB 90/150- 80	1	f			0.0084	0.0003	0.6640	0.0006	0.00
			160	0.0087			1.0596		
			180	0.0084			-0.1325		
			200	0.0082 ^A			-		
	3	f			0.0071	0.0008	0.9272	0.0019	0.00
			160	0.0062			-1.1523		
			180	0.0075			0.5121		
			200	0.0076			0.6402		
	4	f	160	4.0880 ^A	2.4041	1.9104	0.8815	4.7456	-0.09
			180	2.7962			0.2052		
			200	0.3281			-1.0867		
	r	r	145	4.5037 ^C	1.5380	0.6877		1.7082	-0.03
			160	2.1912 ^D			0.9499		
			180	1.6023 ^D			0.0936		
			200	0.8204 ^D			-1.0435		

Tabelle 38: Übersicht über die ermittelten Werte des $J_{nr 10 \text{ kPa}}$. Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB; z = z-score; Steig. = Steigung; gelb hinterlegt = Wert ausserhalb der SD; A = Klümpchen und Verdickungen nach dem Erwärmen; B = zum Abfüllen der DSR-Formen musste das PmB nochmal für 15 min im Ofen auf 150 °C erwärmt werden; C = konnte nicht vollständig homogenisiert werden; D = körnige Struktur während des Trimmens im DSR sichtbar

Rohdaten der $J_{nr\ diff}$									
PmB	Herst.	f / r / r-Rot	PAT [°C]	$J_{nr\ diff}$ [%]	MW	SD	z	KI	Steig. Trend- linie
PmB-E 25/55- 65	2	f	160	18.98	10.06	17.75	0.50	44.09	-0.73
			180	21.58			0.65		
			200	-10.38			-1.15		
	3	f	160	-48.56	-47.92	1.16	-0.55	2.88	0.05
			180	-48.62			-0.60		
			200	-46.58			1.15		
	5	f	160	57.05	58.19	1.42	-0.81	3.52	0.02
			180	59.78			1.12		
			200	57.75			-0.31		
		r	145	22.08					
		r	160	20.95	20.72	1.49	0.15	3.71	-0.05
			180	22.09			0.92		
			200	19.13			-1.07		
PmB-E 45/80- 65	1	f	160	254.10	247.99	5.78	1.06	14.37	-0.17
			180	242.60			-0.93		
			200	247.26			-0.13		
	2	f	160	79.23	69.70	9.76	0.98	24.25	-0.23
			180	59.72			-1.02		
			200	70.16			0.05		
		r	160	50.69	51.25	2.48	-0.23	6.17	0.08
			180	49.10			-0.87		
			200	53.97			1.09		
	4	f	160	45.65	19.22	22.96	1.15	57.05	-0.95
			180	4.18			-0.65		
			200	7.82			-0.50		
PmB-E 65/105- 60	2	f	160	122.51	250.98	111.29	-1.15	276.47	4.89
			180	312.39			0.55		
			200	318.04			0.60		
		r	145	122.87					
		r	160	209.18	224.46	13.66	-1.12	33.92	0.66
			180	228.71			0.31		
			200	235.48			0.81		
		r-Rot	160	182.08	208.76	23.21	-1.15	57.66	0.95
			180	224.32			0.67		
			200	219.88			0.48		
	3	f	160	-48.06	-31.05	14.92	-1.14	37.07	0.70
			180	-24.93 ^A			0.41		
			200	-20.16			0.73		
	5	f	160	158.16	225.82	61.87	-1.09	153.70	3.03
			180	239.78			0.23		
			200	279.52			0.87		

PmB-E 90/150- 60	1	f	160	1950.33	1769.25	356.72	0.51	886.15	-14.80
			180	1999.12			0.64		
			200	1358.31 ^A			-1.15		
	3	f	160	-40.73	-15.81	25.15	-0.99	62.47	0.61
			180	9.56			1.01		
			200	-16.27			-0.02		
		r	160	115.89	103.77	18.21	0.67	45.24	-0.08
			180	82.83			-1.15		
			200	112.60			0.48		
PmB 25/55- 80	2	f	160	67.56	90.59	21.45	-1.07	53.29	0.67
			180	110.01			0.91		
			200	94.19			0.17		
	3	f	160	-44.94	-43.96	0.98	-1.00	2.42	0.02
			180	-42.99			1.00		
			200	-43.96			0.00		
		r	145	-37.10 ^B					
			160	-37.84	-37.88	1.14	0.04	2.83	0.03
			180	-39.04			-1.02		
			200	-36.76			0.98		
		r-Rot	160	-36.91	-36.10	0.75	-1.09	1.85	0.02
			180	-35.44			0.88		
			200	-35.95			0.20		
PmB 45/80- 80	1	f	160	343.70	217.74	110.81	1.14	275.27	-4.24
			180	135.27			-0.74		
			200	174.26			-0.39		
		r	145	61.85					
			160	69.50	67.11	4.55	0.52	11.30	0.01
			180	61.87			-1.15		
			200	69.97			0.63		
	2	f	160	129.81	171.46	42.86	-0.97	106.48	0.98
			180	215.44			1.03		
			200	169.12			-0.05		
	5	f	160	32.32	34.61	2.90	-0.79	7.20	0.03
			180	37.87			1.12		
			200	33.64			-0.33		
PmB 65/105- 80	1	f	160	154.39	105.78	42.27	1.15	105.01	-1.73
			180	77.61			-0.67		
			200	85.35			-0.48		
		r	160	-4.06	-13.99	8.73	1.14	21.68	-0.41
			180	-17.49			-0.40		
			200	-20.43			-0.74		
	2	f	160	187.10	224.57	40.85	-0.92	101.48	0.79
			180	268.12			1.07		
			200	218.50			-0.15		
	1	f	160	-14.43	-5.38	9.93	-0.91	24.67	0.19

PmB 90/150- 80			180	5.24			1.07		
			200	-6.96 ^A			-0.16		
	3	f	160	-48.08	-43.37	5.35	-0.88	13.28	0.26
			180	-44.47			-0.21		
			200	-37.56			1.09		
			160	82.92 ^A	366.98	246.24	-1.15	611.70	10.93
	4	f	180	498.07			0.53		
			200	519.94			0.62		
			r	145			48.62 ^C		
			r	160	133.85	189.00	-0.53	469.49	7.98
				180			-0.62		
				200			1.15		

Tabelle 39: Übersicht über die ermittelten Werte des $J_{nr \text{ diff.}}$. Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB; z = z-score; Steig. = Steigung; gelb hinterlegt = Wert ausserhalb der SD; A = Klümpchen und Verdickungen nach dem Erwärmen; B = zum Abfüllen der DSR-Formen musste das PmB nochmal für 15 min im Ofen auf 150 °C erwärmt werden; C = konnte nicht vollständig homogenisiert werden; D = körnige Struktur während des Trimmens im DSR sichtbar

Boxplot-Werte der absoluten Werte							
BKW	Wert	Frische PmBs			Rückgewonnene PmBs		
		160 °C	180 °C	200 °C	160 °C	180 °C	200 °C
Penetration	Q1	58	56	58	42	44	42
	Q3	81	88	87	62	60	61
	I	23	32	29	20	16	19
	Q2	69	69	72	52	52	52
	MW	72	73	74	54	54	54
R+K	Q1	76.8	77.8	78.6	64.7	65.1	64.8
	Q3	87.0	88.0	89.0	76.2	82.1	84.5
	I	10.2	10.2	10.4	11.6	17.1	19.8
	Q2	82.5	84.0	85.0	71.6	74.7	73.2
	MW	81.6	82.9	83.3	72.7	75.1	74.6
I _p	Q1	4.2	4.8	4.6	2.0	2.6	2.6
	Q3	5.8	6.7	6.7	5.0	5.1	5.0
	I	1.6	1.9	2.1	2.9	2.5	2.5
	Q2	5.1	5.5	5.9	3.7	4.2	3.8
	MW	5.2	5.6	5.8	3.7	3.9	3.9
Elastische Rückstellung	Q1	93	94	92	83	84	84
	Q3	96	98	98	92	93	93
	I	3	4	6	9	9	9
	Q2	95	95	96	89	88	88
	MW	94	95	95	88	88	88
T _{BTSV}	Q1	49.1	48.7	47.6	51.6	51.6	51.5
	Q3	54.1	53.9	53.8	57.9	58.2	58.0
	I	5.0	5.2	6.2	6.3	6.6	6.5
	Q2	50.5	50.1	50.6	53.9	54.3	54.5
	MW	50.8	51.0	50.9	54.7	54.9	54.8
δ _{BTSV}	Q1	60.0	59.4	59.3	58.0	57.5	57.4
	Q3	63.5	63.7	63.6	62.8	62.8	63.1
	I	3.5	4.3	4.3	4.9	5.4	5.7
	Q2	61.2	61.6	61.2	62.2	62.2	62.9
	MW	61.8	61.6	61.6	60.5	60.4	60.6
R _{3,2} kPa	Q1	70.73	86.69	86.79	72.88	78.32	82.97
	Q3	97.82	97.96	97.90	94.92	94.43	94.68
	I	27.09	11.27	11.11	22.04	16.11	11.72
	Q2	91.03	95.06	95.57	84.34	85.86	90.06
	MW	84.55	90.58	92.17	80.71	82.17	86.83
R ₁₀ kPa	Q1	58.82	65.72	70.75	54.23	55.80	61.24
	Q3	98.35	98.26	98.02	93.07	93.90	93.04
	I	39.53	32.54	27.27	38.85	38.10	31.80
	Q2	63.76	81.15	84.59	66.08	71.12	70.51
	MW	69.93	77.41	82.11	69.26	71.94	74.44
R _{diff}	Q1	0.23	0.31	0.23	2.22	1.72	1.17
	Q3	27.84	21.59	15.39	24.98	13.53	23.19

$J_{nr\ 3.2\ kPa}$	I	27.61	21.28	15.16	22.75	11.81	22.02
	Q2	15.00	11.57	10.55	12.35	9.91	12.32
	MW	19.33	15.04	11.13	15.55	12.99	14.63
	Q1	0.0217	0.0220	0.0229	0.0388	0.0375	0.0403
	Q3	0.2059	0.1250	0.1008	0.1648	0.1415	0.1159
$J_{nr\ 10\ kPa}$	I	0.1842	0.1030	0.0779	0.1260	0.1041	0.0756
	Q2	0.1014	0.0715	0.0603	0.1018	0.0933	0.0962
	MW	0.2262	0.1262	0.0667	0.2531	0.2150	0.0945
	Q1	0.0260	0.0140	0.0153	0.0436	0.0391	0.0413
	Q3	0.4626	0.2625	0.2443	0.4220	0.4140	0.3007
$J_{nr\ diff}$	I	0.4366	0.2485	0.2290	0.3784	0.3750	0.2594
	Q2	0.2433	0.1383	0.1653	0.1884	0.1491	0.1776
	MW	0.6903	0.4246	0.2681	0.4128	0.3347	0.2517
	Q1	-14.43	5.24	-10.38	2.19	-8.92	-10.54
	Q3	154.39	239.78	218.50	104.29	77.59	193.06
$J_{nr\ diff}$	I	168.82	234.54	228.88	102.10	86.51	203.60
	Q2	67.56	59.78	70.16	41.78	35.60	61.97
	MW	163.76	196.92	164.38	60.24	59.38	96.98

Tabelle 40: Übersicht über die Werte der Boxplots der absoluten Werte. I = Interquartilsabstand; Q2 = Median

Boxplot-Werte der relativen Abweichungen bei 160 °C PAT

BKW	Wert	Frische PmBs		Rückgewonnene PmBs	
		180 °C	200 °C	180 °C	200 °C
Penetration	Q1	-3.1 %	0.0 %	-4.7 %	-2.2 %
	Q3	4.3 %	4.7 %	1.0 %	5.7 %
	I	7.5 %	4.7 %	5.7 %	7.9 %
	Q2	1.1 %	0.7 %	0.0 %	1.1 %
	MW	1.4 %	2.9 %	0.2 %	1.4 %
R+K	Q1	0.0 %	0.0 %	0.6 %	-0.3 %
	Q3	4.0 %	3.4 %	4.0 %	2.7 %
	I	4.0 %	3.4 %	3.5 %	3.0 %
	Q2	1.3 %	1.7 %	3.1 %	0.1 %
	MW	1.7 %	2.2 %	3.1 %	2.6 %
I _P	Q1	-1.7 %	2.0 %	-3.1 %	-4.1 %
	Q3	10.5 %	8.8 %	16.0 %	19.4 %
	I	12.3 %	6.7 %	19.1 %	23.5 %
	Q2	2.1 %	4.8 %	6.8 %	1.0 %
	MW	9.8 %	14.6 %	9.6 %	7.6 %
Elastische Rückstellung	Q1	0.0 %	0.0 %	-1.1 %	-1.1 %
	Q3	1.1 %	1.1 %	1.2 %	1.2 %
	I	1.1 %	1.1 %	2.3 %	2.3 %
	Q2	0.0 %	0.0 %	1.1 %	0.0 %
	MW	0.6 %	0.5 %	0.3 %	0.2 %
T _{BTSV}	Q1	-0.7 %	-0.6 %	-0.2 %	-0.2 %
	Q3	0.6 %	0.8 %	0.9 %	0.4 %
	I	1.3 %	1.4 %	1.0 %	0.6 %
	Q2	0.0 %	0.2 %	0.5 %	0.1 %
	MW	0.6 %	0.4 %	0.3 %	0.2 %
δ _{BTSV}	Q1	-0.3 %	-0.8 %	-0.5 %	-0.1 %
	Q3	0.4 %	0.5 %	0.1 %	0.5 %
	I	0.7 %	1.3 %	0.6 %	0.6 %
	Q2	0.0 %	-0.1 %	0.0 %	0.2 %
	MW	-0.4 %	-0.5 %	-0.1 %	0.2 %
R _{3,2} kPa	Q1	0.0 %	0.0 %	-0.2 %	-0.1 %
	Q3	10.8 %	14.8 %	3.1 %	6.0 %
	I	10.8 %	14.8 %	3.3 %	6.2 %
	Q2	0.9 %	0.7 %	1.0 %	1.7 %
	MW	9.7 %	12.6 %	2.1 %	12.1 %
R ₁₀ kPa	Q1	-0.1 %	0.0 %	0.5 %	-0.1 %
	Q3	27.9 %	37.5 %	6.0 %	7.7 %
	I	28.0 %	37.4 %	5.5 %	7.8 %
	Q2	10.7 %	9.7 %	3.4 %	2.6 %
	MW	21.3 %	40.3 %	5.6 %	12.9 %
R _{diff}	Q1	-54.3 %	-62.1 %	-27.1 %	-18.9 %
	Q3	-5.6 %	-20.9 %	1.2 %	0.0 %

$J_{nr\ 3.2\ kPa}$	I	48.8 %	41.2 %	28.3 %	18.9 %
	Q2	-18.1 %	-42.7 %	-7.5 %	-1.2 %
	MW	-44.3 %	-48.8 %	-20.4 %	-19.6 %
	Q1	-43.6 %	-37.2 %	-14.9 %	-14.3 %
	Q3	6.4 %	2.5 %	4.3 %	1.6 %
$J_{nr\ 10\ kPa}$	I	50.0 %	39.7 %	19.2 %	16.0 %
	Q2	-20.8 %	-27.8 %	-12.7 %	0.3 %
	MW	0.0 %	-26.9 %	-6.2 %	-14.1 %
	Q1	-46.6 %	-53.7 %	-15.2 %	-11.2 %
	Q3	-3.4 %	-5.7 %	-2.7 %	0.6 %
$J_{nr\ diff}$	I	43.1 %	48.0 %	12.5 %	11.9 %
	Q2	-31.6 %	-36.8 %	-9.9 %	-4.6 %
	MW	-18.0 %	-28.7 %	-8.5 %	-11.5 %
	Q1	-48.1 %	-49.3 %	-9.2 %	-2.8 %
	Q3	43.3 %	16.8 %	8.4 %	18.7 %
	I	91.4 %	66.1 %	17.6 %	21.5 %
	Q2	0.1 %	-4.1 %	0.0 %	3.6 %
	MW	17.5 %	13.4 %	27.6 %	139.7 %

Tabelle 41: Übersicht über die Werte der Boxplots der relativen Abweichungen bei 160 °C PAT. I = Interquartilsabstand; Q2 = Median

Boxplot-Werte der relativen Abweichungen bei 180 °C PAT

BKW	Wert	Frische PmBs		Rückgewonnene PmBs	
		160 °C	200 °C	160 °C	200 °C
Penetration	Q1	-4.2 %	-1.1 %	-1.0 %	-0.9 %
	Q3	3.2 %	4.2 %	4.9 %	3.1 %
	I	7.4 %	5.3 %	5.9 %	4.0 %
	Q2	-1.0 %	2.7 %	0.0 %	0.7 %
	MW	-0.9 %	1.6 %	0.2 %	1.3 %
R+K	Q1	-3.9 %	-1.6 %	-3.9 %	-2.6 %
	Q3	0.0 %	1.2 %	-0.6 %	0.0 %
	I	3.9 %	2.8 %	3.3 %	2.6 %
	Q2	-1.3 %	0.0 %	-3.0 %	-1.0 %
	MW	-1.6 %	0.6 %	-2.9 %	-0.5 %
I _P	Q1	-9.5 %	-1.6 %	-13.8 %	-6.3 %
	Q3	1.8 %	5.3 %	3.3 %	5.1 %
	I	11.3 %	6.9 %	17.1 %	11.4 %
	Q2	-2.1 %	3.0 %	-6.4 %	-1.9 %
	MW	-6.0 %	4.5 %	-7.0 %	-1.3 %
Elastische Rückstellung	Q1	-1.1 %	0.0 %	-1.2 %	-1.2 %
	Q3	0.0 %	0.0 %	1.2 %	0.0 %
	I	1.1 %	0.0 %	2.3 %	1.2 %
	Q2	0.0 %	0.0 %	-1.1 %	0.0 %
	MW	-0.5 %	0.0 %	-0.2 %	0.0 %
T _{BTSV}	Q1	-0.6 %	-0.6 %	-0.8 %	-0.5 %
	Q3	0.7 %	0.6 %	0.2 %	0.5 %
	I	1.3 %	1.2 %	1.0 %	0.9 %
	Q2	0.0 %	-0.2 %	-0.5 %	-0.1 %
	MW	-0.5 %	-0.2 %	-0.3 %	-0.1 %
δ _{BTSV}	Q1	-0.4 %	-0.8 %	-0.1 %	0.0 %
	Q3	0.3 %	0.2 %	0.5 %	0.2 %
	I	0.7 %	1.0 %	0.6 %	0.2 %
	Q2	0.0 %	-0.2 %	0.0 %	0.1 %
	MW	0.4 %	-0.1 %	0.1 %	0.3 %
R _{3,2} kPa	Q1	-9.8 %	-0.2 %	-3.0 %	-0.3 %
	Q3	0.0 %	3.0 %	0.2 %	0.6 %
	I	9.8 %	3.1 %	3.2 %	0.9 %
	Q2	-0.9 %	0.0 %	-1.0 %	-0.1 %
	MW	-6.9 %	2.3 %	-2.0 %	9.9 %
R ₁₀ kPa	Q1	-21.8 %	-0.2 %	-5.6 %	-1.9 %
	Q3	0.1 %	6.9 %	-0.4 %	1.3 %
	I	21.9 %	7.1 %	5.2 %	3.3 %
	Q2	-9.7 %	0.1 %	-3.3 %	0.1 %
	MW	-13.2 %	11.3 %	-4.9 %	6.3 %
R _{diff}	Q1	2.8 %	-33.8 %	-11.2 %	-15.4 %
	Q3	100.0 %	7.4 %	23.1 %	35.2 %

$J_{nr\ 3.2\ kPa}$	I	97.2 %	41.2 %	34.4 %	50.6 %
	Q2	16.5 %	-13.9 %	2.1 %	7.1 %
	MW	62.9 %	-18.1 %	-36.7 %	32.7 %
	Q1	-6.0 %	-17.0 %	-3.8 %	-8.0 %
	Q3	77.5 %	10.0 %	17.6 %	4.8 %
	I	83.5 %	27.0 %	21.4 %	12.7 %
$J_{nr\ 10\ kPa}$	Q2	26.3 %	-1.7 %	14.5 %	0.7 %
	MW	66.2 %	-9.4 %	8.0 %	-9.2 %
	Q1	3.6 %	-18.3 %	2.9 %	-8.2 %
	Q3	87.2 %	10.4 %	18.0 %	9.6 %
	I	83.6 %	28.7 %	15.1 %	17.8 %
	Q2	46.2 %	-2.4 %	11.0 %	0.9 %
$J_{nr\ diff}$	MW	83.1 %	-7.1 %	11.5 %	-2.9 %
	Q1	-38.6 %	-19.1 %	-7.7 %	-1.1 %
	Q3	8.1 %	4.4 %	10.3 %	15.9 %
	I	46.7 %	23.5 %	18.0 %	17.0 %
	Q2	-4.6 %	-4.2 %	0.1 %	6.4 %
	MW	7.9 %	-29.6 %	4.3 %	205.4 %

Tabelle 42: Übersicht über die Werte der Boxplots der relativen Abweichungen bei 180 °C PAT. I = Interquartilsabstand; Q2 = Median

Boxplot-Werte der relativen Abweichungen bei 200 °C PAT

BKW	Wert	Frische PmBs		Rückgewonnene PmBs	
		160 °C	200 °C	160 °C	200 °C
Penetration	Q1	-4.5 %	-4.0 %	-5.4 %	-3.0 %
	Q3	0.0 %	1.1 %	2.3 %	0.9 %
	I	4.5 %	5.1 %	7.6 %	3.9 %
	Q2	-0.7 %	-2.6 %	-1.1 %	-0.7 %
	MW	-2.5 %	-1.4 %	-1.1 %	-1.1 %
R+K	Q1	-3.3 %	-1.2 %	-2.6 %	0.0 %
	Q3	0.0 %	1.6 %	0.3 %	2.7 %
	I	3.3 %	2.8 %	2.9 %	2.7 %
	Q2	-1.7 %	0.0 %	-0.1 %	1.0 %
	MW	-2.1 %	-0.5 %	-2.2 %	0.7 %
I _P	Q1	-8.1 %	-5.0 %	-15.6 %	-4.8 %
	Q3	-2.0 %	1.6 %	4.3 %	6.7 %
	I	6.1 %	6.6 %	19.9 %	11.5 %
	Q2	-4.5 %	-2.9 %	-1.0 %	2.0 %
	MW	-9.6 %	-3.6 %	-5.4 %	2.3 %
Elastische Rückstellung	Q1	-1.0 %	0.0 %	-1.2 %	0.0 %
	Q3	0.0 %	0.0 %	1.1 %	1.2 %
	I	1.0 %	0.0 %	2.3 %	1.2 %
	Q2	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
	MW	-0.5 %	0.0 %	-0.2 %	0.1 %
T _{BTSV}	Q1	-0.8 %	-0.6 %	-0.4 %	-0.5 %
	Q3	0.6 %	0.6 %	0.2 %	0.5 %
	I	1.4 %	1.2 %	0.6 %	0.9 %
	Q2	-0.2 %	0.2 %	-0.1 %	0.1 %
	MW	-0.2 %	0.3 %	-0.2 %	0.1 %
δ _{BTSV}	Q1	-0.5 %	-0.2 %	-0.5 %	-0.2 %
	Q3	0.8 %	0.8 %	0.1 %	0.0 %
	I	1.3 %	1.0 %	0.6 %	0.2 %
	Q2	0.1 %	0.2 %	-0.2 %	-0.1 %
	MW	0.5 %	0.1 %	-0.2 %	-0.3 %
R _{3,2} kPa	Q1	-12.9 %	-2.9 %	-5.7 %	-0.6 %
	Q3	0.0 %	0.2 %	0.1 %	0.3 %
	I	12.9 %	3.0 %	5.8 %	0.9 %
	Q2	-0.7 %	0.0 %	-1.7 %	0.1 %
	MW	-8.5 %	-1.9 %	-7.1 %	-5.1 %
R ₁₀ kPa	Q1	-27.3 %	-6.5 %	-7.1 %	-1.3 %
	Q3	0.0 %	0.2 %	0.1 %	2.0 %
	I	27.2 %	6.7 %	7.2 %	3.3 %
	Q2	-8.8 %	-0.1 %	-2.5 %	-0.1 %
	MW	-17.6 %	-6.5 %	-8.4 %	-4.1 %
R _{diff}	Q1	1.4 %	-10.9 %	-3.4 %	-25.6 %
	Q3	83.3 %	48.4 %	6.1 %	18.4 %

$J_{nr\ 3.2\ kPa}$	I	82.0 %	59.2 %	9.5 %	44.0 %
	Q2	60.6 %	13.6 %	0.2 %	-6.4 %
	MW	87.7 %	17.9 %	-20.8 %	-8.0 %
	Q1	-2.5 %	-9.1 %	-1.6 %	-4.5 %
	Q3	59.2 %	20.5 %	16.7 %	8.7 %
$J_{nr\ 10\ kPa}$	I	61.7 %	29.6 %	18.4 %	13.2 %
	Q2	38.5 %	1.7 %	-0.3 %	-0.6 %
	MW	259.7 %	78.1 %	89.4 %	68.0 %
	Q1	6.1 %	-9.4 %	-0.6 %	-8.7 %
	Q3	116.0 %	22.4 %	12.7 %	9.0 %
$J_{nr\ diff}$	I	109.9 %	31.8 %	13.3 %	17.7 %
	Q2	58.2 %	2.4 %	4.9 %	-0.8 %
	MW	139.3 %	45.9 %	23.9 %	10.3 %
	Q1	-23.2 %	-14.9 %	-15.7 %	-13.7 %
	Q3	80.9 %	16.8 %	2.9 %	1.2 %
	I	104.1 %	31.7 %	18.5 %	14.8 %
	Q2	2.8 %	-1.9 %	-3.4 %	-5.9 %
	MW	29.0 %	-27.7 %	-18.8 %	-13.7 %

Tabelle 43: Übersicht über die Werte der Boxplots der relativen Abweichungen bei 200 °C PAT. I = Interquartilsabstand; Q2 = Median

Übersicht der r der Penetration

PmB	Herst.	f / r / r-Rot	PAT [°C]	Pen. [1/10 mm]	SN EN 1426:2016- 03 [30]	ROBIN 2024
PmB-E 25/55-65	2	f	160	29	✓	
			180	27		
			200	28		
	3	f	160	69	✓	✓
			180	69		
			200	72		
	5	f	160	40	✗	
			180	42		
			200	38		
		r	145	28	✗	
		r	160	28		
			180	28		
PmB-E 45/80-65	1	f	160	66	✓	✓
			180	67		
			200	66		
	2	f	160	48	✓	
			180	49		
			200	50		
		r	160	38	✗	
			180	44		
			200	41		
	4	f	160	61	✗	✓
			180	64		
			200	66		
PmB-E 65/105-60	2	f	160	76	✓	✓
			180	74		
			200	76		
		r	145	61		
		r	160	63		
			180	60		
			200	62		
		r-Rot	160	59	✓	✓
			180	59		
			200	59		
	3	f	160	70	✗	✗
			180	88		
			200	87		
	5	f	160	81	✓	✓
			180	84		
			200	81		

PmB-E 90/150-60	1	f	160	113	✓	✗
			180	109		
			200	116		
	3	f	160	90	✗	✗
			180	98		
			200	100		
		r	160	73	✓	✓
			180	74		
			200	75		
PmB 25/55- 80	2	f	160	42	✗	
			180	38		
			200	40		
	3	f	160	58	✓	✓
			180	56		
			200	58		
		r	145	41	✓	
		r	160	44		
			180	44		
			200	45		
		r-Rot	160	41	✗	
			180	38		
			200	40		
PmB 45/80-80	1	f	160	64	✗	✓
			180	62		
			200	67		
		r	145	45	✗	
		r	160	45		
			180	48		
			200	48		
	2	f	160	61	✓	✓
			180	63		
			200	62		
	5	f	160	48	✓	
			180	47		
			200	48		
PmB 65/105-80	1	f	160	81	✓	✓
			180	78		
			200	80		
		r	160	59	✗	✓
			180	56		
			200	55		
	2	f	160	69	✗	✓
			180	72		
			200	75		
	1	f	160	136		

PmB 90/150-80			180	133	✓	✓
			200	137		
	3	f	160	95	✓	✓
			180	96		
			200	101		
			160	116	×	×
	4	f	180	123		
			200	115		
			r	145	96	
		r	160	89	✓	✓
			180	85		
			200	84		

Tabelle 44: Übersicht über die PmBs, bei denen die Penetration innerhalb (✓) oder ausserhalb (×) der r der SN EN 1426:2016-03 «Bestimmung der Nadelpenetration» [30] oder des ROBIN 2024 liegt. Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB; Pen. = Penetration

Übersicht der r des R+K

PmB	Herst.	f / r / r-Rot	PAT [°C]	R+K [°C]	SN EN 1427:2016- 03 [31]	ROBIN 2024
PmB-E 25/55-65	2	f	160	78.4	✗	
			180	78.2		
			200	81.5		
	3	f	160	84.0		✓
			180	84.0		
			200	85.0		
	5	f	160	76.0	✗	
			180	77.2		
			200	78.6		
		r	145	74.6	✗	
		r	160	73.6		
			180	76.2		
			200	77.0		
PmB-E 45/80-65	1	f	160	76.8	✓	
			180	77.8		
			200	76.6		
	2	f	160	79.6		✗
			180	83.5		
			200	80.5		
		r	160	69.0		✗
			180	73.2		
			200	71.2		
	4	f	160	90.0		✗
			180	94.0		
			200	92.5		
PmB-E 65/105-60	2	f	160	71.6	✗	
			180	79.0		
			200	79.8		
		r	145	61.6	✓	
		r	160	60.6		
			180	60.6		
			200	60.4		
		r-Rot	160	63.2	✓	
			180	63.0		
			200	63.0		
	3	f	160	87.0		✗
			180	90.5		
			200	89.0		
	5	f	160	74.0	✓	
			180	74.8		
			200	74.8		

PmB-E 90/150-60	1	f	160	68.4	✓		
			180	68.4			
			200	68.2			
	3	f	160	77.6	✗		
			180	75.0			
			200	75.6			
		r	160	69.6	✗		
			180	71.2			
			200	70.0			
PmB 25/55- 80	2	f	160	82.5		✗	
			180	88.0			
			200	85.0			
	3	f	160	88.5		✗	
			180	90.0			
			200	90.0			
		r	145	88.0			
			r	160	87.5		✗
				180	90.5		
		200		88.5			
		r-Rot	160	87.5		✗	
			180	86.0			
	200		87.5				
	PmB 45/80-80	1	f	160	82.0		✓
				180	83.0		
200				82.5			
r			145	74.2			
			r	160	76.2		✗
				180	79.4		
200				75.2			
2			f	160	82.5		✗
				180	84.0		
		200		88.5			
5		f	160	76.0	✗		
			180	77.8			
			200	78.6			
PmB 65/105-80		1	f	160	91.0		✗
				180	88.5		
	200			89.5			
	r		160	88.0		✗	
			180	90.5			
			200	87.0			
	2	f	160	83.0		✗	
			180	87.0			
			200	85.0			
1	f	160	90.5				

PmB 90/150-80	3	f	180	91.0	✗
			200	89.0	
			160	86.0	
		f	180	84.5	✗
			200	86.0	
			160	87.5	
	4	f	180	84.5	✗
			200	93.5	
			145	60.2	
		r	160	76.2	✗
			180	83.0	
			200	91.0	

Tabelle 45: Übersicht über die PmBs, bei denen der R+K innerhalb (✓) oder ausserhalb (✗) der r der SN EN 1427:2016-03 «Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren» [31] oder des ROBIN 2024 liegt. Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB

Übersicht der r des I_P

PmB	Herst.	f / r / r-Rot	PAT [°C]	I _P [-]	ROBIN 2024
PmB-E 25/55-65	2	f	160	2.8	✗
			180	2.6	
			200	3.6	
	3	f	160	5.8	✓
			180	5.8	
			200	6.0	
	5	f	160	3.2	✓
			180	3.5	
			200	3.4	
		r	145	2.2	✗
		r	160	2.0	
			180	2.4	
			200	2.7	
PmB-E 45/80-65	1	f	160	4.7	✓
			180	4.8	
			200	4.6	
	2	f	160	4.2	✗
			180	4.7	
			200	4.4	
		r	160	2.0	✗
			180	3.0	
			200	2.5	
	4	f	160	6.2	✗
			180	6.7	
			200	6.7	
PmB-E 65/105-60	2	f	160	4.3	✗
			180	5.3	
			200	5.5	
		r	145	1.9	✓
		r	160	1.8	
			180	1.7	
			200	1.7	✓
		r-Rot	160	2.1	
			180	2.0	
			200	2.0	
	3	f	160	6.2	✗
			180	7.3	
			200	7.1	
	5	f	160	4.9	✓
			180	5.1	
			200	5.0	
	1	f	160	5.1	

PmB-E 90/150-60	3	f	180	5.0	✓
			200	5.2	
			160	5.8	✓
		r	180	5.7	
			200	5.9	
			160	3.9	✓
PmB 25/55-80	2	f	180	4.2	✗
			180	3.5	
			200	4.4	
	3	f	160	5.8	✓
			180	5.9	
			200	6.0	
		r	145	4.8	
		r	160	5.0	✓
			180	5.3	
			200	5.1	
		r-Rot	160	4.8	✓
			180	4.4	
			200	4.7	
PmB 45/80-80	1	f	160	5.3	✓
			180	5.4	
			200	5.5	
		r	145	3.2	
		r	160	3.5	✗
			180	4.1	
			200	3.5	
	2	f	160	3.3	✗
			180	5.5	
			200	6.0	
	5	f	160	3.7	✓
			180	3.8	
			200	4.0	
PmB 65/105-80	1	f	160	7.1	✓
			180	6.7	
			200	6.9	
		r	160	5.8	✓
			180	5.9	
			200	5.5	
	2	f	160	5.7	✗
			180	6.3	
			200	6.2	
PmB 90/150-80	1	f	160	8.9	✓
			180	8.9	

3	f	200	8.8	✓
		160	7.1	
		180	6.9	
		200	7.3	
4	f	160	4.3	✗
		180	7.8	
		200	8.6	
		145	3.0	
	r	160	5.6	✗
		180	6.3	
		200	7.2	

Tabelle 46: Übersicht über die PmBs, bei denen der I_p innerhalb (✓) oder ausserhalb (✗) der r des ROBIN 2024 liegt. Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB

Übersicht der r der elastischen Rückstellung

PmB	Herst.	f / r / r-Rot	PAT [°C]	Elast. Rückst. [%]	SN EN 13398:2018- 06 [32]
PmB-E 25/55-65	2	f	160	86	✓
			180	87	
			200	86	
	3	f	160	94	✓
			180	94	
			200	94	
	5	f	160	92	✓
			180	92	
			200	91	
		r	145	83	✓
		r	160	80	
			180	81	
PmB-E 45/80-65	1	f	160	89	✓
			180	89	
			200	88	
	2	f	160	93	✓
			180	94	
			200	92	
		r	160	83	✓
			180	85	
			200	84	
	4	f	160	94	✓
			180	96	
			200	96	
PmB-E 65/105-60	2	f	160	95	✓
			180	96	
			200	96	
		r	145	87	✓
		r	160	84	
			180	83	
		r-Rot	200	82	✓
			160	86	
			180	85	
	3	f	200	85	✓
			160	96	
			180	99	
	5	f	200	99	✓
			160	98	
			180	98	
			200	98	

PmB-E 90/150-60	1	f	160	91	✓
			180	91	
			200	91	
	3	f	160	96	✓
			180	95	
			200	92	
		r	160	91	✓
			180	92	
			200	91	
PmB 25/55- 80	2	f	160	93	✓
			180	94	
			200	96	
	3	f	160	95	✓
			180	94	
			200	95	
		r	145	91	
			160	92	
			180	93	
		r	160	92	✓
			180	93	
			200	93	
		r-Rot	160	92	✓
			180	90	
			200	91	
PmB 45/80- 80	1	f	160	89	✓
			180	89	
			200	89	
		r	145	83	
			160	83	
			180	84	
		r	160	83	✓
			180	84	
			200	84	
	2	f	160	96	✓
			180	98	
			200	99	
	5	f	160	94	✓
			180	94	
			200	94	
PmB 65/105- 80	1	f	160	97	✓
			180	98	
			200	98	
		r	160	94	✓
			180	93	
			200	93	
	2	f	160	99	✓
			180	99	
			200	99	
	1	f	160	99	

PmB 90/150-80	3	f	180	99	✓
			200	99	
			160	98	✓
			180	97	
			200	98	
	4	f	160	95	✓
			180	97	
			200	100	
		r	145	87	✓
		r	160	95	
			180	96	
			200	99	

Tabelle 47: Übersicht über die PmBs, bei denen die elastische Rückstellung innerhalb (✓) oder ausserhalb (×) der SN EN 13398:2018-06 «Bestimmung der elastischen Rückstellung von modifiziertem Bitumen» [32] liegt. Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB; Elast. Rückst. = elastische Rückstellung

Übersicht der r der T _{BTSV}						
PmB	Herst.	f / r / r-Rot	PAT [°C]	T _{BTSV} [°C]	SN EN 17643:2016-09 [33]	VAB/ALA 2022
PmB-E 25/55-65	2	f	160	63.6	✓	✓
			180	63.6		
			200	63.4		
	3	f	160	50.5	✓	✓
			180	50.3		
			200	50.6		
	5	f	160	57.6	✗	✓
			180	58.2		
			200	58.3		
		r	145	63.4	✗	✓
		r	160	64.8		
			180	65.4		
			200	64.6		
PmB-E 45/80-65	1	f	160	50.0	✓	✓
			180	50.1		
			200	50.0		
	2	f	160	55.4	✓	✓
			180	55.0		
			200	55.5		
		r	160	59.3	✗	✓
			180	58.6		
			200	59.1		
	4	f	160	51.0	✓	✓
			180	50.9		
			200	50.7		
PmB-E 65/105-60	2	f	160	49.9	✗	✓
			180	49.4		
			200	49.3		
		r	145	51.9	✓	✓
		r	160	51.4		
			180	51.6		
			200	51.5		
		r-Rot	160	52.0		
			180	51.7		
			200	51.5		
	3	f	160	51.3	✗	✓
			180	48.7		
			200	47.6		
	5	f	160	49.8	✗	✓
			180	49.1		
			200	50.6		

PmB-E 90/150-60	1	f	160	42.5	✗	✓
			180	44.1		
			200	44.1		
	3	f	160	46.7	✓	✓
			180	46.8		
			200	46.5		
		r	160	49.5	✓	✓
			180	49.4		
			200	49.7		
PmB 25/55-80	2	f	160	57.0	✗	✓
			180	57.6		
			200	57.2		
	3	f	160	54.1	✗	✓
			180	53.0		
			200	53.8		
		r	145	58.1	✓	✓
		r	160	56.8		
			180	57.1		
			200	56.8		
		r-Rot	160	58.2	✗	✓
			180	58.8		
			200	58.4		
PmB 45/80-80	1	f	160	50.3	✓	✓
			180	50.8		
			200	50.7		
		r	145	55.1	✓	✓
		r	160	54.7		
			180	54.7		
	2	f	160	53.7	✗	✓
			180	53.9		
			200	51.9		
		f	160	57.4	✗	✓
			180	57.7		
			200	58.4		
PmB 65/105-80	1	f	160	49.1	✓	✓
			180	49.4		
			200	49.4		
		r	160	53.0	✗	✓
			180	53.9		
			200	54.3		
	2	f	160	50.7	✗	✓
			180	50.1		
			200	50.1		
	1	f	160	35.5		

PmB 90/150-80			180	41.7	×	×
			200	40.6		
	3	f	160	46.9	✓	✓
			180	46.7		
			200	47.1		
			160	44.4	×	✓
	4	f	180	44.2		
			200	43.3		
			145	47.0		
		r	160	47.3	✓	✓
			180	47.6		
			200	47.6		

Tabelle 48: Übersicht über die PmBs, bei denen die T_{BTSV} innerhalb (✓) oder ausserhalb (×) der r der SN EN 17643:2016-09 «Bestimmung der Äqui-Schermodultemperatur und des Phasenwinkels im Dynamischen Scherrheometer (DSR) – BTSV-Prüfung» [33] oder des VAB/ALA 2022 liegt. Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB

Übersicht der r der δ_{BTSV}

PmB	Herst.	f / r / r-Rot	PAT [°C]	δ_{BTSV} [°]	SN EN 17643:2016- 09 [33]	VAB/ALA 2022
PmB-E 25/55-65	2	f	160	63.0	✗	✓
			180	63.0		
			200	62.5		
	3	f	160	60.7	✗	✓
			180	60.8		
			200	61.2		
	5	f	160	63.5	✗	✓
			180	63.2		
			200	63.6		
		r	145	63.1	✗	✓
		r	160	62.9		
			180	62.5		
PmB-E 45/80-65	1	f	160	68.0	✓	✓
			180	68.0		
			200	68.0		
	2	f	160	61.7	✗	✓
			180	61.6		
			200	61.1		
		r	160	59.9	✗	✓
			180	59.5		
			200	59.6		
	4	f	160	60.7	✓	✓
			180	60.9		
			200	61.0		
PmB-E 65/105-60	2	f	160	63.7	✓	✓
			180	63.7		
			200	64.0		
		r	145	62.7	✗	✓
		r	160	62.6		
			180	62.9		
			200	63.0		
		r-Rot	160	62.6		
			180	62.6		
			200	62.7		
	3	f	160	56.0	✗	✗
			180	54.0		
			200	54.2		
	5	f	160	58.4	✗	✓
			180	58.9		
			200	58.1		

PmB-E 90/150-60	1	f	160	68.6	✓	✓
			180	68.7		
			200	68.8		
	3	f	160	61.2	✗	✗
			180	64.1		
			200	63.1		
		r	160	63.4	✓	✓
			180	63.4		
			200	63.4		
PmB 25/55-80	2	f	160	67.8	✗	✗
			180	64.6		
			200	64.0		
	3	f	160	56.0	✓	✓
			180	56.3		
			200	56.3		
		r	145	54.8	✓	✓
		r	160	54.5		
			180	54.8		
			200	54.8		
		r-Rot	160	55.0	✓	✓
			180	55.1		
			200	55.1		
PmB 45/80-80	1	f	160	67.2	✓	✓
			180	67.1		
			200	67.1		
		r	145	64.7	✓	✓
		r	160	64.6		
			180	64.6		
	2	f	160	61.2	✗	✗
			180	56.3		
			200	59.7		
	5	f	160	60.0	✗	✓
			180	59.5		
			200	58.7		
PmB 65/105-80	1	f	160	60.8	✓	✓
			180	60.7		
			200	60.6		
		r	160	57.3	✗	✓
			180	56.8		
			200	56.6		
	2	f	160	62.5	✗	✓
			180	62.3		
			200	62.1		
	1	f	160	58.6		

PmB 90/150-80	3	f	180	59.4	×	✓
			200	59.3		
			160	56.9	×	✓
			180	57.1		
	4	f	200	56.7		
			160	62.1	×	✓
			180	63.6		
			200	62.5		
		r	145	65.2		
		r	160	61.8	×	✓
			180	61.8		
			200	63.1		

Tabelle 49: Übersicht über die PmBs, bei denen die δ_{BTSV} innerhalb (✓) oder ausserhalb (×) der r der SN EN 17643:2016-09 «Bestimmung der Äqui-Schermoduletemperatur und des Phasenwinkels im Dynamischen Scherrheometer (DSR) – BTSV-Prüfung» [33] oder des VAB/ALA 2022 liegt. Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB

Übersicht der r der R_{diff}

PmB	Herst.	f / r / r-Rot	PAT [°C]	R _{diff} [%]	SN EN 16659:2016- 09 [34]
PmB-E 25/55- 65	2	f	160	9.04	✗
			180	11.70	
			200	-3.15	
	3	f	160	-0.80	✗
			180	-0.83	
			200	-0.85	
	5	f	160	17.20	✗
			180	14.09	
			200	12.13	
		r	145	8.37	✗
		r	160	7.30	
			180	7.25	
PmB-E 45/80-65	1	f	160	15.00	✓
			180	15.25	
			200	15.39	
	2	f	160	20.51	✗
			180	8.91	
			200	12.77	
		r	160	17.55	✗
			180	13.88	
			200	16.33	
	4	f	160	1.29	✗
			180	0.31	
			200	0.39	
PmB-E 65/105-60	2	f	160	41.82	✗
			180	28.01	
			200	18.88	
		r	145	37.32	✓
		r	160	45.33	
			180	43.80	
		200	200	44.46	✗
			160	35.32	
			180	35.97	
	3	f	200	25.47	✗
			160	-0.77	
			180	-0.13	
	5	f	200	-0.07	✗
			160	26.99	
			180	21.59	
			200	25.40	

PmB-E 90/150-60	1	f	160	88.08	✗
			180	75.61	
			200	69.67	
	3	f	160	-0.33	✗
			180	1.20	
			200	0.35	
		r	160	10.55	✗
			180	7.48	
			200	10.55	
PmB 25/55- 80	2	f	160	28.53	✗
			180	24.69	
			200	16.34	
	3	f	160	-0.74	✗
			180	-0.68	
			200	-0.73	
		r	145	-1.39	✗
		r	160	-1.16	
			180	-1.40	
			200	-1.16	
		r-Rot	160	-1.49	✗
			180	-1.74	
			200	-1.56	
PmB 45/80- 80	1	f	160	18.40	✗
			180	7.99	
			200	10.60	
		r	145	14.42	✗
		r	160	14.14	
			180	12.49	
	2	f	200	14.08	✗
			160	37.45	
			180	23.76	
		f	200	20.91	✗
			160	12.25	
			180	11.57	
PmB 65/105- 80	1	f	200	9.48	✗
			160	4.92	
			180	2.46	
		r	200	2.76	✗
			160	0.53	
			180	-0.12	
	2	f	200	-0.32	✗
			160	27.84	
			180	12.72	
		f	200	10.55	✗
			160	0.23	
			180		

PmB 90/150-80	3	f	180	0.31	✗
			200	0.23	
			160	-0.44	✗
		f	180	-0.40	
			200	-0.24	
			160	59.40	✗
	4	f	180	57.78	
			200	12.88	
		r	145	76.69	✗
		r	160	27.45	
			180	12.33	
			200	32.85	

Tabelle 50: Übersicht über die PmBs, bei denen die R_{diff} innerhalb (✓) oder ausserhalb (✗) der r der SN EN 16659:2016-09 «MSCR-Prüfung (Multiple Stress Creep and Recovery Test)» [34] liegt. Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB

Übersicht der r der J_{nr diff}

PmB	Herst.	f / r / r-Rot	PAT [°C]	J _{nr diff} [%]	SN EN 16659:2016- 09 [34]
PmB-E 25/55- 65	2	f	160	18.98	✗
			180	21.58	
			200	-10.38	
	3	f	160	-48.56	✓
			180	-48.62	
			200	-46.58	
	5	f	160	57.05	✓
			180	59.78	
			200	57.75	
		r	145	22.08	✓
		r	160	20.95	
			180	22.09	
PmB-E 45/80-65	1	f	160	254.10	✓
			180	242.60	
			200	247.26	
	2	f	160	79.23	✗
			180	59.72	
			200	70.16	
		r	160	50.69	✓
			180	49.10	
			200	53.97	
	4	f	160	45.65	✗
			180	4.18	
			200	7.82	
PmB-E 65/105-60	2	f	160	122.51	✗
			180	312.39	
			200	318.04	
		r	145	122.87	✓
		r	160	209.18	
			180	228.71	
			200	235.48	
		r-Rot	160	182.08	✗
			180	224.32	
			200	219.88	
	3	f	160	-48.06	✗
			180	-24.93	
			200	-20.16	
	5	f	160	158.16	✗
			180	239.78	
			200	279.52	

PmB-E 90/150-60	1	f	160	1950.33	✗
			180	1999.12	
			200	1358.31	
	3	f	160	-40.73	✗
			180	9.56	
			200	-16.27	
		r	160	115.89	✗
			180	82.83	
			200	112.60	
PmB 25/55- 80	2	f	160	67.56	✗
			180	110.01	
			200	94.19	
	3	f	160	-44.94	✓
			180	-42.99	
			200	-43.96	
		r	145	-37.10	✓
		r	160	-37.84	
			180	-39.04	
			200	-36.76	
		r-Rot	160	-36.91	✓
			180	-35.44	
			200	-35.95	
PmB 45/80- 80	1	f	160	343.70	✗
			180	135.27	
			200	174.26	
		r	145	61.85	✓
		r	160	69.50	
			180	61.87	
	2	f	200	69.97	✗
			160	129.81	
			180	215.44	
		f	200	169.12	✗
			160	32.32	
			180	37.87	
PmB 65/105- 80	1	f	200	33.64	✗
			160	154.39	
			180	77.61	
		r	200	85.35	✗
			160	-4.06	
			180	-17.49	
	2	f	200	-20.43	✗
			160	187.10	
			180	268.12	
	1	f	200	218.50	
			160	-14.43	
			180		

PmB 90/150-80	3	f	180	5.24	✗
			200	-6.96	
			160	-48.08	✗
			180	-44.47	
			200	-37.56	
			160	82.92	
	4	f	180	498.07	✗
			200	519.94	
			r	145	48.62
			r	160	32.87
		r	180	16.80	✗
			200	351.89	

Tabelle 51: Übersicht über die PmBs, bei denen die $J_{nr \text{ diff}}$ innerhalb (✓) oder ausserhalb (✗) der r der SN EN 16659:2016-09 «MSCR-Prüfung (Multiple Stress Creep and Recovery Test)» [34] liegt. Herst. = Hersteller; f / r / r-Rot = frisches PmB / im Ofen erhitztes rückgewonnenes PmB / im Rotationsverdampfer erhitztes PmB

Datenverwendung

Bei den hier verwendeten Daten handelt es sich um Messdaten, die in der Walo Bertschinger Central AG, Zentrale Labordienste erhoben wurden, und um Berechnungsergebnisse, die wie in Kapitel 3.4 beschrieben, berechnet wurden. Auch die Ergebnisse einer Probe einer Asphaltmischanlage wurden miteinbezogen, die ebenfalls in der Walo Bertschinger Central AG, Zentrale Labordienste erhoben wurden. Mit diesen Daten wurden Excel-Listen und Grafiken erstellt, die statistisch und optisch ausgewertet wurden.

Die Rohdaten liegen im Anhang in den Tabelle 28, Tabelle 29, Tabelle 30, Tabelle 31, Tabelle 32, Tabelle 33, Tabelle 34, Tabelle 35, Tabelle 36, Tabelle 37, Tabelle 38 und Tabelle 39 vor. Berechnete Ergebnisse können den entsprechenden Tabellen in Kapitel 4 entnommen werden.

Die Daten können für weitere Forschungsarbeiten genutzt werden. Für ihre Verwendung liegen keine Einschränkungen vor.

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 15.06.2026

Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS_2024_338
Projekttitel: Überarbeitung und Harmonisierung der Probenaufbereitung von polymermodifizierten Bitumen
Enddatum: 15.06.2026

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Die Penetration, der Erweichungspunkt Ring & Kugel, der Penetrationsindex, die elastische Rückstellung, die TBTSV und der öBTSV sind nicht von der Probenaufbereitungstemperatur abhängig, wenn sie zwischen 160 °C und 200 °C liegt.

Nur die Ergebnisse des MSCR zeigen einen Zusammenhang mit der Probenaufbereitungstemperatur, denn vor allem die Werte bei 160 °C unterscheiden sich stärker von den Ergebnissen, die bei 180 °C und 200 °C Probenaufbereitungstemperatur ermittelt wurden.

Frische und rückgewonnene PmBs zeigen in den meisten Fällen sehr ähnliche oder gleiche Trends. Die Einzelwerte von höhermodifizierten PmBs streuen bei den meisten Bindemittleigenschaften etwas stärker als bei nicht höhermodifizierten PmBs.

Die Anzahl der PmBs, die innerhalb der r der Normen oder der Ringversuche des VAB/ALA 2022 und ROBIN 2024 liegen, variiert je nach Bindemittelkennwert stark. Der Einfluss der Probenaufbereitungstemperatur ist nicht gross genug, um die Bindemittelkennwerte stark zu verändern, die Wiederholbarkeit wird aber doch etwas beeinflusst.

Die Ergebnisse von PmBs, die nach der Rückgewinnung bei 145 °C nicht nochmal erwärmt wurden, zeigen keine nennenswerten Unterschiede zu denen von PmBs, die nach der Rückgewinnung auf 160 °C, 180 °C oder 200 °C erwärmt wurden. Allerdings gab es bei den meisten der nicht nochmal erwärmten PmBs wegen der hohen Viskosität Probleme mit der Verarbeitbarkeit.

Es macht keinen Unterschied, ob die Erwärmung nach der Rückgewinnung im Ofen oder direkt im Rotationsverdampfer erfolgt.

Mit dem BTSV konnte die Alterung der Bitumen durch die Rückgewinnung aufgezeigt werden und die Black-Diagramme zeigten, dass die untersuchten PmBs unterschiedlich stark auf die Rückgewinnung reagieren. Anhand der Black-Diagramm-Kurven konnten PmBs einzelner Hersteller gut voneinander unterschieden werden.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Beide zentralen Forschungsfragen konnten beantwortet werden.

1. Hat die Probeaufbereitungstemperatur einen Einfluss auf die Bindemittelkennwerte von PmBs
Nicht auf die Penetration, den Erweichungspunkt Ring & Kugel, die elastische Rückstellung,
den Penetrationsindex, TBTSV und ÖBTSV, wenn die Probeaufbereitungstemperatur zwischen
160 °C und 200 °C liegt.

2. Bis zu welcher Temperatur können PmBs während der Probeaufbereitung im Labor erwärmt
werden, ohne eine thermische Schädigung, und damit eine Veränderung der
Bindemittelkennwerte zu verursachen?

Bis 200 °C konnte keine thermische Schädigung nachgewiesen werden.

Folgerungen und Empfehlungen:

Der nationalen Anhang der SN EN 12697-3+A1:2020-08 «Rückgewinnung des Bindemittels:
Rotationsverdampfer», Ziffer 10 soll so umgeändert werden, dass sowohl frische als auch
rückgewonnene PmBs ohne Ausnahme während der Probeaufbereitung auf 185 ± 5 °C für
die Dauer von $1 \text{ h} \pm 10 \text{ min}$ erwärmt werden sollen. Bei rückgewonnenen PmBs kann die
Erwärmung entweder im Ofen oder direkt im Rotationsverdampfer erfolgen.

Publikationen:

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Friesenbichler

Vorname: Evelyn

Amt, Firma, Institut: Projektleiterin, Walo Bertschinger Central AG, Zentrale Labordienste

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Der Zeitplan wurde seitens der Forschungsstelle eingehalten und das Forschungsbudget nicht überschritten. Die Begleitkommission wurde regelmässig über den aktuellen Stand des Projekts und die neuesten Erkenntnisse informiert. Die Präsentation der Ergebnisse und angewandten Methoden war klar verständlich. Die Kommunikation war freundlich, respektvoll und transparent. Man war stets offen für Kritik seitens der Begleitkommission.

Umsetzung:

Die Umsetzung erfolgte zeitnah und gewissenhaft und es wurde stets auf eine wissenschaftlich saubere und korrekte Arbeitsweise geachtet. Vorschläge seitens der Begleitkommission wurden konstruktiv diskutiert und umgesetzt. Die erste Version des Schlussberichts wurde innerhalb der vorgegebenen Zeit erstellt. Seitens Projektleitung gab es keine Verzögerungen.

weitergehender Forschungsbedarf:

Da die Ergebnisse des MSCR einen Zusammenhang mit der Probeaufbereitungstemperatur vermuten lassen, und weil diese Prüfung in der wissenschaftlichen Literatur als kritisch angesehen wird, wäre weitere Forschung angebracht, bevor über einen Ersatz der elastischen Rückstellung und der Kraftduktilität durch den MSCR weiter diskutiert wird.

Einfluss auf Normenwerk:

Änderung des nationalen Anhangs der SN EN 12697-3+A1:2020-08 «Rückgewinnung des Bindemittels: Rotationsverdampfer», Ziffer 10.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Bueche

Vorname: Nicolas

Amt, Firma, Institut: Co-Geschäftsführer und Leiter Forschung und Entwicklung, IMP Bauteist AG

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Bueche