



Institut für Diagnostik und Konservierung
an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.



Landesamt für Denkmalpflege
und Archäologie Sachsen-Anhalt
LANDESMUSEUM FÜR
VORGESCHICHTE



Bericht HAL 18 / 2023

Modellhafte Beurteilung der Beständigkeit von Wegebefestigungen unterschiedlicher Ausführung in historischen Parkanlagen im Einfluss vermehrter Extremwetterereignisse und deren Instandsetzung unter Aspekten der Nachhaltigkeit und Umweltrelevanz

- Abschlussbericht -

Projektlaufzeit: Dezember 2019 bis Dezember 2022

gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Projekt AZ 35536/01



Berichterstattung:

Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.

Dipl.-Min. Matthias Zötzl

Landschaftsplaner, Gartendenkmalpfleger

Dipl.-Ing. Peter Benecken

Hochschule Magdeburg-Stendal, Professur Verkehrswegebau, Laboruntersuchungen

Linda Bromberg, M. Eng., Prof. Dr.-Ing. Sascha Kayser

Ökobilanzierung

Sebastian Berhard Fischer (M.Sc.)

Anzahl der Seiten: 100

Anzahl der Anlagen: 2 (Berichte zu Laboruntersuchungen an Probekörpern und Ökobilanzierung)

Halle, den 03.04.2023

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort.....	4
1	Projektstruktur	5
2	Einleitung.....	6
3	Aktuelle Problemstellung und Stand des Wissens und der Technik	7
4	Pflege und Wartung von Wegedecken.....	9
	4.1 Aufbau eines Weges	9
	4.2 Aufbau der Deckschicht.....	10
	4.3 Wassergebundene Systeme.....	10
	4.4 Kunstharzgebundene Systeme und Asphaltdeckschichten.....	12
5	Untersuchungsmethoden und Vorgehen.....	13
6	Recherchen zu historischen Wegedecken in Parks und Gärten.....	16
7	Vor-Ort-Untersuchungen, Evaluierung bestehender Wegebefestigungen	20
	7.1 Farbiger Asphalt in den Magdeburger Parkanlagen.....	21
	7.2 Magdeburg, Fürstenwallpark	26
	7.3 Asphaltgebundene Wegedecken auf der Peißnitzinsel in Halle (kein Denkmal).....	26
	7.4 Wassergebundene Wegedecken im Gimritzer Park in Halle.....	28
	7.5 Wassergebundene Wegedecken im Gutspark in Großjena	30
	7.6 Wassergebundene Wegedecken im Johanna- und Clara-Zetkin-Park in Leipzig	31
	7.7 Epoxidharzgebundene Wegedecken im Lene-Voigt-Park in Leipzig	34
	7.8 Weitere Epoxidharzgebundene Wegedecken in Leipzig	34
	7.9 Epoxidharzdecken im Kloster Drübeck	35
	7.10 Epoxidharzdecken im Kühnauer Park in Dessau-Roßlau	36
	7.11 Epoxidharzdecken im Vorderen Tiergarten in Dessau-Roßlau	42
	7.12 Einbau stabilisierter wassergebundener Wegedecken in der Pappelallee Magdeburg.....	45
	7.13 Einbau wassergebundener Wegedecken im Wörlitzer Park	47
8	Materialauswahl für die Laboruntersuchungen.....	48
	8.1 Rechercheergebnisse zu Stabilisatoren wassergebundener Wegedecken	49
	8.2 An- und Kationenuntersuchungen an wassergebundenen Wegedeckenmaterialien	50
9	Laboruntersuchungen an Probekörpern.....	51
10	Ökobilanzierung	51
	10.1 Fazit der Ökobilanzierung und Ausblick.....	51
11	Fallbeispiele mit denkmalpflegerischer Begutachtung und Bewertung.....	54
	11.1 Referenzobjekt Klosterberggarten Magdeburg	54

11.2	Referenzobjekt Herrenkrugpark Magdeburg.....	57
11.3	Referenzobjekt Park Hohenerleben	62
11.4	Referenzobjekt Schlosspark Neugattersleben	68
11.5	Referenzobjekt Johannapark Leipzig.....	73
11.6	Referenzobjekt Großkühnauer Park (Dessau-Roßlau)	77
11.7	Referenzobjekt Vorderer Tiergarten (Dessau-Roßlau).....	83
11.8	Referenzobjekt ehemalige Deutsche Hochschule für Körperkultur (DHFK) Leipzig	86
11.9	Referenzobjekt Schlosspark Lützschena Leipzig.....	89
12	Fazit	94
13	Literaturverzeichnis	99
14	Anlagen.....	100



Abb. 1 Wegekreuz im Gimritzer Park in Halle: Fragestellung zur Wegedeckenmaterialauswahl (Zötzl, 2021)

1 Vorwort

Das Wegeprojekt „Modellhafte Beurteilung der Beständigkeit von Wegebefestigungen unterschiedlicher Ausführung in historischen Parkanlagen, im Einfluss häufiger auftretender Extremwetterereignisse und deren Instandsetzung unter Aspekten der Nachhaltigkeit und Umweltrelevanz“ wurde auf Initiative des Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologie in Sachsen-Anhalt ausgearbeitet. Hauptanliegen des Projektes ist es, neben der für historische Gärten und Parkanlagen tradierten wassergebundene Wegedecke auch verschiedene, zunehmend alternativ eingesetzte Deckenmaterialien, wie Epoxidharz- und Asphaltmischungen, die angeblich farblich an das bisherige Erscheinungsbild angepasst werden können, objektiv hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit (im Einfluss des Klimawandels, häufiger auftretender Extremwetterereignisse, Hochwasser- und Grundwasserhochstand, Trockenheit), Denkmalverträglichkeit, sowie ihrer ökologischen Bilanz miteinander zu vergleichen und zu bewerten. Laufende Bauprojekte, auch im Rahmen der Hochwasserschadensbehebung, sollten einbezogen werden. Daneben wurde ein Monitoring an bestehenden Wegematerialien durchgeführt.

1 Projektstruktur

Das Projekt wurde interdisziplinär bearbeitet. Neben Experten, die mit denkmaladministrativen Aufgaben befasst sind, erfordert die Bearbeitung auch vertiefte ingenieurtechnische und materialwissenschaftliche Kenntnisse vor dem Hintergrund denkmalpflegerischer Belange und die Verfügung über Gerätschaften und Anlagen für Spezialuntersuchungen an Baustoffen und Wegekonstruktionen. Im Folgenden werden die Projektteilnehmer vorgestellt:

Antragsteller, Projektleitung, Laboruntersuchungen an Probekörpern

Hochschule Magdeburg-Stendal,
Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit
Professur für Verkehrswegebau
Prof. Dr.-Ing. Sascha Kayser
PF 3655,
39011 Magdeburg
E-Mail: sascha.kayser@hs-magdeburg.de

Projektbearbeitung an der Hochschule Magdeburg

Linda Bromberg, M.Eng.
Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit
Hochschule Magdeburg-Stendal
Breitscheidstr. 51
D-39114 Magdeburg

Kooperationspartner: Monitoring vor Ort, Materialrecherchen, chemische Materialanalysen, Projektkoordination

Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen
und Sachsen-Anhalt e. V.
Dipl.-Min. Matthias Zötzl
E-Mail: zoetzl@idk-denkmal.de

Landschaftsplaner, Gartendenkmalpfleger, denkmalpflegerische Bewertung

Dipl.-Ing. Peter Benecken
peter.benecken@gmx.de

Ökobilanzierung

Sebastian Berhard Fischer
Schmalenhofer Straße 156
42533 Velbert
E-Mail: fischer-velbert@live.de

Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt
Gartendenkmalpflegerin Frau Heike Tenzer
E-Mail: h.tenzer@lda.stk.sachsen-anhalt.de

2 Einleitung

Wege in historischen Gärten und Parks stellen als wassergebundene Wegedecken die gesamte Gartenkunstgeschichte hindurch ein wichtiges funktionales und gestalterisches Element dar. Um ihre Funktionsfähigkeit zu erhalten, müssen sie einer regelmäßigen Pflege und Wartung unterzogen werden. Diese Pflegemaßnahmen sind zwar relativ kostengünstig, allerdings sind die Wartungsintervalle recht kurz. Dadurch müssen in den Haushalten der Parkbetreiber hierfür regelmäßig finanzielle Mittel eingestellt werden. Aus diesem Grund besteht das allgemeine Bestreben, vermehrt dauerhaftere Materialien wie kunstharzgebundene Systeme oder Asphalt einzusetzen, mit denen größere Wartungsintervalle erhofft werden. Gerade mit der Erinnerung an die letzten Hochwasserereignisse (die in der jüngeren Vergangenheit, ausgelöst durch Starkregen-ereignisse und/oder langandauernde Regenfälle in vielen Regionen Europas häufiger auftraten und anteilig, auf eine anthropogen verursachte Klimaveränderung zurückgeführt werden (Kundzewicz, 2011)) mit den dabei erfolgten Schädigungen in historischen Parks und Gärten Mitteldeutschlands, ist dieser Wunsch nachvollziehbar. Jedoch genügen Wege, die aus solchen als beständiger geltenden Materialsystemen hergestellt sind, oftmals nicht den denkmalpflegerisch-ästhetischen Ansprüchen an historische Anlagen und erfordern andererseits wesentlich höhere finanzielle Aufwendungen bei ihrem Einbau. Weiterhin ist die propagierte Dauerhaftigkeit dieser Systeme auf der Grundlage vorliegender Erfahrungen offenbar in Zweifel zu ziehen. In der Realität konnten bereits wiederholt typische, auch großflächig verteilte Schadensbilder an solchen Flächen beobachtet werden, die einen erneuten, vorzeitigen Austausch der Wegedeckschicht erforderlich machten.

Ziel des Projektes ist es, wassergebundene Wegedecken und alternativ angebotene Materialien, wie Epoxidharzsysteme und Asphaltmischungen objektiv hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit, Belastbarkeit, Denkmalverträglichkeit, und ihrer ökologischen Bilanz miteinander zu vergleichen. Hauptaugenmerk liegt dabei auf der energetisch-ökologischen Bilanzierung der verschiedenen Materialien aber auch auf der Stabilität der Materialien im Zusammenhang mit Hochwasserereignissen und damit verbundenen Grundwasserhochständen. Dazu sind Recherchen, Nachuntersuchungen an unterschiedlichen Wegekonstruktionen in verschiedenen Parks sowie Laboruntersuchungen und Modelversuche geplant, die im Folgenden beschrieben werden.

Bezogen auf komplexe Fragestellungen zu Wegen in historischen Parks soll es anhand der Projektergebnisse ermöglicht werden, für unterschiedliche, modellhafte Wegesituationen objektive energetisch-ökologisch nachhaltige Material- und Konstruktionsempfehlungen zu geben, die zum einen die denkmalpflegerischen Verpflichtungen wahren und darüber hinaus in extremen Belastungsbereichen auch die passenden Lösungen darstellen. Im Ergebnis sollen Handlungsempfehlungen gegeben werden können.

3 Aktuelle Problemstellung und Stand des Wissens und der Technik

Der Ausbau und die Befestigung von Wegen in historischen Gartenanlagen ist ein häufig auftretendes Thema bei allen gartendenkmalpflegerischen Arbeiten. Besonders im Rahmen der Flutschadensbeseitigung nimmt dieses breiten Raum ein. Zum einen sind insbesondere an den Wegeaufbauten verstärkt Schäden aufgetreten. Zum anderen besteht nach den Flutschäden seitens der Anlagenträger häufig der Wunsch, im Zuge der Flutschadensanierung verstärkte Aufbauten bzw. Deckschichten einzusetzen, welche bei künftigen Überflutungen größere Haltbarkeit aufweisen sollen.

Zudem stellt die in den letzten Jahren anhaltende Trockenheit, die zu einer deutlichen Erhöhung des Pflegeaufwands wassergebundener Wegedecken führt, ein zusätzliches Argument dar.

Im Spannungsfeld zwischen diesen Ansprüchen und den gartendenkmalpflegerischen Belangen sind Lösungen zu finden.

Im Zusammenhang mit der Sanierung von Hochwasserschäden an Wegen in historischen Parks bzw. der mit Hinblick darauf vorsorglichen Instandsetzung der Wege kann festgestellt werden, dass tendenziell nach der Devise verfahren wird, gegenwärtig einmal – und mit hohen Summen - zu investieren mit der oft vertretenen Ansicht, sich dann nie wieder kümmern zu müssen. Jedoch kann sich diese Verfahrensweise nicht bewähren, da Nutzung immer auch Verschleiß - also Pflege und Wartung - nach sich zieht. Im Rahmen vielfältiger Monitoringvorhaben im Bereich des Kulturgüterschutzes konnte gezeigt werden, dass Monitoring im Zusammenhang mit Pflegeprozessen auf lange Sicht deutlich kostengünstiger ist und vor allem nur dadurch auch der Erhalt der Originalsubstanz in möglichst großem Umfang gewährleistet werden kann. Eine Parallele ist hier auch im Erhalt des Erscheinungsbildes historischer Parks mit Bezug auf die Wegesysteme zu sehen. Moderne Materialien für diese Wegedecken sind häufig mit dem historischen Anspruch bzw. den Verpflichtungen der Denkmalpflege nur unzureichend kompatibel. Hinzu kommt, dass z.T. die als extrem dauerhaft propagierten Materialien keinesfalls diesem Anspruch gerecht werden und darüber hinaus wie jede andere frei exponierte Oberfläche auch regelmäßig gepflegt werden müssen. Noch nicht hinreichend untersucht ist das Verhalten von epoxidharzgebundenen Wegedecken in Abhängigkeit von der Ausführung des Unterbaus, vom jahres- und tageszeitlichen Temperaturwechsel (Frost-Tau-Wechsel) und in Kombination dieser Faktoren mit dem Überflutungsfall.

Hauptanliegen des Projektes ist es, neben der für historische Gärten und Parks tradierten wassergebundenen Wegedecke auch verschiedene alternativ angebotenen Materialien, wie Epoxidharz- und Asphaltdeckenmaterialien objektiv hinsichtlich

- ihrer energetisch-ökologischen Bilanz,
- ihrer Dauerhaftigkeit,
- sowie Denkmalverträglichkeit

miteinander zu vergleichen.

Die Thematik „Wegebefestigungen“ wurde bereits in einem Vorhaben der DBU zur Erarbeitung und modellhaften Umsetzung eines innovativen Pflegekonzepts auf dem Hasefriedhof und dem Johannisfriedhof in Osnabrück berücksichtigt (AZ 27906-45). Allerdings ging es hierbei vornehmlich um Pflegeprozesse. Auch andere Einrichtungen, wie zum Beispiel die Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau, haben sich dem Thema Wegedeckschichten gewidmet. In dem Zusammenhang erfolgte jedoch kein objektiver Vergleich zwischen den sogenannten wassergebundenen Decken, die typisch für historische Parkanlagen sind, und modernen Materialien wie epoxidharzgebundenen Systemen und Asphalten, da die für den Unterhalt wassergebundener Wegedecken erforderliche turnusmäßige Pflege im Rahmen der Untersuchung offensichtlich nicht berücksichtigt wurde. Auch sind Reparaturaufwand, -kosten und -möglichkeiten nicht betrachtet worden. Bisher wurde das Spannungsfeld zwischen denkmalpflegerischen Ansprüchen und modernen Materialien nicht ausreichend berücksichtigt.

Mit dem Projektvorhaben soll ein Vergleich der Wegedecken erfolgen, in dem u.a. die Umweltrelevanz der unterschiedlichen Materialien betrachtet werden. Darüber hinaus soll die Haltbarkeit der verschiedenen Wegedecken im Zusammenhang mit Hochwasserereignissen bzw. der Beanspruchung durch Grundwasserhochstände vergleichend geprüft werden.

4 Pflege und Wartung von Wegdecken

Für die Pflege der Wegdecken müssen regelmäßig finanzielle Mittel eingestellt werden. Die Pflege und Wartung umfasst folgende Aufgaben:

- Vermeidung von Verkrautung, die zur Destabilisierung des Materials führt,
- Beräumung von aufgetragenem Humus (Laubfall), der sonst zu einer Überlagerung der mineralischen Deckschicht führen und die Verkrautung befördern würde,
- Instandhaltung der Kanteneinfassung zur Stabilisierung der Wegedecke,
- Instandhaltung der Wasserableitung, um insbesondere bei wassergebundenen Systemen keine Ausspülungen aus der Deckschicht hervorzurufen, oder Staunässe (Pfützenbildung) zu begünstigen. Hierzu ist dauerhaft ein ein- oder beidseitiges Dachgefälleprofil der Deckschicht aufrechtzuerhalten, worauf auch beim regelmäßigen Abwalzen zu achten ist. Ein unsachgemäßer Einbau der Tragschicht, etwa durch ungenügende Verdichtung oder wellenartige Ablagerung wegen ungenügender Verteilung des Materials nach dem Aufbringen begünstigen Schwierigkeiten mit der Endwässerung der Deckschicht, insbesondere durch Pfützen- und Schlaglochbildung.
- bei wassergebundenen Decken regelmäßiges, verdichtendes Walzen der Wegedecke im Frühjahr (Nachprofilierung).

Auch wenn bei asphalt- und epoxidharzgebundenen Wegebefestigungssystemen das regelmäßige Walzen zur Verdichtung als Pflegemaßnahme nicht erforderlich ist, müssen die übrigen Arbeiten auch hier ausgeführt werden.

Daneben gilt es in jedem Fall, die unsachgemäße Nutzung der Wege zu vermeiden. Als Fuß- und Radweg konzipierte Bereiche dürfen nicht durch Fahrzeugverkehr überlastet werden.

Die Behandlung der Flächen im Winter mit Taumitteln bedeutet übermäßige Frostbeanspruchungen, die zur Zerstörung der Nutzsichten führen können.

4.1 Aufbau eines Weges

Im Rahmen des Projektes findet jeweils der Oberbau der Wege (Aufbau oberhalb des Bodenplans) Berücksichtigung. Dazu gehören die Tragschicht(en), die Deckschicht und die randliche Begrenzung. Eine Tragschicht kann sowohl aus gebundenen als auch aus ungebundenen Materialien bestehen. Die Art der Ausführung hängt u.a. von der Verkehrsbelastung und der Art der darüber befindlichen Decke / Deckschicht ab. Tragschichten ohne Bindemittel bestehen aus ungebundenen Gesteinskornmischen, die durch Walzen verdichtet werden. Tragschichten mit Bindemittel können nochmals hinsichtlich der Art des verwendeten Bindemittels (Bitumen, hydraulische Bindemittel) unterschieden werden. Die häufigste Form der gebundenen Tragschichten sind die Asphalttragschichten (bitumengebundene Gesteinskornmische). Die Stärke der Tragschicht(en) ist von der geplanten Nutzungsart abhängig (Geh- und Radweg bzw. Fahrweg mit unterschiedlicher Belastungsklasse).

4.2 Aufbau der Deckschicht

Die Deckschicht befestigter Wege wird auch als Verschleißschicht bezeichnet, woraus ein Pflege- / Wartungsbedarf sowie auch ein Erneuerungsbedarf abzuleiten sind.

Traditionelle Deckschichten bestehen aus so genannten wassergebundenen Systemen. Neuere Materialien sind epoxidharz- oder bitumengebunden. Daneben können Wege auch mit unterschiedlichen Pflasterungen befestigt sein. Diese besitzen jedoch eine vollkommen andere Charakteristik. Deren Betrachtung wird deshalb hier ausgeschlossen.

4.3 Wassergebundene Systeme

Wassergebundene Befestigungen sind die traditionelle und älteste Befestigungsart im neuzeitlichen Straßen- und Wegebau, neben Natursteinpflasterungen. Die Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung, Landschaftsbau e.V. (FLL) gibt folgende Definition: „Der Begriff des wassergebundenen Weges wird als allgemeingültiger Oberbegriff für Wegebauweisen verstanden, die mit mineralischen Schüttstoffen unterschiedlicher Körnungen ohne den Zusatz von Bindemitteln oder Stabilisatoren hergestellt werden.“ Sie bestehen mindestens aus einem tragfähigen Unterbau („Tragschicht“) aus gebrochenem, sich verzahnenden und verdichtetem Gesteinsmaterial sowie einer Deckschicht. Letztere wird aus mineralischen Bestandteilen mit je nach Bauart und Zweckbestimmung unterschiedlicher Korngrößenverteilung hergestellt. Die auch bei trockenen Witterungsbedingungen anhaltende „Wasserbindung“ tritt bei genügend feinporiger Beschaffenheit auf, für welche abgestimmte Mengen toniger und schluffiger Bestandteile erforderlich sind. Durch die Verwendung von Sanden und grobkörnigerem mineralischen Material verbessern sich die Nutzungsbedingungen der Deckschicht und wird die Möglichkeit der Versickerung von Oberflächenwasser in mäßigen Mengen gewährleistet. Für die Ableitung von großen Mengen anfallenden Oberflächenwassers (z.B. bei Starkregenereignissen), besitzt die Deckschicht fachgerecht eingebauter wassergebundener Deckschichten ein einseitiges oder beidseitiges Gefälle zur Entwässerung in benachbarte Rasen- oder Vegetationsflächen bzw. in ein eigens angelegtes Gerinne. Wie bei starren Deckschichten sind entwässerungslose Senken mit Stauwasser- und Pfützenbildung beim Bau zu vermeiden. Gleichfalls auszuschließen ist die Verwendung von humosen Bestandteilen, welche die Unkrautbildung und damit die Auflösung des Wegegefüges befördern würden. Aus diesem Grund ist die regelmäßige Beräumung von Humusauftrag, etwa durch Laubfall, erforderlich. Zur fachgerechten Pflege gehört ein Abwalzen zur Nachverdichtung und -profilierung der Deckschicht mindestens einmal pro Jahr, ggf. in Verbindung mit dem Aufbringen zusätzlichen mineralischen Materials zur Reprofilierung verschlissener Partien. Je nach Anforderung können auch mehrschichtige Tragschichten mit unterschiedlicher Materialzusammensetzung und Frostschutzschicht gebaut werden. Im ländlichen Wegebau wird die Herstellung von Unterbauten praktiziert, die auch ein Befahren mit schwerstem land- oder forstwirtschaftlichen Gerät ermöglichen. Hier wird allerdings üblicherweise auf das Aufbringen einer feinporigen wassergebundenen Deckschicht verzichtet. Sollen wassergebunden befestigte Wege temporär auch mit schwerem Gerät, etwa Feuerwehr- und Rettungsdienstfahrzeugen, befahren werden können, so ist ein entsprechender Unterbau vorzusehen. Soweit möglich, ist die Deckschicht bei entsprechenden Befahrungen durch geeignete Maßnahmen zu schützen (z. B. Stahlplatten). Schäden sind durch zeitnahe Reparaturen zu beheben (Ergänzung des Deckschichtmaterials, gleichmäßige Verdichtung und Profilierung). Ist die Befahrbar-

keit historischer Wege mit schweren Fahrzeugen nicht gewährleistet, so wird dies in vielen Fällen bereits durch die Wegebreite ausgeschlossen. Sofern das nicht der Fall ist, können in Abhängigkeit von den gestalterischen Erfordernissen zusätzliche Absperrmaßnahmen erwogen werden.

Insbesondere in landschaftlichen Anlagen besaßen wassergebundene Wege traditionell häufig keine gebaute Einfassung, welche in Anbetracht der gestalterisch intendierten geschwungenen Trassierungen auch schwierig herzustellen gewesen wäre. Dies erforderte ein regelmäßiges Abstechen der Wegekanten, um ein Überwachsen durch Vegetation zu verhindern. Zur Markierung der Wegekanten und zum Einstecken von Pflöcken mit Seilabspannungen sind heute entsprechende Bodenhülsen gebräuchlich, welche in historischen Parkanlagen Verwendung finden. Ein Sonderfall sind die Wegeeinfassungen aus Holzbrettern in den Anlagen des Dessau-Wörlitzer Gartenreichs. Auch in formalen Park- und Gartenanlagen wurde häufig ohne statische Kanteneinfassungen gearbeitet; üblich waren jedoch durchaus solche aus unterschiedlichen, bearbeiteten Natursteinmaterialien. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts kamen Bandeiseneinfassungen in Gebrauch, mit welchen sich Wegeschwünge und -biegungen gut begleiten lassen. Neben einer eindeutigen Markierung der Wegeführung tragen sie zur Vermeidung von Materialeinträgen aus der wassergebundenen Deckschicht in benachbarte Vegetationsbereiche bei. In der gartendenkmalpflegerischen Praxis ist die Verwendung von Bandeisenkanten in landschaftlichen Anlagen oder solchen des gemischten Stils mit einem Entstehungszeitraum seit Ende des 19. Jahrhunderts üblich. Seit Beginn des 20. Jahrhunderts verbreiteten sich Wegeeinfassungen aus Kunststein (Beton). Sie eignen sich besonders für formal strukturierte Wegesysteme ohne organische Schwünge. Entsprechend kamen sie in Gärten und Parks des landschaftsarchitektonischen Reformstils im ersten Drittel des 20. Jahrhunderts zum Einsatz. In solchen oder jüngeren Anlagen (1950er/1960er Jahre) ist die Verwendung vorbild- und materialgerechter Betonkanteneinfassungen für wassergebundene Wege denkmalfachlich gerechtfertigt.

Heute sind auch Kanteneinfassungen aus Kunststoff auf dem Markt erhältlich, welche ähnlich wie Bandeisenkanten zu verwenden sind. Beobachtungen zeigen jedoch, dass der Bau gleichmäßiger Wegeschwünge mit diesen nicht immer zufriedenstellend gelingt. Zudem sind auch keine Daten zur dauerhaften Haltbarkeit dieser Produkte bekannt.

Wassergebundene Wegebefestigungen verfügen über deutliche nutzungsbedingte Vorteile. Bei fachgerechter Herstellung und ebensolcher Pflege stellten sie auch bei feuchter Witterung eine feste, nicht durchgeweichte und gut begehbare Oberfläche ohne Pfützenbildung dar. Ebenso ist bei fachgerechtem Bau bei langanhaltender Trockenheit nicht mit Staubbildung zu rechnen.

Der wohl deutlichste nutzungsbedingte Vorteil traditioneller wassergebundener Wege ist die bequeme und gelenkschonende Begehbarkeit. Im Vergleich mit starren Befestigungsarten (Asphalt, Pflaster, epoxidharzgebundene Decken) treten Ermüdungserscheinungen beim Begehen nicht oder erst weit aus später auf. Neben der optischen Wirkung unterscheiden sich hierdurch Park- und Grünanlagen mit wassergebundenen Wegen vom übrigen städtischen Raum. Die Wegebefestigung trägt entscheidend zu ihrer Wahrnehmung als Erholungs- und Erlebnisraum bei. Dies war durchaus bei der Konzipierung häufig bewusst intendiert. Insofern sind auch die nutzungsbedingten Eigenschaften wassergebundener Wegedecken von denkmalfachlichem Interesse.

4.4 Kunstharzgebundene Systeme und Asphaltdeckschichten

Zwei Firmen sind in Deutschland Marktführer bei der Herstellung von Wegeaufbauten mit kunstharzgebundenen Deckschichten. Zum einen die Firma LUWADUR und die Firma Terra Way, deren Wegedecken epoxidharzgebunden sind. Die Tragschicht besteht aus mineralischem Hartgestein. Darüber hinaus gibt es das Produkt der Firma Poseehl, ein Produkt, bei dem über einer Asphalttragschicht eine Epoxidharzdecke eingebaut wird. Dieser Aufbau soll extrem verkehrsbelastbar sein und auch Hochwasserüberflutungen standhalten. Im Rahmen des Projektes wird u.a. an Fallbeispielen eine Gegenüberstellung der verschiedenen Produkte im Vergleich zu wassergebundenen Decken hinsichtlich der Vor- und Nachteile und der Umweltrelevanz erfolgen.

Ein möglicher Kompromiss unter Wahrung der denkmalpflegerischen Ansprüche ist eventuell die Kombination der wassergebundenen Decke mit einem Asphalt oder eine epoxidharzgebundene Deckschicht in kritischen Wegebereichen, wie beispielsweise Anstiege oder verkehrsreichere Abschnitte der Wege. Entsprechendes soll im Projekt im Detail betrachtet und bewertet werden. So wurde im Fall des Haupttrades im Kühnauer Park (Teil des Denkmalbereiches Gartenreich Dessau-Wörlitz und der UNESCO-Welterbestätte gleichen Namens) mit der Stadt Dessau als Träger der Liegenschaft eine abgestufte Vorgehensweise vereinbart. Wegeabschnitte auf ebenem Terrain sollen denkmalgerecht und gemäß dem historischen Vorbild mit wassergebundener Deckschicht ausgebaut werden. Dies betrifft den weitaus größten Teil der zu erneuernden Wegetrasse. Daneben gibt es im Bereich von Deichüberquerungen kleine Steigungsbereiche sowie Wegequerungen, welche im Fall der Deichsicherung ggf. mit schwerem Gerät befahren werden müssen. Für diese begrenzten Abschnitte wurde vereinbart, dass je nach den jeweiligen Bedingungen Pflasterungen, Asphalt oder epoxidharzgebundene Deckschichten (LUWADUR) eingebaut werden können. An diesem Objekt soll die Bewertung der jeweiligen Materialeigenschaften im Rahmen des Projektes erfolgen. Sollten sich einzelne Ausbauvarianten als technisch ungeeignet erweisen, wären Veränderungen auf den betrachteten kurzen Abschnitten mit vergleichsweise geringem Aufwand durchführbar.

5 Untersuchungsmethoden und Vorgehen

Mit der Wahl von Baustoffen und Konstruktionsweisen für die Erneuerung von Befestigungen historischer Wege in Abhängigkeit von den Nutzungsanforderungen und verschleißenden Belastungen entsteht wie bei allen Bauprodukten ein komplexes System von Energieaufwendungen und Wechselwirkungen mit der Umwelt. Darin fließt einerseits der Einsatz von Energie zur Gewinnung und Fertigung der Baustoffe und für die Herstellung der Wegebefestigungen, andererseits für die Pflege und Reparatur ein. Weiterhin sind die Umwelt belastende Einflüsse wie Emissionen und Toxizität bei Herstellung, Nutzung und Entsorgung verbrauchter Materialien und auch deren Wiederverwendbarkeit bzw. Rückführung in den Stoffkreislauf im Lebensweg der Materialien zu betrachten. Dazu erfolgt eine vergleichende ökologisch-energetische Bilanzierung der Einzelmaterien.

Ziel war es, wassergebundene Wegedecken und verschiedene alternativ angebotene Materialien, wie Epoxidharzsysteme und Asphaltmischungen objektiv hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit, Belastbarkeit, Denkmalverträglichkeit, und ihrer ökologischen Bilanz miteinander zu vergleichen. Hauptaugenmerk liegt dabei auf der energetisch-ökologischen Bilanz der verschiedenen Materialien aber auch auf der Stabilität im Zusammenhang mit Hochwasserereignissen und damit verbundenen Grundwasserhochständen. Dazu wurde Recherchen, Bilanzierungen, Nachuntersuchungen an unterschiedlichen Wegekonstruktionen in verschiedenen Parks und Laboruntersuchungen und Modelversuche durchgeführt. Bezogen auf komplexe Fragestellungen zu Wegen in historischen Parks soll es anhand der Projektergebnisse ermöglicht werden, für unterschiedliche, modellhafte Wegesituationen objektive energetisch-ökologisch nachhaltige Material- und Konstruktionsempfehlungen zu geben, die zum einen die denkmalpflegerischen Verpflichtungen wahren und darüber hinaus in extremen Belastungsbereichen auch die passenden Lösungen darstellen.

Erfolgte Arbeitsschritte:

Informationsrecherche in Literatur und Praxis

Recherche bereits ausgeführter Wege, zu ökologisch-energetischen Betrachtung der jeweils einzusetzenden Materialien, der Umweltverträglichkeit (auch bei notwendigem Rückbau), Stabilität im Hochwasserfall (generell Dauerhaftigkeit), Gegenüberstellung genereller Möglichkeiten der Reparatur der verschiedenen Wegedecken.

Ökobilanzierung

Die Bilanzierung erfolgt nach ISO 14040 und ISO 14044 (DIN 2006) durch Herrn Sebastian Fischer. Ökologisch-energetische Bilanzierung zur Ausführung von Parkwegen mit unterschiedlichen Materialien. Unter Berücksichtigung des Energieeinsatzes zur Gewinnung und Fertigung der Baustoffe, für die Herstellung der Wegebefestigungen und für die Pflege und Reparatur sowie umweltbelastende Einflüsse wie Emissionen und Toxizität bei Herstellung, Nutzung und Entsorgung verbrauchter Materialien. Bestandteil der Sachbilanzierung sind Energieeinsatz, CO₂-Emission und weitere Emissionen. Die Wirkungsbilanzierung umfasst die Wirkungskategorien Treibhauspotential, Versauerungs- und Eutrophierungspotential.

Vor-Ort-Untersuchungen, Nachuntersuchung, Evaluierung bestehender Wegebefestigungen
Nachuntersuchungen vor Ort, am Objekt: Monitoring, baubegleitende Dokumentation, Voruntersuchungen und Schadensdokumentationen vor Ort in Sachsen-Anhalt und Leipzig, Schadensanalytik

Evaluierung bestehender Wegebefestigungen und Fallstudien an Referenzobjekten:

An folgenden Referenzobjekten erfolgten Fallstudien um die Umsetzung und Dauerhaftigkeit verschiedener Wegedecken zu untersuchen:

Magdeburger Parkanlagen Herrenkrugpark, Rotehornpark und Klosterberggarten: hier wurden eingefärbte Asphaltdecken eingebaut.

Hohenerxleben, Schlosspark: Hier wurde 1 km mit einer Gussasphaltdecke versehen.

Neugattersleben, Park (geht in Park Hohenerxleben über): Hier waren ursprünglich 4 km Asphaltierung in Planung. Es erfolgte ein wassergebundener Ausbau.

Johannapark Leipzig: mit wassergebundenen Wegedecken

Dessau, Vorderer Tiergarten: wurde die Ausführung eines Wegeabschnitts in Luwadur (epoxidharzgebunden) geplant und ausgeführt.

Großkühnauer Park (bei Dessau): Planung einer differenzierten Herangehensweise - 80% der Wegedecken als wassergebundene Deckschicht und nur in kritischen Bereichen, wie z.B. Anstiegen, Epoxidharz oder Asphalt.

Ehemalige Deutsche Hochschule für Körperkultur (DHFK) Leipzig, heute sportwissenschaftliche Fakultät der Universität, „Campus Jahnallee“: hier wurde 2022 eine Epoxidharzdecke eingebaut

Schlosspark Lützschena Leipzig: hier erfolgte bis zum Frühjahr 2023 die Instandsetzung der wassergebundenen Wegedecken

Referenzanlagen weiterer wassergebundenen Wegedecken sowie epoxidharzgebundenen Wegen und Asphaltdecken: Frühling 2016: **Gutspark Großjena; Halle, Gimritzer Park** und sowie weitere bestehende historischen Anlagen (Tab. 1).

Da in jüngerer Vergangenheit Bestrebungen zu beobachten sind, Asphaltdecken in denkmalverträglicher Farbgebung herzustellen, werden sowohl jene Beispiele als auch farblich vollkommen inakzeptable Lösungen in die Untersuchungen integriert.

Leipzig, Fritz-von-Haack-Anlage am Bundesverwaltungsgericht und der neue Thomaskirchhof: Die dort verwendeten Kunstharzbeläge ungefähr aus dem Jahr 2000 wiesen bereits nach kurzer Zeit schollige Ablösungen auf und sind mittlerweile wieder kostenintensiv durch Asphalt ersetzt worden

Leipzig, Lene-Voigt-Park: Die dort verwendeten Kunstharzbeläge stammten aus dem Jahr 2007 und wiesen ebenfalls bereits nach kurzer Zeit schollige Ablösungen auf und wurden kostenintensiv durch Asphalt ersetzt.

An allen genannten Objekten erfolgte ein Monitoring der Wegebefestigung und eine Schadensbeurteilung. Geländemerkmale finden bei der Bewertung Berücksichtigung.

Laboruntersuchungen an Probekörpern

Laboruntersuchungen erfolgten an insgesamt sieben unterschiedlichen Baustoffgemischen. Dazu zählten zwei bitumengebundene, drei kunstharzgebundene sowie zwei wassergebundene Baustoffgemische. An hergestellten Probekörpern wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Spaltzugschwellversuche zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens und der Steifigkeitsmodule der gebundenen Baustoffgemische
- Untersuchungen zur Temperatur- und UV-Beständigkeit der gebundenen Baustoffgemische
- Frost-Tau-Wechselversuche zur Analyse des Verwitterungswiderstandes der gebundenen Baustoffgemische
- Stempeleindringversuche zur Beschreibung des Verformungsverhaltens der gebundenen und ungebundenen (oder wassergebundenen) Baustoffgemische
- Erosionswiderstand gegenüber strömendem Wasser der gebundenen und ungebundenen (oder wassergebundenen) Baustoffgemische
- Widerstand gegenüber steigendem Grundwasserstand der gebundenen und ungebundenen (oder wassergebundenen) Baustoffgemische

Vorbereitung und Durchführung eines Kolloquiums zum Projektabschluss

Die im Projekt gewonnenen Kenntnisse und Ergebnisse sollen nach Ende des Projekts einem breiteren Fachpublikum vorgestellt werden. Geplant wird das Kolloquium nach Ende des Projekts.

Weiterführung des Projekts

Im Rahmen der Tätigkeit des IDK kann ein langjähriges Monitoring nach Projektende weiter realisiert werden. Dadurch weiterhin gewonnene Erkenntnisse können in Form von Publikationen der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden.

6 Recherchen zu historischen Wegedecken in Parks und Gärten

Wege in historischen Gärten und Parks sind historisch durchgehend als wassergebundene Konstruktion errichtet worden. Sowohl in architektonischen als auch in landschaftlichen Parkanlagen formen und strukturieren sie die Parkpartien und lenken die Besucher gezielt zu den schönsten Szenerien. Gleichzeitig wurde der Weg selbst zum ästhetischen Parkelement, das in Form und Farbe mit seiner Umgebung harmonisieren sollte (Rohde & Schwarz 2008).

Im Fall des Gartenreiches Dessau-Wörlitz entstand ein Gesamtsystem, in dem auch Fahrwege und Verbindungsstraßen nach den Prinzipien von Parkwegen angelegt wurden. So gab es auch hinsichtlich Aufbau und Materialverwendung seit Ende des 18. Jahrhunderts intensive Wechselwirkungen zwischen der Entwicklung des Straßen- und Chausseebaus und der Anlage von Parkwegen.

Der Begriff des wassergebundenen Weges wird gemäß der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung, Landschaftsbau e.V. (FLL) als allgemeingültiger Oberbegriff für Wegebauweisen verstanden, die mit mineralischen Schüttstoffen unterschiedlicher Körnungen ohne den Zusatz von Bindemitteln oder Stabilisatoren hergestellt werden. Die Wege weisen seit historischen Zeiten einerseits den Aufbau aus verschiedenen Schichten, in der Regel mit Entwässerungseinrichtung, und andererseits auch diverse Kanteneinfassungen auf (Rohde & Schwarz 2008). Die Wegebautechnik, im Sinne der wassergebundenen Deckschichten wurde über die Zeit schrittweise verbessert. Nachfolgend wird ein kurzer zeitlicher Abriss zu den Wegebautechniken seit dem 16. Jahrhundert gegeben.

Renaissance und Frühbarock im 16. und 17. Jh.

Bereits im 16. und 17. Jh. wurden sandige und kiesige Schüttstoffe für Wege benutzt. Die Angaben beschränken sich in den Quellen allerdings auf die Materialien. Zu Maßen, der Art und Weise der Untergrundbehandlung oder der Verfestigung sind keine Informationen niedergelegt (Rohde & Schwarz 2008). Zur Zierde wurden die Wege mit Kies oder grobem weißem, gelbem oder rötlichem Sand ausgestreut. Ein derartig einfacher Wegeaufbau ist in Knauer (1910) beschrieben (siehe Abb. 2).

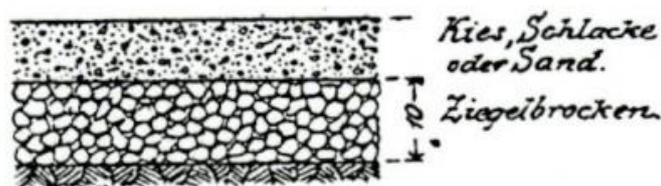


Abb. 2 Der einfache Wegeaufbau eines Kies- und Sandweges (aus Knauer, 1910)

Für die relativ einfach hergestellten Wege der Renaissance finden sich bezüglich der Pflege und Unterhaltung nur wenige Hinweise. So soll nach Estienne das Steinwerk der Wege mit einem Schlegel geschlagen und geebnet werden. Weiterhin sollen sie reinlich und frei von Unkraut gehalten werden.

Barockzeit, Ausgang des 17. bis zur Mitte des 18. Jahrhundert

Der Barockgarten wurde in der Regel in mathematischer Genauigkeit mit symmetrischen Partien ausgeführt. Wege waren Teil der Gesamtkomposition und mussten ästhetischen Ansprüchen genügen. Sie sollten nicht nur gut gebaut sein, sondern hatten sich auch in einem hervorragenden Pflegezustand zu präsentieren (Rohde & Schwarz 2008). Im Barock differenzierte sich erstmals eine „Wegebaukunst“ heraus, die vor allem auch die Techniken der Herstellung verbesserte. So wurden erstmals unterschiedliche Wegeschichten, die Verwendung besonderer Materialien und spezielle Einbautechniken erläutert (Rohde & Schwarz 2008). Exemplarisch wird der Aufbau folgendermaßen beschrieben: „Zunächst müsse eine „Tenne von gehauenen Stein Sande zurecht“ gemacht werden, das Erdreich ausgekoffert und in diesen Schacht „die größten Stücke von dem Stein Sande“ in einer Dicke von ca. 10-12 cm Zentimetern eingebracht werden. Diese Schicht soll geebnet und bei jeweiliger Befeuchtung dreimal festgeklopft werden. Darauf kommt eine Schicht gemeiner Sand“, der wiederum festgestampft werden soll. Für einen „Kugelplatz“ werde nun „eine Lage Salpeter auf solchen gehauenen Stein Sand“ gestreut und diese Schicht acht- bis neunmal festgestampft. Falls kein „weicher Stein Sand“ verfügbar sei, so nehme man alternativ den „Schutt oder Stein-Beschütt von einem alten Gebäude“ für die Tragschicht, über die dann Erde gebracht werde, die schließlich mit Sand bedeckt und verfestigt werde (Rohde & Schwarz 2008). Dazu sind sehr detaillierte Angaben zur Entwässerung verzeichnet. Die Hinweise zur Pflege und Unterhaltung enthalten. Unkraut stellt das Hauptproblem dar.

Chausseebau in Anhalt, Kursachsen und Preußen

Seit Ende des 18. Jahrhunderts erhielten die technische Herstellung von Parkwegen und deren Aufbau massiv Impulse aus der zeitgleich erfolgenden Entwicklung des Chausseebaus. Eine Schlüsselstellung in dieser Hinsicht nahm das Fürstentum Anhalt-Dessau unter dem Fürsten Leopold Friedrich Franz (1740-1817) ein. Gemäß seinem Motto „das Nützliche mit dem Schönen verbinden“ erfolgte ein flächendeckender infrastruktureller Ausbau seines kleinen Fürstentums mit dem Anspruch, dieses zugleich in seiner Gesamtheit als Parklandschaft zu gestalten. Wege und Straßen wurden in ihrer Funktionalität verbessert und übernahmen zugleich die Funktion von Parkwegen, durch ihre Bepflanzung, Anordnung von baulichen gestalterischen Akzenten an ihnen und die gezielte Führung zu Blickperspektiven und –achsen. Die sogenannten „Lustchausseen“ waren mit einer 20-45 cm dicken Kiesschicht versehen und hinsichtlich ihres Aufbaus eher nur für leichte Fuhrwerke geeignet. Der benötigte Kies wurde pragmatisch aus der durch das Fürstentum fließenden Elbe oder Mulde oder anderen Kiesgruben in Straßennähe gewonnen. Häufig besaßen die Lustchausseen auch nur die Breite heutiger Parkwege, etwa 4,40 m. Bei Bedarf und im Umfeld der Residenzstadt Dessau erreichten sie Breiten von bis zu 9 m. Hier wurde eine mittige Kiesbahn von 5,50 bis 6 m Breite von beidseitigen Banketten ohne Deckschicht begleitet. Beidseitige Entwässerungsgräben und eine Bepflanzung mit Obstbäumen oder Pyramiden-Pappeln gehörte ebenso zum Konzept, wie in einigen Bereichen die gesonderte Anlage von Gehwegen jenseits der Straßengräben (siehe Liman (1993).

In Kur-Sachsen begann bereits 1766 der systematische Bau befestigter Straßen mit Steinpflasterungen in Stadtnähe, Kies- oder Sanddeckschichten. Verantwortlich war der 1764 zum Straßenkommissar berufene Ingenieur Philipp-Jakob Klumpp aus Württemberg. Ab 1788 wurden auf Befehl des Kurfürsten Friedrich August III. auch längere Abschnitte chaussiert, so die „Salzstraße von Dürrenberg (heute Bad Dürrenberg) nach Leipzig, sowie Strecken von Leipzig nach Naumburg und Dresden. Ein „Sächsisches Straßenbaumandat“ von 1781 enthielt bereits eine technische „Anweisung zur Anlegung und Bebauung der Straßen“. Überregionale „Heer-, Stapel- und Landstraßen“ sollten eine Breite von 9 m und diesen untergeordnete „Kommerzialstraßen“ eine solche von 6,80 m erhalten, jeweils

einschließlich von beidseitigen Randstreifen. Vorgegeben war bereits ein geschichteter Aufbau zwischen beidseitigen begrenzenden Tiefborden. Auf einer „Planie“ aus Kies war eine Packlage (Tragschicht) von 15 cm Gesteinsmaterial vorgesehen, darüber ein „Schottervorschlag“ von 7-8 cm Stärke und schließlich eine Deckschicht aus Kies oder Sand mit einer Mächtigkeit von 15 cm.

Der großflächige Ausbau von Chausseen in Preußen begann ebenfalls auf dem heutigen Gebiet des Landes Sachsen-Anhalt. In der Regierungszeit Friedrich Wilhelm II. sollten zunächst Straßen im zum Staatsverband gehörenden Herzogtum Magdeburg und Fürstentum Halberstadt ausgebaut werden, weil dort einerseits der Zustand der Wege als besonders schlecht galt und andererseits die überregional bedeutenden Verbindungen von Hamburg und Braunschweig nach Leipzig existierten. Zur Konzeption wurde ein Wettbewerb gegen ein Preisgeld bei der Königlichen Akademie der Wissenschaften ausgelobt. Im Mai 1787 wurde der Bau von Chausseen von Magdeburg und Halberstadt nach Leipzig beschlossen, welche sich südlich von Magdeburg vereinigen sollten, mit einem weiteren Verlauf über Neugattersleben, Bernburg, Könnern, Halle und Großkugel bis zur kursächsischen Grenze. Der Bau erfolgte unter Leitung einer Chausseebaukommission unter dem Geheimen Baurat Stegeman mit einer Kanzlei in Magdeburg. Zum Aufbau heißt es: „Im Frühjahr wurden zu beiden Seiten der Steinbahn etwa 47 cm hohe Bordsteine etwa 30 cm eingegraben und auf ihrer Innenseite der eingebrachte Boden bis etwa 10 cm gegen die Mittellinie abgetragen, so daß ein leicht gewölbter Raum zwischen den Borden entstand. Die untere Lage der Straßendecke bestand aus groben, harten Steinen, die an den Borden 13 cm und in der Straßenmitte 26 cm hoch von Hand möglichst dicht gepackt wurden. Darauf schüttete man faustgroße Steine, an den Borden 8 cm und in der Straßenmitte 13 cm hoch. Auf beiden Lagen wurden so viele Steine etwa in der Größe von Taubeneiern aufgetragen, bis nach Stampfen oder Schlagen mit 5 kg schweren Schlegeln die Steinbahn an den Borden 24 cm und in der Mitte 48 cm stark war. Der notwendige Überzug mit ganz kleinen Steinen oder Kies unterblieb allerdings in vielen Fällen aus Ersparnisgründen.“ Siehe Liman (1993).

Das Teilstück der Chaussee von Magdeburg bis Neugattersleben an der Grenze zu Anhalt-Köthen war bereits 1792 fertiggestellt, der Abschnitt in dem anhaltischen Fürstentum jedoch erst Ende 1797. Ein weiterer wichtiger Chausseebau in Preußen betraf die Verbindung zwischen den Residenzen Berlin und Potsdam. Für diese wurde um 1789 eine Probestrecke im Potsdamer Neuen Garten angelegt, welche bis heute als Parkweg erhalten ist. Zum schließlich gebauten Chausseeabschnitt von Schönberg über Zehlendorf bis zur Glienicker Brücke heißt es: „[Er] war 11,30 m breit und das Planum leicht aufgewölbt. Zwischen die Bordsteine kam eine 15 bis 20 cm starke Schicht ungesiebter Kies, und dieser wurde mit groben Felssteinen oder sehr grob zerkleinerten anderen Steinen beschichtet. Fuhrwerke mußten nun den Winter durch darüber hinweg rollen, um alles zu verdichten. Im Frühjahr und Sommer erhielt dann die Straße eine Decke aus einem Gemisch aus Kies und Schotter. Die Deckenstärke war in der Mitte mit 50 cm bemessen. Beidseits der Fahrbahn lief ein 1,50 m breiter Bankettstreifen, der mit Pappeln bepflanzt wurde.“ Siehe Liman (1993).

Der Ausbau von Chausseen in wassergebundener Bauweise wurde im Verlauf des 19. Jahrhunderts weiterentwickelt und perfektioniert. Die seinerzeit entwickelten Techniken bildeten die Grundlage des heutigen Baus wassergebunden befestigter Parkwege – Untersuchungsgegenstand dieser Studie.

Landschaftliche Gärten bis zur Mitte des 19. Jahrhundert

Zu Beginn des 19. Jahrhundert wurden die Wege allmählich kunstvoller und differenzierter, vom Spazierweg bis zum Fahrweg ausgestaltet und damit auch technisch anspruchsvoller (Rohde & Schwarz 2008). In diesem Zusammenhang ist auch die erste Gärtnerlehranstalt zu Schöneberg und Potsdam zu sehen, die zahlreiche Vertreter der sog. Lenné-Meyerschen Schule hervorbrachte und u.a. für die Pflanzdarstellung und Konstruktion von Wegen steht (Rohde & Schwarz 2008).

Die im 18. Jahrhundert von England ausgehende industrielle Revolution beförderte neue Erfindungen und Aufgaben, die auch den Wegebau in den Landschaftsgärten beeinflussten. In dem Zusammenhang sind die Forschungen des Schotten Mac Adam (1756-1836) und die Erfindung des Zementes durch den Engländer Joseph Aspin (1779-1855) zu sehen. Mitte des 19. Jahrhunderts entstanden in Europa erste Portlandzementwerke. Auch dieser Baustoff fand umgehend seine Anwendung in der Gartenbaukunst, z.B. für Kantensteine der Wege (Rohde & Schwarz 2008).

Gärten des gemischten Stils seit Mitte des 19. Jahrhunderts und des Reformstils zu Beginn des 20. Jahrhunderts

Mit voranschreitender Forschung zum Wege- und Straßenbau wurden auch die entsprechenden Techniken verbessert und neue Materialien etwa für den Unterbau und die Deckschichten herangezogen. Mit zunehmender Motorisierung im Straßenverkehr und später bei den Unterhaltungsbetrieben für Gartenanlagen ergab sich eine steigende Notwendigkeit, auch Parkwege mit schwereren Fahrzeugen nutzen zu können. Hieraus wurden weitere Anforderungen an den Wegebau, die zu verwendenden Materialien und etwa die Kanteneinfassungen abgeleitet. In Abhängigkeit von Benutzungsart und -intensität wurden auch für wassergebundene Wegebefestigungen unterschiedlich Ausbauprodukte erarbeitet. Sowohl Anlagen des gemischten Stils, als auch solche des Reformstils besitzen häufig ein hinsichtlich der Nutzungsbestimmungen differenziertes System von Wegen. Davon abhängig wurden Wegebauart und Ausbauprodukt bzw. -stärke festgelegt.

7 Vor-Ort-Untersuchungen, Evaluierung bestehender Wegebefestigungen

An den in Tab. 1 benannten Wegebauten erfolgt ein Monitoring der Wegebefestigung und eine Beschreibung des derzeitigen Zustands und eine Schadensbeschreibung betroffener Wegeabschnitte. Referenzobjekte werden unter Gliederungspunkt 12 beschrieben.

Tab. 1 Vor-Ort-Untersuchungen, Nachuntersuchung, Evaluierung bestehender Wegebefestigungen und Referenzobjekte, Fallbeispiele

Ort, Name	Maßnahme, Material, geplant, ausgeführt	Bemerkung
Hohenerxleben, Schlosspark	1 km Gussasphalt	Analyse 2023
Neugattersleben, Schlosspark	Erneuerung der wassergebunden befestigten Wege	Analyse 2023
Dessau, Vorderer Tiergarten	Ausführung eines Wegeabschnitts in Luwadur (epoxidharzgebunden)	Analyse 2021/2022
Dessau, Kühnauer Park	differenzierten Herangehensweise - 80% der Wegedecken als wassergebundene Deckschicht und nur in kritischen Bereichen, wie z.B. Anstiegen, Epoxidharz oder Asphalt	Analyse 2021/2022
Großjena, Gutspark	wassergebundenen Wegedecken	Monitoring 2021
Halle, Gimritzer Park	wassergebundenen Wegedecken	Ausführung Frühling 2016 Monitoring 04.2021
Leipzig, Fritz-von-Haack-Anlage am Bundesverwaltungsgericht	epoxidharzgebunden	nach einer Standzeit von wenigen Jahren bereits Rückbau erfolgt
Leipzig, Thomaskirchhof	epoxidharzgebunden	nach einer Standzeit von wenigen Jahren bereits Rückbau erfolgt
Leipzig, Lene-Vogt-Park	epoxidharzgebunden	nach einer Standzeit von wenigen Jahren bereits Rückbau erfolgt
Halle, Peißnitzinsel	asphaltgebundene Wegedecken	Monitoring 2021
Magdeburg, Pappelallee	wassergebundene Wegedecke, organisch-mineralisch stabilisiert	Dokumentation Einbau Mowestab im Dezember 2020 Monitoring Dezember 2022
Magdeburg, Pappelallee	asphaltgebundene Wegedecke, farblich angepasst	Monitoring 2020, 2022
Magdeburg, Klosterberggarten	asphaltgebundene Wegedecke	Monitoring 2021, Analyse 2023
Magdeburg, Herrenkrugpark	asphaltgebundene Wegedecken, farblich angepasst	Monitoring 2021, Analyse 2022
Magdeburg, Stadtpark Rotehorn	asphaltgebundene Wegedecke, farblich angepasst	Monitoring 2021
Magdeburg, Fürstenwallpark	wassergebundene Wegedecke mit Stabilisator (Mowestab)	Monitoring 2021
Leipzig, Johannapark	wassergebundene Wegedecke Erneuerung der Deckschicht 2020	Monitoring 2021, Analyse 2022
Leipzig, Clara-Zetkin-Park	wassergebundene Wegedecke	Monitoring 2021
Leipzig, ehemal. DHFK	wassergebundene Wegedecken, epoxidharzgebundene Decke (Possehl) auf Asphalttragschicht	Analyse 2022
Leipzig, Schlosspark Lützschena	wassergebundene Wegedecken	Analyse 2023
Halberstadt, Spiegelsberge	wassergebundene Wegedecke	Monitoring 2021, Robinienholz-Wegekante nach Neueinbau, Wasserablaufgrinnen aus Holz
Drübeck, Klostersgarten	wassergebundene Wegedecke	Monitoring 2021, Holzwegekante, historische Rogenstein-Wegekanten

7.1 Farbiger Asphalt in den Magdeburger Parkanlagen

Einsatz von farbigem Asphalt nach Hochwasserschäden in den Magdeburger Parkanlagen Klosterberggarten, Herrenkrugpark und Stadtpark Rotehorn

Durch die Landschaftsarchitektin Frau Sabine Keller, Stadtplanungsamt Magdeburg, Sachgebiet Landschafts- und Freiraumplanung, wird berichtet (Keller, 2020):

Die Häufung von Hochwasserereignissen in den letzten Jahren 2002 und 2013 (2006 und 2011 eher moderat) führten in kurzen Zeiträumen zu massiven Schäden an der Wegebausubstanz der wassergebundenen Decken in den historischen Parkanlagen Klosterberggarten, Herrenkrugpark und Stadtpark Rotehorn. Etwa 40 km Wegenetz waren in den drei Parkanlagen betroffen und mussten nach den jeweiligen Überflutungsereignissen grundhaft saniert bzw. neu gebaut werden.

„Für die hochwassergefährdeten Bereiche wurde ein stabileres, der historischen wassergebundenen Decke, optischen möglichst ähnliches Material gesucht, das den Anspruch einer dauerhaften Farb- und Strukturbeständigkeit ermöglicht.“ „Nach Versuchen mit Gussasphalt, deren Ergebnisse nicht befriedigend waren, kam man 2011 in Zusammenarbeit zwischen dem Eigenbetrieb Stadtgarten und Friedhöfe, der Unteren Denkmalschutzbehörde, dem Sachgebiet Landschafts- und Freiraumplanung, einer Baufirma und einer Asphaltfirma zu einem speziellen Walzasphalt, der auch mit Laborversuchen geprüft werden konnte.“ Als Zuschlag wurde ist das gleiche Gestein, das in den dynamischen Schichten und Deckschichten der wassergebundenen Wege verwendet wurde. „Beim Klosterberggarten Melaunegranit (gelb), im Stadtpark Rotehorn und Herrenkrugpark Mammendorfer Andesit (rotbraun). Dieses Material wurde bei den ersten Wegen im Stadtpark Rotehorn auch zum Absplitten verwendet, um die Oberfläche von Anfang an mehr zu strukturieren. Darauf verzichtete man ab 2018, weil der Effekt zu gering war und das Gestein innerhalb kurzer Zeit in die Vegetationsflächen seitlich der Wege, ausgetragen wurde.“

„Die Wege sollen hochwassersicher sein, daher wurde ein Regelquerschnitt entworfen, der das erforderliche optische Erscheinungsbild ohne sichtbare Tiefbordeinfassung gewährleistet. Diese Bauweise wurde im Stadtpark Rotehorn ausgeführt. Diese Bauweise bewährte sich beim Hochwasser 2013. Es wurden lediglich Schäden in den Vegetationsflächen verursacht, die relativ schnell und einfach beseitigt werden konnten.“ „Nach dem Hochwasser 2013 wurden Fördermittel für die Hochwasserschadensbeseitigung beantragt und die Zielstellungen der drei Parkanlagen bezüglich des Wegebaus fortgeschrieben. Auch nach diesem Hochwasser war die Verkehrssicherheit an vielen Stellen eingeschränkt und die Anlagen mussten wieder gesperrt werden.“ „Nach einem langen denkmalrechtlichen Genehmigungsprozess mit fachlichen Auseinandersetzungen auf allen Ebenen kam es zu einer Dissens-Entscheidung für die teilweise Asphaltierung, die die Hauptwege in den drei Parkanlagen umfasst. Für die zu asphaltierenden Wege wurden Grundsätze für die Baudurchführung aufgestellt.“ Demnach sollte die historische Wegeführung in Lage und Höhe beibehalten werden. „Im ersten Schritt wurden die Gräben für die Wegekanten im Bereich von Baumkronen manuell hergestellt. Danach erfolgte die genaue Lage- und Höhenabsteckung der Wege, die durch Auftraggeber und Untere Denkmalschutzbehörde abgenommen oder auch verändert wurden. Auszubilden war grundsätzlich ein Dachprofil mit 1,5 bis 2% Gefälle, ausnahmsweise ein einseitiges Gefälle im Bereich von Wegeeinmündungen und abhängig von der Gesamtgeländesituation.“

Zum damaligen Zeitpunkt verfügbare Asphaltfertiger konnten Dachgefälle in unterschiedlichen Breiten ohne Naht in der Mitte herstellen. „Die hochwassersichere Bauweise sollte durchgängig hergestellt werden, so dass keine Bereiche entstehen konnten, in denen vorzeitig Schäden wie Risse auftreten können. Tiefborde, die vor Unterspülung schützen sollen, wurden in Beton gesetzt. Bis zur Oberkante der Tiefbordeanlage wurde Mineralgemisch eingebracht. Die 6–8 cm dicke Asphalttragschicht

(schwarz) überbaute die Tiefbordanlage. Sie sollte in der genauen Breite eingebaut werden. Die farbige, 3 bis 4 cm starke Asphaltdeckschicht wurde so aufgebracht, dass die Asphalttragschicht beidseitig jeweils wenige Zentimeter Überstand behält und so die Randbereiche der Deckschicht stabil bleiben. Die Bankette wurden bündig an die Asphaltdeckschicht herangearbeitet.“

„Erhalt und Schutz der Bäume waren zu gewährleisten. Hierfür wurden zwei verschiedene Wurzelbrücken eingesetzt. Die im Bereich der Tiefbordsteine manuell hergestellten Wurzelbrücken wurden auch verwendet, wenn flächige Wurzelbrücken aufgrund der Höhensituation nicht realisiert werden konnten. In den meisten Fällen wurden flächige Wurzelbrücken eingebaut. In allen drei Parkanlagen sind die asphaltierten Wege inzwischen fertiggestellt.“

Ein wesentlicher Vorteil der Asphaltierung ist nach Keller (2020) eindeutig die Haltbarkeit der Wege, was durch das Extremhochwasser 2013 bestätigt wurde. „In Lage und Höhe unterscheiden sich die Asphaltwege nicht von wassergebundenen Wegeführungen“, so Keller (2020). „Die optische Qualität wird hinsichtlich der Farbigkeit gut erreicht, die gewünschte Oberflächenstruktur wird im Laufe der Zeit ausgeprägter werden (Keller, 2020).

„Technisch schwierig und bisher fast unmöglich ist ein lagegenauer Einbau der Asphaltsschichten. Eine exakte Führung ohne Abweichungen zur Seite erfordert höchste Ansprüche an das Können des Fertiger-Fahrers, der ohne Führung durch eine sichtbare Kante fahren muss. So entsteht oft ein zu breiter Überstand der Asphalttragschicht, was eine Begrünung erschwert, oder ein zu geringer Überstand, der die Stabilität der Deckschichtkante verringert. Bei zu breitem Überstand sind Nacharbeiten erforderlich. Ebenso muss das überschüssige Deckschichtmaterial entfernt werden. Ansonsten wird die fachgerechte Ausbildung des Banketts verhindert. Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Bauunternehmen, die meist Straßenbauunternehmen sind, für die Belange der Parkanlagen sensibilisiert, also mit dem Thema Landschaftspark vertraut gemacht werden mussten. Es handelt sich nicht um Baustellen, bei denen Ausführungsplanungen exakt umgesetzt werden können. Sie erfordern sehr viel höheren Zeit- und Abstimmungsaufwand sowohl beim Auftraggeber als auch beim Auftragnehmer, da die endgültigen Lage- und Höhenfestlegungen erst während der Ausführung mittels Absteckung erfolgen können. Das trifft ebenso auf die Arbeiten in den Wurzelbereichen und das Angleichen der Bankette an die Vegetationsflächen zu. Ein weiterer wesentlicher Nachteil des farbigen Walzasphaltes ist, dass bei Aufgrabungen Kleinstmengen zur Reparatur und Wiederherstellung der Befestigung benötigt werden, die durch den technologischen Aufwand in der Mischanlage unverhältnismäßig teuer werden. Außerdem entstehen Fugen, die mit einem elastischen Fugenmaterial vergossen werden müssen. Im Jahr 2019 konnte ein farblich passendes rotbraunes Fugenmaterial entwickelt werden. Das Einbringen in die Fuge erfolgt allerdings ungenügend präzise, so dass das Erscheinungsbild nach Fertigstellung nicht zufrieden stellt. Nach Abwägung der Vor- und Nachteile dieser Bauweise kann man eindeutig resümieren, dass sie auf Anlagen beschränkt bleiben sollte, die stark durch regelmäßige Hochwasserereignisse gefährdet sind.“ (vergl. Keller, 2020).

„In diesen drei Parks, mit einer Gesamtfläche von ca. 213 ha, kommt der Haltbarkeit der Wege eine große Bedeutung zu, denn die Hochwasserschäden an der Vegetation, an Brücken, Stufenanlagen, Kleinarchitekturen, Ausstattungen usw. erfordern ebenfalls einen sehr hohen Pflege-, Reparatur- und Wiederherstellungsaufwand.“ (vergl. Keller, 2020).

Klosterbergegarten

Ein nach dem Winter, im Frühjahr 2021, durchgeführtes Monitoring zeigte eine gelblich beige asphaltgebundene Wegedecke in einem sehr guten Zustand. Allein in wenigen Fällen waren Humusaufgaben oder Bremsspuren von Fahrradreifen zu verzeichnen. Optisch auffällig sind hervortretende Verbindungsfugen zwischen den in einem Stück gefertigten Wegeabschnitten.

Die Asphaltausführung verleitet zu einer intensiveren Nutzung. Der Park, als Ort der Ruhe und der Erholung des erholsamen Spazierens wird zur Freizeitsportanlage. Es entsteht so ein Interessenskonflikt zwischen Erholungssuchenden und Sporttreibenden.

Allerdings wurden hauptsächlich die Hauptwege asphaltiert, ein geringer Teil wurde wassergebunden ausgeführt und erlaubt weiterhin die gewohnten Eigenschaften.



Abb. 3 Magdeburg, Klosterbergegarten, farbige Asphaltdecke in einem sehr guten Zustand (Zötzl, 2021)



Abb. 4 Magdeburg, Klosterbergegarten, farbige Asphaltdecke. Sehr seltene Abbrüche im Randbereich (Zötzl, 2021)



Abb. 5 Magdeburg, Klosterbergegarten, farbige Asphaltdecke. ungenaue Randführung bei der Herstellung (Zötzl, 2021)

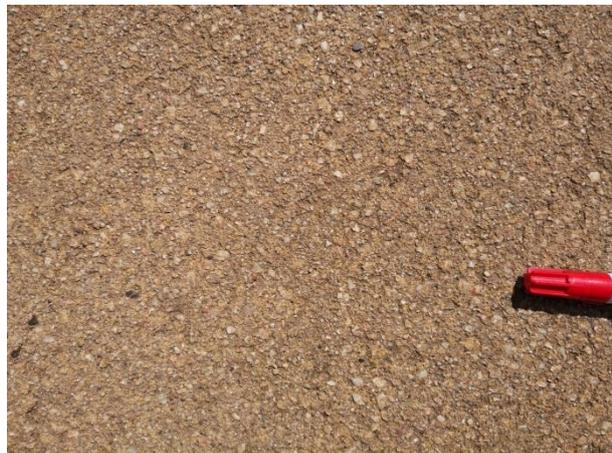


Abb. 6 Magdeburg, Klosterbergegarten, farbige Asphaltdecke mit Melaunegranit in guter Anpassung an die ursprüngliche wassergebundene Decke (Zötzl, 2021)

Rotehornpark

Das nach dem Winter, im Frühjahr 2021, durchgeführte Monitoring zeigte eine rötliche asphaltgebundene Wegedecke in einem recht guten Zustand. In einigen Abschnitten treten doch recht häufig kleine Löcher im Asphalt auf, die mit einem in Beige ausgebleichten Material geschlossen wurden.

(siehe oben). Auch die Verbindungsfugen zwischen den Abschnitten wurden mit einem heute ausgeblichenem Material verfüllt.



Abb. 7 Magdeburg, Rotehornpark, rote Asphaltdecke, zwei extra gefertigte Abschnitte mit ausgeblichenener Trennfuge (Zötzl, 2021)



Abb. 8 Magdeburg, Rotehornpark, rote Asphaltdecke, zwei extra gefertigte Abschnitte mit ausgeblichenener Trennfuge (Zötzl, 2021)



Abb. 9 Magdeburg, Rotehornpark, Löcher im Asphalt (Zötzl, 2021)



Abb. 10 Magdeburg, Rotehornpark, mit einem ausgeblichenen Material reparierte Löcher im Asphalt (Zötzl, 2021)



Abb. 11 Magdeburg, Rotehornpark, unterschiedlich eingefärbte Rottöne (Zötzl, 2021)



Abb. 12 Magdeburg, Rotehornpark, wassergebundene Wegedecke ohne Einfassung mit Humusaufgabe im Randbereich und Materialauswurf in die Rasenfläche (Zötzl, 2021)

Magdeburg, Herrenkrugpark

Ein nach im Winter 2022, durchgeführtes Monitoring zeigte eine rötliche asphaltgebundene Wegedecke in einem sehr guten Zustand.



Abb. 13 Magdeburg, Herrenkrugpark, rötlich eingefärbte Asphaltdecke, Wegekrenz zum wassergebundenen Deckenaufbau (Zötzl, 2022)



Abb. 14 Magdeburg, Herrenkrugpark, rötlich eingefärbte Asphaltdecke, Wegekrenz mit Anschluss an weitere Asphaltdecke (Zötzl, 2022)



Abb. 15 Magdeburg, Herrenkrugpark, rötlich eingefärbte Asphaltdecke im Deichbereich (Zötzl, 2022)



Abb. 16 Magdeburg, Herrenkrugpark, stark rot eingefärbte Asphaltdecke, Deichbereich (Zötzl, 2022)

7.2 Magdeburg, Fürstenwallpark

Im Fürstenwallpark wurde eine stabilisierte wassergebundene Wegedecke ausgeführt und mit einem Granitpflasterstein gefasst. Die Wege sind in einem sehr gut gepflegten Zustand. Bis auf wenige Auflagen von Randbepflanzungen werden keine Probleme festgestellt.



Abb. 17 Magdeburg, Fürstenwallpark, stabilisierte gelbbeige wassergebundene Wegedecke mit Granitpflastersteineinfassung (Zötzl, 2021)



Abb. 18 Magdeburg, Fürstenwallpark, stabilisierte gelbbeige wassergebundene Wegedecke mit Granitpflastersteineinfassung (Zötzl, 2021)

7.3 Asphaltgebundene Wegedecken auf der Peißnitzinsel in Halle (kein Denkmal)

In direkter Nähe zur Schafsbrücke, direkt parallel zur Saale, befindet sich ein asphaltierter Nebenweg, der augenscheinlich in den letzten Jahren ungepflegt blieb. Hier zeigt sich ein Spektrum an Schäden. Neben der Humusaufgabe können Ausbrüche, Vegetationsübergriffe, Aufwölbungen durch Wurzeldruck und Rissbildungen durch Absenkung beobachtet werden. Eine Pflege sollte erfolge, da der Weg in diesem Zustand eine Unfallgefahr darstellt.

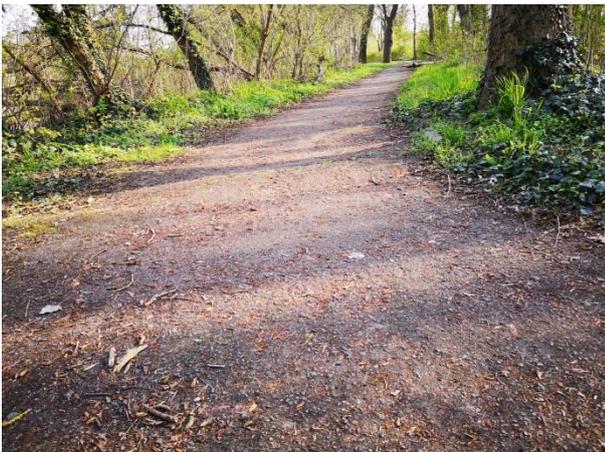


Abb. 19 Halle, Peißnitzinsel, asphaltierter Nebenweg parallel zur Saale mit Humusaufgabe (Zötzl, 2021)



Abb. 20 Halle, Peißnitzinsel, asphaltierter Nebenweg parallel zur Saale mit Humusaufgabe und Rissbildung durch Absenkung (Zötzl, 2021)



Abb. 21 Halle, Peißnitzinsel, asphaltierter Nebenweg parallel zur Saale, Rissbildung durch Absenkung (Zötzl, 2021)



Abb. 22 Halle, Peißnitzinsel, asphaltierter Nebenweg parallel zur Saale, Humusauflage, Rissbildung durch Absenkung, Aufwölbung durch Wurzeldruck, Ausbruch, Verkrautung (Zötzl, 2021)



Abb. 23 Halle, Peißnitzinsel, asphaltierter Nebenweg parallel zur Saale, Humusauflage, ausgebrochener Teil der Decke (Zötzl, 2021)



Abb. 24 Halle, Peißnitzinsel, asphaltierter Nebenweg parallel zur Saale, Ausbruch, Verkrautung (Zötzl, 2021)

7.4 Wassergebundene Wegedecken im Gimritzer Park in Halle

Die wassergebundenen Wegedecken im Gimritzer Park wurden 2016 eingebaut. Die Wege, aus einem rötlichem Hartgestein (handelt sich nicht um einen regionalen Porphyry) wurden fast durchgängig mit einem Betonkantenstein gefasst. Das Monitoring im Frühjahr 2021 zeigte, in gut belüfteten Bereichen ein zufriedenstellendes Erscheinungsbild. In durch Vegetation schlecht belüfteten Wegeabschnitten, kommt es zu einer Vermoosung und zum Übergriff der Vegetation auf die Wegefläche. Die ausgebildete Bauweise mit durchgängiger Betonkannte behindert in einigen Abschnitten die Wasserableitung. Hier kommt es zu einem Feuchtestau und zu Besiedlung durch Moose.



Abb. 25 Halle, Gimritzer Park, wassergebundene Deckschicht mit einer nahezu durchgängigen Betonsteineinfassung (Zötzl, 2021)



Abb. 26 Halle, Gimritzer Park, wassergebundene Deckschicht: Links: Übergreifen der Vegetation in nicht begrenzten Bereichen auf den Weg (Zötzl, 2021)

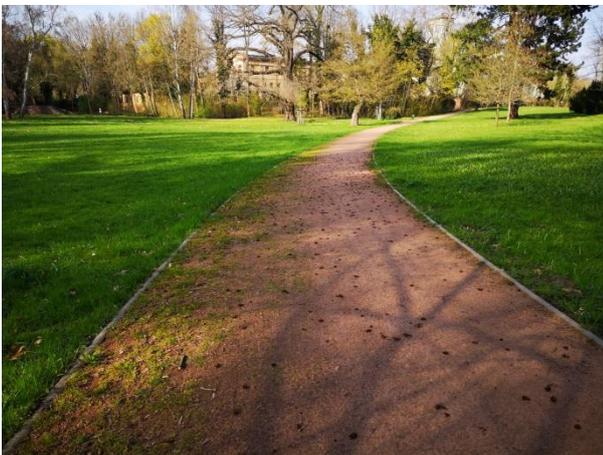


Abb. 27 Halle, Gimritzer Park, wassergebundene Deckschicht, Humusauflage. Die Betonsteineinfassung behindert den Abfluss von Niederschlagswasser, was zu einer Vergrünung, links im Bild, führt. (Zötzl, 2021)



Abb. 28 Halle, Gimritzer Park, wassergebundene Deckschicht. Die Betonsteineinfassung behindert den Abfluss von Niederschlagswasser, was zu einer Vergrünung, links im Bild, führt. (Zötzl, 2021)



Abb. 29 Halle, Gimritzer Park, wassergebundene Deckschicht. Die Betonsteineinfassung behindert den Abfluss von Niederschlagswasser, was zu einer Vergrünung im Kantenbereich führt. (Zötzl, 2021)



Abb. 30 Halle, Gimritzer Park, wassergebundene Deckschicht, Humusauflage. (Zötzl, 2021)



Abb. 31 Halle, Gimritzer Park, wassergebundene Deckschicht. Betonsteineinfassung zeigt im Kantenbereich, mit dem Gefälle Auswaschungen (rechts) und einen Materialeintrag in die Vegetationsfläche über die Kante, links. (Zötzl, 2021)



Abb. 32 Halle, Gimritzer Park, wassergebundene Deckschicht, Humusauflag. Frostlochbildung im Bereich abtropfender Bäume (Zötzl, 2021)

7.5 Wassergebundene Wegedecken im Gutspark in Großjena

Die wassergebundenen Wegedecken im Gutspark Großjena wurden im Jahr 2016 angelegt. Das Deckmaterial besteht aus einem Kupferschieferabraummaterial von einer Halde aus dem nahen Mansfelder Land. Es wurde demnach nicht extra für den Einsatz im Wegebau gebrochen. Die Wegedecken werden nicht durch eine Rasenkante begrenzt. Eine Besonderheit ist hier zudem, dass aus Gründen des Gehölzschutzes in größeren Bereichen auf eine Tragschicht verzichtet wurde. Das Monitoring im Frühjahr 2021 zeigte, in gut belüfteten Bereichen ein zufriedenstellendes Erscheinungsbild. Nur an wenigen Stellen wurden Aufgrabungen festgestellt. Anders in durch Randvegetation schlecht belüfteten Wegeabschnitten. Hier kommt es zu einer Vermoosung und zum Übergriff des Rasens auf die Wegefläche. Gerade im Kreuzungsbereich konnte eine beginnende Verkrautung festgestellt werden.



Abb. 33 Gutspark Großjena, wassergebundene Deckschicht, nicht zur Vegetationsfläche begrenzt: zufriedenstellendes Erscheinungsbild in gut belüfteten Bereichen (Zötzl, 2021)

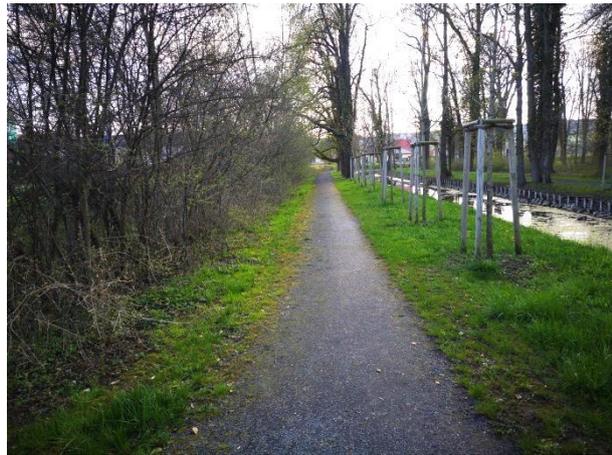


Abb. 34 Gutspark Großjena, wassergebundene Deckschicht, ohne Wegekanten, schlecht belüftete Bereiche durch dicht anstehende hohe Vegetation. (Zötzl, 2021)



Abb. 35 Gutspark Großjena, wassergebundene Deckschicht, ohne Wegekanten, schlecht belüftete Bereiche durch dicht anstehende hohe Vegetation. Übergreifen der Vegetation auf den Weg. (Zötzl, 2021)



Abb. 36 Gutspark Großjena, wassergebundene Deckschicht, ohne Wegekanten, schlecht belüftete Bereiche durch dicht anstehende hohe Vegetation. Vegetationsübergreif, im hinteren Bereich, bei niedriger Hecke kommt es zu einer besseren Belüftung und kein Ausbreiten der Vegetationsfläche auf den Weg (Zötzl, 2021)



Abb. 37 Gutspark Großjena, wassergebundene Deckschicht, ohne Wegekanten, beginnende Verkrautung im Kreuzungsbereich (Zötzl, 2021)



Abb. 38 Gutspark Großjena, wassergebundene Deckschicht, ohne Wegekanten, beginnende Verkrautung im Kreuzungsbereich (Zötzl, 2021)

7.6 Wassergebundene Wegedecken im Johanna- und Clara-Zetkin-Park in Leipzig

Johannapark, Wege an den Schwanenteichbrücken: Die im Jahr 2019/20 ernuerten Deckschichten zeigen nach dem Winter, vor der Frühjahrspflege, ein gutes Bild. Es bestehen allerdings Humusauflagen und sehr geringfügige Verkrautungen in den Randbereichen. Clara-Zetkin-Park, zwischen Glashaus und Parkbühne: Die wassergebundenen Deckschichten zwischen Glashaus und Parkbühne wurden 2020 erneuert. Die Wegeflächen stehen nach dem Winter gut und zeigen die üblichen Humusauflagen. In schattigen Bereichen, die ein Antrocknen verhindern kommt es bei einer Ausführung ohne Begrenzung zur Vegetationsfläche, schnell zu einem Übergriff der Vegetation auf die Wegefläche.



Abb. 39 Leipzig, Clara-Zetkin-Park, Blickrichtung Parkbühne, wassergebundene Deckschicht, nicht zur Vegetationsfläche begrenzt (Zötzl, 2021)



Abb. 40 Leipzig, Clara-Zetkin-Park, zwischen Glashaus und Parkbühne, wassergebundene Deckschicht, nicht zur Vegetationsfläche begrenzt mit Humusauflagen (Zötzl, 2021)



Abb. 41 Leipzig, Clara-Zetkin-Park, Blickrichtung Glas-haus, wassergebundene Deckschicht, nicht zur Vegetationsfläche begrenzt (Zötzl, 2021)



Abb. 42 Leipzig, Clara-Zetkin-Park, Blickrichtung Glas-haus, wassergebundene Deckschicht, nicht zur Vegetationsfläche begrenzt. Daher schneller Übergriff der Vegetation auf die Wegefläche (Zötzl, 2021)



Abb. 43 Leipzig, Clara-Zetkin-Park, Weg parallel zur Anton-Bruckner-Allee, wassergebundene Deckschicht, Wegeingrenzung durch Schlackesteine (Zötzl, 2021)



Abb. 44 Leipzig, Clara-Zetkin-Park, Weg parallel zur Anton-Bruckner-Allee, wassergebundene Deckschicht, Wegeingrenzung durch Schlackesteine, Ausspülung über die Begrenzung, Stolpergefahr (Zötzl, 2021)

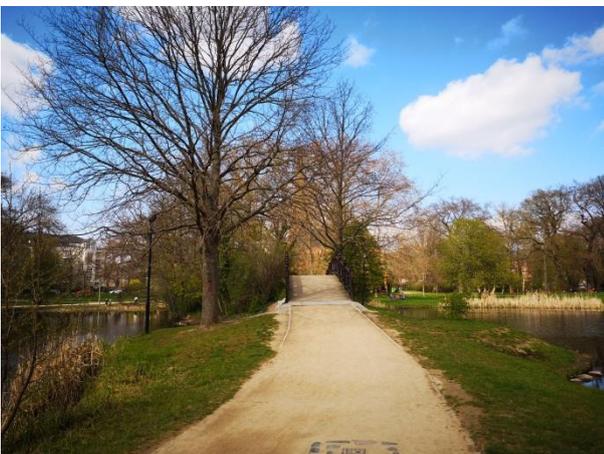


Abb. 45 Leipzig, Johannapark, Brücke am Inselteich, durch Bandeisenkanten gefasste wassergebundene Deckschicht (Zötzl, 2021)

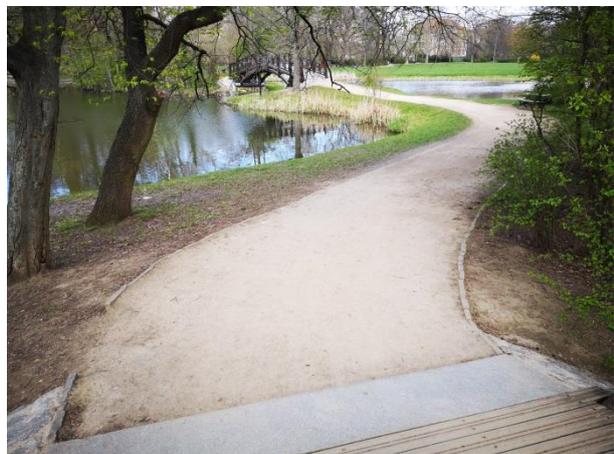


Abb. 46 Leipzig, Johannapark, Brücke am Inselteich, durch Steinrasenkanten gefasste wassergebundene Deckschicht (Wasserabführung links) (Zötzl, 2021)



Abb. 47 Leipzig, Johannapark, Brücke am Inselteich, durch Bandeisenrasenkanten gefasste wassergebundene Deckschicht mit, Vegetation führt in Randbereichen zur Verkrautung (Zötzl, 2021)



Abb. 48 Leipzig, Johannapark, Brücke am Inselteich, durch Bandeisenrasenkanten gefasste wassergebundene Deckschicht mit, Austrag den Materials über die Rasenkante in die Vegetationsfläche (Zötzl, 2021)



Abb. 49 Leipzig, Johannapark, Asphaltweg parallel Karl-Tauchnitz-Straße, Nähe Herzliya-Platz, geschädigte asphaltgebundene Deckschicht (Zötzl, 2021)



Abb. 50 Leipzig, Johannapark, Asphaltweg parallel Karl-Tauchnitz-Straße, Nähe Herzliya-Platz, Übergangsbereich zur wassergebundenen Deckschicht: Große schollenartige Ablösungen der Oberflächen der asphaltgebundenen Deckschicht (Zötzl, 2021)

7.7 Epoxidharzgebundene Wegedecken im Lene-Voigt-Park in Leipzig

Die in Leipzig, im Lene-Voigt-Park verwendeten Kunstharzbeläge stammen aus dem Jahr 2007 und wiesen ebenfalls bereits nach kurzer Zeit schollige Ablösungen auf und wurden bereits kostenintensiv durch Asphalt ersetzt. Die Schädigung wird mit der Versprödung von EP-Harzen durch UV-Strahlung in Verbindung gebracht. Versuche zur UV-Stabilität aktueller EP-Binder wurden an der Hochschule durchgeführt.



Abb. 51 Leipzig, Lene-Voigt-Park, große schollenartige Ablösungen der Oberflächen von epoxidharzgebundenen Deckschichten (Benecken, 2016)



Abb. 52 Leipzig, Lene-Voigt-Park, große schollenartige Ablösungen der Oberflächen von epoxidharzgebundenen Deckschichten (Benecken, 2016)



Abb. 53 Leipzig, Lene-Voigt-Park, geschädigte EP-gebundene Deckschicht neben einer asphaltgebundenen Deckschicht (Benecken, 2016)

7.8 Weitere Epoxidharzgebundene Wegedecken in Leipzig

Die in Leipzig, Fritz-von-Haack-Anlage am Bundesverwaltungsgericht und Thomaskirchhof im Zeitraum 1999/2000 verbauten Kunstharzbeläge zeigten nach kurzer Zeit schollige Ablösungen und wurden bereits kostenintensiv ausgebaut und ersetzt. Die Schädigung wird mit der Versprödung von EP-Harzen durch UV-Strahlung in Verbindung gebracht.

7.9 Epoxidharzdecken im Kloster Drübeck

Im Ausstellungsbereich der Klosterkirche Drübeck, in einem separaten Container, wurde im Jahr 2011 die epoxidharzgebundene Wegedecke TERRAWAY eingebaut. Das Material umschließt auch einen historischen Estrichbefund. Es erfolgt keine Bewitterung, jedoch eine Befeuchtung und vermutlich ein gewisser Sulfat- und Nitrateintrag aus dem Boden. Das epoxidharzgebundene Wegematerial ist heute in vielen Bereichen stark entfestigt, sandet ab und muss längerfristig ersetzt werden.

7.10 Epoxidharzdecken im Kühnauer Park in Dessau-Roßlau

Ein Kompromiss zwischen Wahrung des historischen Erscheinungsbildes und Verkehrsanforderungen, wie beispielsweise bei Anstiegen oder verkehrsreichere Abschnitten, wurde durch Kombination wassergebundener Decken mit epoxidharzgebundenen Decken im Jahr 2017 im Kühnauer Park und im Vorderen Tiergarten in Dessau ausgeführt.

Im Fall des Hauptradwegs im Kühnauer Park (Teil des Denkmalbereiches Gartenreich Dessau-Wörlitz und der UNESCO-Welterbestätte) wurde mit der Stadt Dessau (Träger der Liegenschaft) eine abgestufte Vorgehensweise vereinbart. Wegeabschnitte auf ebenem Terrain wurden denkmalgerecht und gemäß dem historischen Vorbild mit wassergebundener Deckschicht ausgebaut werden. Dies betraf den weitaus größten Teil der zu erneuernden Wegetrasse. Daneben gibt es im Bereich von Deichüberquerungen kleine Steigungsbereiche sowie Wegequerungen, die im Fall der Deichsicherung ggf. mit schwerem Gerät befahren werden müssen. In diesen begrenzten Abschnitten wurde eine epoxidharzgebundene Deckschicht (LUWADUR) eingebaut.



Abb. 54 Kühnauer Park, Deichquerung Nähe der Kirche in der Burgkühnauer Straße, Ausführung mit wassergebundener Decke, Vegetation führt in nicht befahrenen Bereichen, in Randbereichen und in der Mitte zur Verkräutung (Zötzl, 2021)



Abb. 55 Kühnauer Park, Deichquerung Nähe der Kirche in der Burgkühnauer Straße, Ausführung mit wassergebundener Decke, Vegetation führt in Randbereichen zur Verkräutung (Zötzl, 2021)



Abb. 56 Deichquerung direkt an der Kirche in der Burgkühnauer Straße, Ausführung mit wassergebundener Decke (Zötzl, 2021)



Abb. 57 Kühnauer Park, Elberadweg, Abschnitt „Fürst Franz“, Deichquerung in der Burgkühnauer Straße, Ausführung von Deichquerung und Steigungsbereich in LUWADUR (Zötzl, 2021)



Abb. 58 Kühnauer Park, Deichquerung in der Burgkühnauer Straße, Ausführung von Deichquerung und Steigungsbereich in LUWADUR, graubeige, epoxidharzgebundene Wegedecke (Zötzl, 2021)



Abb. 59 Steigungsbereich in LUWADUR, Abschnitte mit ausgebildeter Trennfuge mit Metallschiene, Fassung der Außenseiten ebenfalls mit Metallschiene (Zötzl, 2021)



Abb. 60 Steigungsbereich in LUWADUR, Schäden im Außenbereich beider Seiten, an der Trennfuge (Zötzl, 2021)



Abb. 61 Steigungsbereich in LUWADUR, Schäden im Außenbereich beider Seiten, an der Trennfuge, helle Flecken vermutlich durch Reinigungsmittel (Zötzl, 2021)

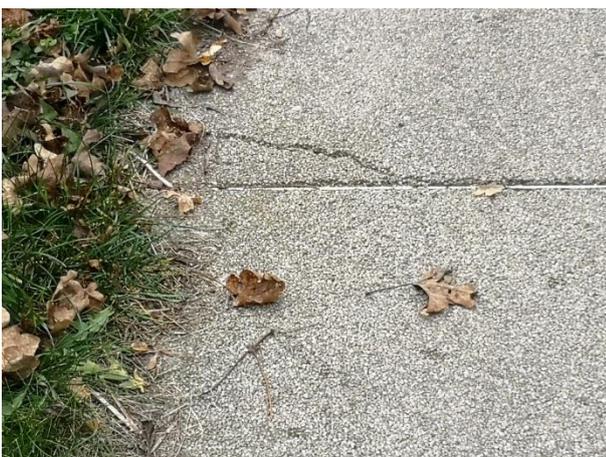


Abb. 62 Steigungsbereich in LUWADUR, Schäden im Außenbereich beider Seiten, an der Trennfuge (Zötzl, 2021)



Abb. 63 Steigungsbereich in LUWADUR, Schäden im Außenbereich beider Seiten, an der Trennfuge (Zötzl, 2021)



Abb. 64 Steigungsbereich in LUWADUR, Schäden im Außenbereich beider Seiten, an der Trennfuge (Zötzl, 2021)



Abb. 65 Metallschiene fungiert auch als Rasenkante (Zötzl, 2021)



Abb. 66 Erste Ausbrücke und erste Begrünungen im Bereich der Metallschiene zwischen den einzelnen Abschnitten (Zötzl, 2021)

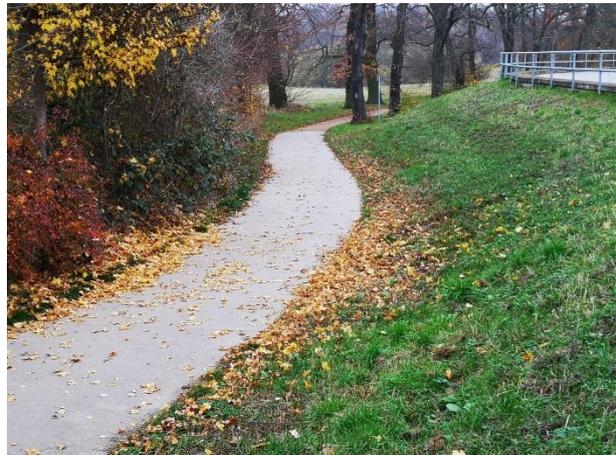


Abb. 67 Ende der Steigung und Übergang von der epoxidharzgebundenen Decke zur wassergebundenen Decke (Zötzl, 2021)



Abb. 68 Ende der Steigung und Übergang von der epoxidharzgebundenen Decke zur wassergebundenen Decke (Zötzl, 2021)



Abb. 69 Weiterführung des Weges mit wassergebundener Decke (Zötzl, 2021)



Abb. 70 Übergang von der epoxidharzgebundenen Decke zur wassergebundenen Decke, entlang der Metallkante kommt es zur Befeuchtung und zu ersten Ausbrüchen im Bereich der Epoxidharzdecke (Zötzl, 2021)



Abb. 71 Bereich der wassergebundenen Decke mit Spurrinnen und anschließender Pfützenbildung (Zötzl, 2021)



Abb. 72 Bereich der wassergebundenen Decke mit Spurrinnen und anschließender Pfützenbildung (Zötzl, 2021)

Auch im Bereich des Löwentors wurde die wassergebundene Decke im Bereich der Deichüberquerung in Verbindung mit einem Steigungsbereich und einer Wegequerung des Deichwegs mit der epoxidharzgebundenen Decke kombiniert, um den Verkehr mit schwerem Gerät für Deichsicherungs- und Pflegearbeiten zu verbessern. Im Jahr 2017 wurde ebenfalls LUWADUR mit dem gleichen Zuschlag eingebaut.

Die Oberfläche wirkt im Gegensatz zu dem ebenfalls 2017 eingebauten Material an der Querung zum „Fürst Franz“-Radweg dunkler, auf den ersten Blick wie eine stark bewitterte schwarze Asphaltdecke, aus der die Zuschläge hervortreten. Ursache ist eine stärkere Besiedlung der Kornzwischenräume mit Moosen und Algen, was vermutlich mit dem dichteren Baumbestand an der Deichquerung des Löwentorwegs erklärt werden kann. Die Decke ist ebenfalls abschnittsweise eingebaut. Metallschienen trennen hier jedoch größere Abschnitte als an der Deichquerung des „Fürst Franz“-Radwegs beobachtet. Die an der LUWADUR-Decke des „Fürst Franz“-Radwegs sehr häufig beobachteten Ausbrüche in den Randbereichen finden sich hier nur in wenigen Fällen. Verschmutzungen durch Bodenmaterial und andere Auflagen führen jedoch zu unschönen Verfärbungen der optisch homogenen Decke. Generell ist hier die Farbigkeit des LUWADUR-Materials am Löwentor besser auf die der wassergebundenen Decke abgestimmt. An der Deichquerung des „Fürst Franz“-Radwegs stehen sich dagegen

eine graubeige LUWADUR-Decke und ein rotbraunes wassergebundenes Deckenmaterial gegenüber. Gegenüber der wassergebundenen Decke werden bei der epoxidharzgebundenen Decke keine Pfützenbildung und ein wesentlich geringeren Übergriff der Vegetation beobachtet. Verschmutzungen fallen jedoch bei der EP-Decke wesentlich deutlicher auf. Die Übergänge sind oft weniger gut ausgebildet, was auf die unterschiedlichen Materialeigenschaften und die Begrenzung der EP-Decke durch eine Metallschiene zurückzuführen ist.



Abb. 73 Kühnauer Park, Löwentor, gut gepflegte wassergebundene Decke (Zötzl, 2021)



Abb. 74 Kühnauer Park, Löwentor, gut gepflegte wassergebundene Decke (Zötzl, 2021)



Abb. 75 Im Steigungsbereichen und Wegequerungen eingesetzte LUWADUR-Decke (Zötzl, 2021)



Abb. 76 Im Steigungsbereichen eingesetzte LUWADUR-Decke mit Übergang zur wassergebundenen Decke, Verschmutzungen (Zötzl, 2021)



Abb. 77 Im Bereich der Wegequerung des Deichwegs aus Betonsteinverbundpflaster eingesetzte LUWADUR-Decke mit Markensiegel (Zötzl, 2021)



Abb. 78 Detailaufnahme aus der vorhergehenden Abb., LUWADUR-Decke mit Markensiegel (Zötzl, 2021)



Abb. 79 Ausbruch im Bereich der Trennfuge (Zötzl, 2021)



Abb. 80 Bereich der wassergebundenen Decke mit Spurrinnen und anschließender Pfützenbildung (Zötzl, 2021)



Abb. 81 Spurrinnen im Übergangsbereich zwischen epoxidharz- und wassergebundener Decke zeigen eine Nutzung durch zu breite und zu schwere Fahrzeuge (Zötzl, 2021)



Abb. 82 Spurrinnen im Übergangsbereich zwischen epoxidharz- und wassergebundener Decke zeigen eine Nutzung durch zu breite und zu schwere Fahrzeuge (Zötzl, 2021)



Abb. 83 Der dem Löwentor gegenüberliegende Fußgänger- und Radweg mit einer Asphaltdecke wurde ebenfalls betrachtet. (Zötzl, 2021)



Abb. 84 Fußgänger- und Radweg gegenüber Löwentor mit einer Asphaltdecke zeigt in den Randbereichen Rissbildung durch Absenkung (Zötzl, 2021)



Abb. 85 Fußgänger- und Radweg gegenüber Löwentor mit einer Asphaltdecke zeigt in den Randbereichen Rissbildung durch Absenkung (Zötzl, 2021)



Abb. 86 Fußgänger- und Radweg gegenüber Löwentor mit einer Asphaltdecke zeigt in den Randbereichen Rissbildung durch Absenkung (Zötzl, 2021)

7.11 Epoxidharzdecken im Vorderen Tiergarten in Dessau-Roßlau

Ebenfalls im Jahr 2017 wurde eine LUWADUR-Decke im Steigungsbereich der Wegeführung zur neuen Tiergartenbrücke eingebaut. Die im Jahr 2000 errichtete Fußgängerbrücke, gegenüber des Johannbaus, führt von der Innenstadt über die Mulde in den Vorderen Tiergarten und ist ebenfalls mit einer Kunstharzdecke versehen. Die Wegeführung von der Innenstadt bis zur Brücke ist wassergebunden angelegt. Nach Überwindung der Steigung geht der Weg wieder in wassergebundene Decken über.

Die LUWADUR-Decke an der Brücke zum Vorderen Tiergarten zeigt die schon am Löwentor beschriebenen Merkmale. Diese sind in den Abb.-Unterschriften vermerkt. Der starke Anstieg zur Brücke macht die Nutzung eines fester gebundenen Wegedeckenmaterials notwendig.



Abb. 87 Tiergartenbrücke, Blickrichtung Innenstadt, wassergebundene Wegedecke mit Betonsteinfassung (Zötzl, 2021)



Abb. 88 Tiergartenbrücke, Blickrichtung Vorderer Tiergarten, wassergebundene Wegedecke mit Betonsteinfassung (Zötzl, 2021)



Abb. 89 Tiergartenbrücke, Blickrichtung Vorderer Tiergarten, Übergangsbereich Betonsteinpflaster, LUWADUR-Decke (Zötzl, 2021)



Abb. 90 Tiergartenbrücke, Blickrichtung Vorderer Tiergarten, Übergangsbereich Betonsteinpflaster, LUWADUR-Decke im Steigungsbereich (Zötzl, 2021)



Abb. 91 Tiergartenbrücke, LUWADUR-Decke mit Markensiegel (Zötzl, 2021)



Abb. 92 Tiergartenbrücke, LUWADUR-Decke, Befechtung, Begrünung und kleine Ausbrüche entlang der Metallkante zwischen den Abschnitten (Zötzl, 2021)



Abb. 93 Tiergartenbrücke, Übergangsbereich wasser-gebundene Decke zur LUWADUR-Decke (Zötzi, 2021)



Abb. 94 Tiergartenbrücke, mit LUWADUR ausgeführte Steigung (Zötzi, 2021)

7.12 Einbau stabilisierter wassergebundener Wegedecken in der Pappelallee Magdeburg

Ende November 2020 erfolgte der Einbau eines kompletten Wegeaufbaus in der Pappelallee in Magdeburg. Der Einbau wurde durch das IDK ausführlich dokumentiert. Der Einbau des zweiten Abschnitts erfolgte im Frühjahr 2021.



Abb. 95 Magdeburg, Pappelallee, Einbau der Trag-schicht (Zötzl, 2020)



Abb. 96 Magdeburg, Pappelallee. Einbau der Trag-schicht mit Straßenbautechnik (Zötzl, 2020)



Abb. 97 Magdeburg, Pappelallee, Einbau der Deck-schicht. Im Vordergrund sichtbar ist die dy-namische Schicht. Rechts im Bild, im Bereich des Seitenwegs, wurde die Deckschicht bereits aufgetragen. (Zötzl, 2020)



Abb. 98 Magdeburg, Pappelallee, Im Vordergrund sichtbar ist die dynamische Schicht. Oberhalb wurde die Deckschicht bereits aufgetragen (Zötzl, 2020)

Ein Monitoring der stabilisierten wassergebundenen Wegedecken erfolgte im Dezember 2022.



Abb. 99 Magdeburg, Pappelallee, Monitoring im Winter 2022, Einbau der Tragschicht (Zötzl, 2022)



Abb. 100 Magdeburg, Pappelallee, Monitoring im Winter 2022, Einbau der Tragschicht (Zötzl, 2022)



Abb. 101 Magdeburg, Pappelallee, an stabilisierte wassergebundene Wegedecke angrenzender rötlich eingefärbter Asphalt im vielbefahrenen Bereich. (Zötzl, 2022)



Abb. 102 Magdeburg, Weg parallel der Pappelallee, unsanierter Weg im Winter 2022 (Zötzl, 2022)

7.13 Einbau wassergebundener Wegedecken im Wörlitzer Park

Im Jahr 2022 erfolgte der Erneuerung eines kompletten Wegeaufbaus in Teilen des Wörlitzer Parks. Der Einbau wurde durch das IDK dokumentiert.



Abb. 103 Wörlitzer Park, Einbau einer wassergebundenen Wegedecke, Unterbau, Tragschicht und Deckschicht, August 2022. (Zötzl, 2022)



Abb. 104 Wörlitzer Park, Einbau einer wassergebundenen Wegedecke, Unterbau, Begrenzung aus Holz, August 2022. (Zötzl, 2022)



Abb. 105 Wörlitzer Park, wassergebundenen Wegedecke, Deckschicht. Einbau von Rasengittersteinen im Seitenbereich. (Zötzl, 2022)



Abb. 106 Wörlitzer Park, wassergebundenen Wegedecke, Deckschicht. Einbau einer Wasserableitung (Querschlag) aus Holz. August 2022. (Zötzl, 2022)

8 Materialauswahl für die Laboruntersuchungen

Im Vorfeld der Materialauswahl wurden durch das IDK intensive Recherchen und Gespräche mit den Anbietern zu den im Projekt zu untersuchenden Wegebbaumaterialien (wasser-, asphalt- und epoxidharzgebunden) durchgeführt. In diesem Zusammenhang konnten, gerade im Bereich der stabilisierten wassergebundenen Wegedecken, neu entwickelte und am Markt angebotene Stabilisatoren in die Diskussion aufgenommen werden. Die Stabilisatoren versprechen eine Verbesserung der Dauerhaftigkeit, eine Erhöhung der Belastbarkeit und Einsparungen in der Pflege. Nach Angaben der Firma Hansegrand (www.hansegrand.de) wird eine wesentlich höhere Oberflächenscherfestigkeit, verbunden mit einer sehr guten Wasserführung und eine hohe Staubbinding erreicht. Gerade die Trockenheit der letzten Jahre erfordert im Bereich der wassergebundenen Wegedecken einen erhöhten Pflegeaufwand, der möglicherweise auch durch Einsatz von Stabilisatoren reduziert werden könnte. Die „Wasserbindung“ funktioniert bei lang anhaltender Trockenheit und fehlenden Niederschlägen nicht mehr ausreichend. Die Folge, es kommt zur Auflösung der Bindung und zu einem Materialabtrag der Feinfraktion durch den Wind. Die einfachste, jedoch kosten- und ressourcenintensive Pflegemethode ist dabei das kontinuierliche Besprengen der wassergebundenen Decken mit Wasser, um den beschriebenen Materialabtrag zu verhindern. Kann dies nicht erfolgen, muss eine umfangreichere Reparaturmaßnahme an der Decke erfolgen, die die Unterhaltungskosten ebenfalls erhöht. Zudem trägt der durch den Materialabtrag durch Wind entstehende Staub zu einer Erhöhung der Feinstaubbelastung bei. Gerade diese Fragen werden im Bereich der Ökobilanzierung analysiert.

Die Materialauswahl für die Laboruntersuchungen erfolgte in enger Abstimmung mit dem LDA, Herrn Benecken und der Hochschule Magdeburg. Dabei wurde insbesondere der Vorschlag von Frau Tenzer, LDA, berücksichtigt, die vermehrt in Magdeburg eingesetzten wassergebundenen Wegedeckenmaterialien Mowelith und Mowestab in die Untersuchungen einzubeziehen. Umfassende Marktrecherchen ergaben, dass epoxidharzgebundene Decken in Herstellung und Einbau derzeit in Deutschland nur von den Firmen LUWADUR und TERRAWAY angeboten werden. Daneben können Fertigtrockenmischungen auf Epoxidharzbasis im Handel bezogen werden. Nach wiederholten Anfragen, und vielversprechenden Absichtserklärungen konnte nur die Firma LUWADUR für eine Bereitstellung der Materialien gewonnen werden. Als zweites Material wurde eine epoxidharzgebundene Gesteinsmischung (Quarzkies der Korngruppe 1, 4/2,3 und ein EP-Splittbinder vdw-520) der Firma Gesellschaft für technische Kunststoffe mbH, Rheinbach, beschafft. Walzasphalt- und Gussasphaltdeckenmaterial wurden durch die Hochschule Magdeburg organisiert.

8.1 Rechercheergebnisse zu Stabilisatoren wassergebundener Wegedecken

Wie oben beschrieben, wird eine wassergebundene Decke ~~wird~~ mit einem Bindemittel, dem Stabilizer, auf Pflanzenbasis oder auf Basis mineralischer Zusätze ergänzt, um die Eigenschaften der wassergebundenen Wegedecken zu verbessern. Die Zusammensetzung dieser Zusätze, die häufig klimafreundliche oder ökologische Namen tragen, werden oft von den Firmen nur sehr allgemein benannt, so dass nur eine Recherche im Sicherheitsdatenblatt Aufschluss über die Inhaltsstoffe bringt. Nur in wenigen Fällen konnten Patentschriften mit sehr ausführlichen Angaben in die Recherche einbezogen werden. Grundbaustein der Stabilisatoren auf Pflanzenbasis ist Psyllum, ein Wegerich, passend zum Weg. Getrocknet und fein gemahlen, bewirkt das Psyllum in der Matrix der Wegedecke ein Wasserrückhaltevermögen und einen Quelleffekt, der die Kohäsion der Kornkomponenten verbessert. Nachteil sind mögliche Besiedlungen des organischen Zusatzes mit Mikroorganismen, die zu einem Abbau des Materials und damit wieder zu einer Entfestigung führen können. Weitere Stabilisatoren sind auf anorganischer Basis. Dazu zählen Wasserglas (Kaliwasserglas) oder Kalk (Calciumhydroxid). Diese Zusätze wirken als Bindemittel, und erhöhen den pH-Wert. Tonminerale, die im Feinteil der Wegedecken enthalten sein können, sorgen ebenfalls für eine Verbesserung der Haftung der größeren Komponenten, können aber Frostschäden begünstigen. Der Einsatz der Stabilisatoren wirkt sich ebenfalls geringfügig auf die Ökobilanz der wassergebundenen Deckenmaterialien aus.

8.2 An- und Kationenuntersuchungen an wassergebundenen Wegedeckenmaterialien

Die wassergebundenen Wegedeckenmaterialien Mowelith und Mowestab wurden unterbeprob, je 5 g eingewogen, eluiert und Schadsalzuntersuchungen am Eluat durchgeführt.

Es wurden folgende Werte bestimmt:

- Summe der wasserlöslichen Bestandteile
- Leitfähigkeit
- pH-Wert
- An- und Kationen: SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}

Für die quantitative Salzanalyse durch ein standardisiertes Elutionsverfahren wässrige Auszüge im Labor des IDK erstellt. Es erfolgte eine Bestimmung des Anteils der löslichen Bestandteile vom Probenmaterial sowie der Leitfähigkeit und des pH-Werts des Eluats. Der pH-Wert wurde über Behrotest pH81 und die Leitfähigkeit über WTW Cond 315i/Set bestimmt. Von den Eluaten wurden mittels ionenselektiver Methode von Natrium (Na^+) und mittels Photometrie von den Kationen (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) und den Anionen (SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-) die jeweiligen Konzentrationen bestimmt. Die quantitative Ionenbestimmung erfolgte mittels HACH DR/2008 Direct Reading Spectrometer, Natrium HACH Sension 2. Die Analyseergebnisse der Salzuntersuchungen werden angegeben und bewertet in Ma.-%. Die Darstellung im Diagramm erfolgt in molaren Equivalentkonzentrationen, die sich aus den Massenkonzentrationen unter Berücksichtigung der Atom- bzw. Molekülmassen und der Ladung errechnen. Durch diese Normierung aller Ionen auf Masse und Ladung lassen sich die Konzentrationen direkt miteinander vergleichen. Bei Schadsalzuntersuchungen ist in der Regel ein kleiner Kationenüberschuss zu verzeichnen, der u. a. damit erklärt wird, dass etwaige OH^- und CO_3^{2-} -Ionen in der Analyse nicht erfasst werden können (Steiger 1998).

Die pH-Werte, die Summe der wasserlöslichen Bestandteile und Leitfähigkeit zeigen vergleichbare Werte bei beiden Materialien (Tab. 2). Die untersuchten Anionen (Tab. 3) liegen unterhalb der Nachweisgrenze und bei der Sulfatanalyse von Mowelit bei 0,01 Ma.-%. Die eluierbaren Kationen (Tab. 3) zeigen ebenfalls allgemein ähnliche Größenordnungen. Eine Ausnahme bildet der etwas höher liegende Natriumionengehalt im Eluat des Mowestab. Die Ursache dafür kann unterschiedliche Gründe haben, auf die hier nicht näher eingegangen wird.

Tab. 2 Ergebnisse der Bestimmung von Leitfähigkeit, pH-Wert und Summe der wasserlöslichen Bestandteile

Probe	Einwaage [g]	Lf ₂₅₀ [µS/cm]	pH [-]	∑ wasserlös. Bestandteile [Ma.-%]
Mowestab	4,99	75	7,70	0,22
Mowelit	4,99	80	7,65	0,26

Tab. 3 Ergebnisse der An- und Kationenanalysen

Probe	Anteile an löslichen Ionen in Ma.-%						
	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	SO_4^{2-}	Cl^-	NO_3^-
Mowestab	0,03	0,010	0,008	0,039	<0,01	<0,01	<0,01
Mowelit	0,02	0,005	0,008	0,016	0,01	<0,01	<0,01

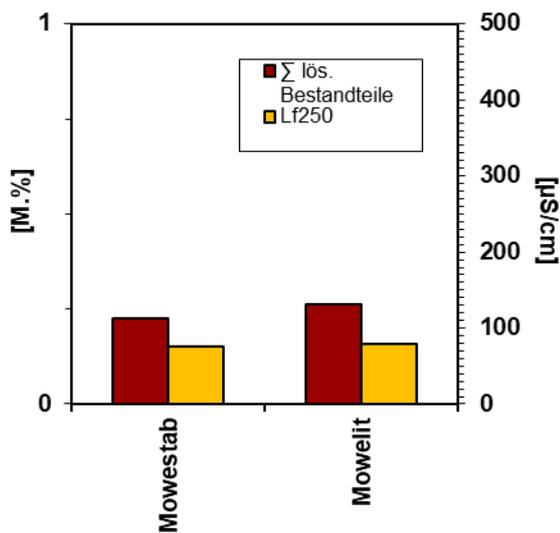


Abb. 107 Leitfähigkeit und Summe der wasserlöslichen Bestandteile

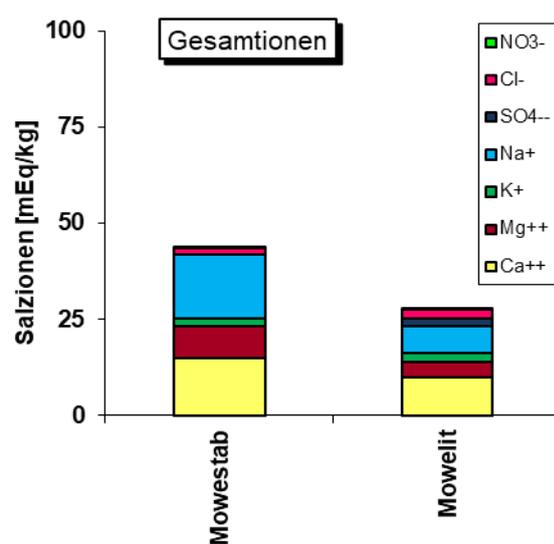


Abb. 108 Gesamtionengehalte, Darstellung in Equivalentkonzentrationen

9 Laboruntersuchungen an Probekörpern

Der Abschlussbericht zu den Laboruntersuchungen der Hochschule Magdeburg, Professur für Verkehrswegebau, Linda Bromberg, M. Eng., Prof. Dr.-Ing. Sascha Kayser, liegt als Anlage vor.

Eine Gegenüberstellung denkmalpflegerische Beobachtungen und der Ergebnisse der materialtechnischen Untersuchungen erfolgt im Fazit.

10 Ökobilanzierung

Die Ökobilanzierung erfolgt durch Herrn Fischer, einen auf diesem Gebiet bereits erfahrenen Bilanzierer (siehe Fischer, 2019). Die zu bilanzierenden Materialien orientieren sich in erster Linie an den in der Hochschule Magdeburg untersuchen Wegedeckenmaterialien, sowie an konkreten Wegebaustellen. Zusätzlich wurden weitere Deckenmaterialien bilanziert.

10.1 Fazit der Ökobilanzierung und Ausblick

(vergl. Fischer, 2022, Anlage)

Das Projekt Ökobilanzierung Wegedecken Sachsen-Anhalt hat eine näherungsweise Betrachtungsweise der Umweltwirkungen ausgewählter Wegebauweisen zum Gegenstand der Untersuchung. Hierzu wurden wassergebundene, bitumengebundene und epoxidharzgebundene Wegebauweisen nach der DWA-A 904 und RStO und Erweiterungen bilanziert. Als zentrale Umweltwirkungskategorien wurde das Treibhausgaspotenzial (GWP), Versauerungspotenzial (AP) und der Primärgesamtenergiebedarf (PEges) gemäß ISO 14040/44 bilanziert. Die Systemgrenzen beinhalten die Herstellung der Baustoffe, sowie deren Transport vom Werk und zum Entsorgungsort sowie Erneuerungsmaßnahmen (an Wegedecken). Als funktionelle Einheit wurde 1 m^2 Nettogrundfläche gewählt, sowie ein Bilanzierungszeitraum von 30 Jahren gesetzt. Signifikante Parameter wurden identifiziert und mittels Sensitivitätsanalyse variiert. Durch einen Bilanzierungsumfang von insgesamt 114 Wegebauweisen wird die Aussagekraft der erzielten Ergebnisse unterstrichen.

Festzustellen ist, dass die wassergebundenen Wegebauweisen in sämtlichen Umweltwirkungskategorien die geringste Umweltbelastung aufweisen. So erzielen diese im Mittel ein Treibhausgaspotenzial - GWP (alle Werte in: kg CO₂Äqv./m² NGFa) von 0,31 welches sich nur geringfügig durch eine alternative Deckschicht aus Brechsand 0,38 und Zusatz von Bindemittel (Lehmpulver 0,32 und Kalk 0,35) verändert. Die epoxidharzgebundenen Wegedecken erzielen ein GWP von 0,38 bis 0,64, wobei hier der Anteil an Reaktivverdünnern als signifikanter Parameter mit hohem Einfluss auf die Umweltwirkungen identifiziert wurde. Die bitumengebundenen Wegedecken erzielen ein GWP von 11,38 bis 13,01. Hierbei haben zusätzlich zur Gewinnung der Zuschläge, die energieintensive Herstellung von Bitumen als auch die jeweiligen Transporte der Rezepturbestandteile zur Asphaltmischanlage einen hohen Einfluss.

In der Umweltwirkungskategorie Versauerungspotenzial – AP (alle Werte in: g SO₂-Äqv./m²NGFa) zeichnet sich eine ähnliche Wertigkeit ab, mit den wassergebundene Wegebauweisen von 1,40 bis 1,51, den epoxidharzgebundenen Wegebauweisen von 1,58 bis 1,98 und den bitumengebundenen Wegebauweisen von 7,17 bis 8,19.

Der Gesamtprimärenergiebedarf – Peges (alle Werte in: MJ/m²NGFa) folgt dieser Wertigkeit ebenfalls, mit den wassergebundenen Wegebauweisen von 6,06 bis 6,12, den epoxidharzgebundenen Wegebauweisen von 8,57 bis 13,45 und den bitumengebundenen Wegebauweisen von 60,71 bis 69,73.

Einen nicht unerheblichen Einfluss hat die Applikationsmenge der Epoxidharze auf die Umweltwirkungskategorien. So steigert sich das GWP im Mittel von 0,47 auf 0,81 kg CO₂Äqv./m² NGFa, erhöht sich die Menge EP Harz von 405 auf 1,250 g/m². Ebenfalls gilt es an dieser Stelle auf die Humantoxizität der Epoxidharze hinzuweisen, da Epoxidharze starke Reizwirkung auf Haut und Schleimhaut aufweisen können.

Gütertransportdistanzen vom Werk erwiesen sich ebenfalls als signifikanter Parameter, so steigert sich das GWP im Mittel etwa um 0,20 kg CO₂Äqv./m² NGFa pro 100 km Transportdistanz. Als Schlussfolgerung gilt es hier, bei einer ökologischen Bewertung verschiedener Wegebauweisen dies mit einzubeziehen und möglichst kurze Transportwege zu wählen.

Fachgerechter Einbau und regelmäßige Pflegemaßnahmen weisen ebenfalls einen nicht unbedeutenden Einfluss auf die Umweltwirkungskategorien auf. Bei den wassergebundenen Wegebauweisen konnte durch regelmäßige kleinflächige Erneuerungsmaßnahmen so ein erhöhtes GWP von bis zu 29%, bei den bitumengebundenen Wegebauweisen bis zu 12% und den epoxidharzgebundenen von bis zu 36% ermittelt werden. Auch Beschädigungen durch beispielsweise Starkregenereignisse oder Hochwasser und eine dadurch verringerte Lebensdauer der Deckschichten spiegelt sich in der Bilanzierung des GWP deutlich wieder. So erhöht sich das GWP bei Verringerung von 5 Jahren Lebensdauer der Deckschicht der wassergebundenen Wegedecken um 37% und den epoxidharzgebundenen Wegedecken um 31%. Eine Herabsetzung der Lebensdauer der Asphalttragdeckschicht der bitumengebundenen Wegebauweisen von 25 auf 15 Jahre erhöht das GWP sogar um 49%.

Abschließend lässt sich feststellen, dass die wassergebundenen Wegebauweisen in den Wirkungskategorien GWP, AP und PEges die geringsten Umweltwirkungen aufweisen, gefolgt von den epoxidharzgebundenen und den schließlich bitumengebundenen Wegebauweisen, wobei die epoxidharzgebundene Wegebauweisen stark von den Eigenschaften der EP-Harze und deren Applikationsmengen abhängig sind.

Ausblick

Neben der hauptsächlichen Anwendung von wassergebundenen Wegedecken wird im Wegebau in Sachsen-Anhalt in wenigen Bereichen auch sogenannter „farbiger Asphalt“, eine bitumengebundene Wegedecke aus Kalkstein oder Natursand oder Granit verschiedener Körnungen mit Farbpigmenten in hochwassergefährdeten Bereichen getestet. Aufgrund der verwendeten Datenbank OEKO-BAU.DAT konnte diese Wegebauweise nicht bilanziert werden und könnte Teil einer vertiefenden Arbeit sein.

Darüber hinaus kann bei Aktualisierungen der Datenbankbasis zusätzlich ein Kaliwasserglas ausgewählter Bindemittelzusammensetzungen verschiedener Gesteinskörnungen für den Wegebau zusätzlich bilanziert werden.

Ebenfalls gilt es das Recyclingpotenzial, gerade der bitumengebundenen Wegebauweisen näher zu untersuchen um quantifizierbare Aussagen für weitere Bilanzierungen treffen zu können. Hierzu sollte die Frage beantwortet werden, wie Bitumen als Nebenprodukt der Rohöldestillation für Benzin und Kerosin gutgeschrieben wird.

Die Human- und Ökotoxizität kann für Epoxidharze mit einem bestimmten Produkt und vorhandener Umweltproduktdeklaration vertiefend untersucht werden.

11 Fallbeispiele mit denkmalpflegerischer Begutachtung und Bewertung

Die Bewertung der Wegeausführungen nach denkmalpflegerischen Gesichtspunkten und objektspezifischen Zielstellungen erfolgte an Hand von Fallbeispielen.

11.1 Referenzobjekt Klosterberggarten Magdeburg

Status: Baudenkmal gem. § 2 (2) Nr. 1 DSchG LSA

Kurzcharakteristik: Landschaftliche Parkanlage unter gestalterischem Einbezug der Topographie mit ansteigendem Gelände am westlichen Elbeufer und des Flusslaufs, Planung Peter Joseph Lennés von 1824, umgesetzt im Auftrag der Stadt Magdeburg 1825-1826, als „Volkspark“ bezeichnet, nachfolgend Verkleinerung der ursprünglichen Gartenschöpfung durch Teilbebauung von Flächen und die Anlage von Eisenbahntrassen

Nutzung / Frequentierung: durch die zentrumsnahe Lage Nutzung als Naherholungsziel und für die wohnungsnaher Erholung, Frequentierung durch die in der Anlage befindlichen Gruson-Gewächshäuser, Nutzer des Elberadweges und Gartentouristen (der Klosterberggarten ist Bestandteil des denkmalpflegerisch-touristischen Netzwerkes Gartenträume – Historische Parks in Sachsen-Anhalt)

Sanierung: Seit Mitte der 1970er Jahre schrittweise denkmalpflegerische Sanierung und Rückbau störender Elemente und Gestaltung, weitgehende Restaurierung auf Grundlage einer denkmalpflegerischen Zielstellung nach der Elbflut 2002 und bis zum Startjahr des denkmalpflegerisch-Touristischen Netzwerks „Gartenträume – Historische Parks in Sachsen-Anhalt“ 2006. Nach der Elbflut 2013 erneute Sanierungen und Wegeinstandsetzungen durch die Stadt Magdeburg in Abstimmung mit dem Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt. Insbesondere wurden Hauptwege und die Verbindungen in den tiefer gelegenen Parkteilen mit farblich gefassten Asphaltdecken befestigt.



Abb. 109 Anschluss Weg mit Asphaltbelag an wasser- gebunden befestigten Weg (Benecken, 2023)



Abb. 110 Anschluss abschüssiger Weg mit Asphaltbe- lag an wasser- gebunden befestigten Weg (Benecken, 2023)



Abb. 111 Anschluss abschüssiger Weg mit Asphaltbelag an wassergebunden befestigten Weg, dazwischen Querschlag (Entwässerungsrinne) (Benecken, 2023)



Abb. 112 Fuge zwischen zwei benachbarten asphaltbefestigten Wegeabschnitten mit leicht abweichender Farbgebung (Benecken, 2023)



Abb. 113 abschüssiger Weg mit wassergebundenem Belag und Trittstufen (Benecken, 2023)



Abb. 114 benachbarte asphaltbefestigte Wege mit unterschiedlichen Deckschichten in Elbnähe (Benecken, 2023)

Analyse des Wegezustandes nach den Sanierungen:

- Im Frühjahr 2023 befanden sich die Asphaltbefestigungen in einem guten Erhaltungszustand ohne nennenswerte bauliche Schäden (Abb. 109, 110, 114)
- Die wassergebunden befestigten Wege wiesen jahreszeitlich bedingt partiell Aufweichungstendenzen und Pfützenbildung auf. In abschüssigen Bereichen waren Materialabträge und Ausspülungen zu beobachten. Querschläge am Übergang zu anschließenden abschüssigen asphaltbefestigten Wegen waren z.Z. mit Deckschichtmaterial der wassergebunden befestigten Wege gefüllt (Abb. 111)

Denkmalpflegerisches Fazit: Der Klosterberggarten lässt nach den Wiederherstellungsarbeiten der vergangenen Jahrzehnte deutlich die gartenkünstlerische Konzeption eines Landschaftsparks Peter Joseph Lennés erkennen. Die geschwungenen Wegeführungen wurden sowohl bei wassergebundenen, als auch asphaltierten Wegen gut und konzeptgerecht ausgeführt (Abb. 109). Bau- und Unterhaltungsmängel mit negativen Auswirkungen auf das Erscheinungsbild der Parkanlage waren an diesen ebenfalls nicht zu vermerken. Als denkmalfachlich problematisch erweist sich ähnlich wie im Herrenkrugpark Folgendes:

- Die Färbungen von wassergebundenen und asphaltierten Deckschichten waren im Frühjahr 2023 deutlich voneinander zu unterscheiden und kontrastierten deutlich (Abb. 109, 110, 111)
- Farbliche Abweichungen bestanden auch zwischen den gefärbten Asphaltdeckschichten im Park und der Asphaltdeckschicht des Elbuferweges (Abb. 114)
- Auch die Asphaltdeckschichten unterschiedlicher, durch Fugen voneinander getrennter Wegeabschnitte im Park changieren leicht hinsichtlich der Färbung (Abb. 112).
- Unterschiedliche Oberflächentexturen bei Verwendung teils gröberer Materials bei den wassergebunden befestigten Wegen verstärken deren Kontrastbildung zu den Asphaltwegen (Abb. 109, 111)

Die Bewertung der Kontrastwirkungen für das Erscheinungsbild des Kulturdenkmals fällt ähnlich aus, wie hinsichtlich des Herrenkrugparks.

11.2 Referenzobjekt Herrenkrugpark Magdeburg

Status: Baudenkmal gem. § 2 (2) Nr. 1 DSchG LSA

Kurzcharakteristik: ab 1818 auf dem städtischen Besitztum Herrenkrug Obst- und Baumplantagen, sowie ein Garten im englischen Stil am Gesellschaftshaus Herrenkrug, durch die Stadtgardendirektoren Paul Niemeyer (1863-1890), Gottlieb Schoch (1890-1903) und Wilhelm Linke (1903-1931) Ausbau zu einer 65 ha großen Anlage mit repräsentativem formalen Bereich um das heutige Hotel Herrenkrug, Landschaftsparkbereichen unterschiedlicher Entstehungszeit und südlich dem sog. Wiesenpark; insgesamt Anlage des gemischten Stils mit Bezügen zur Fluss- und Auenlandschaft der Elbe, durch die Weiträumigkeit und Stadtrandlage besitzt der Herrenkrugpark nicht den Charakter einer Stadtparkanlage im innerörtlichen Kontext, sondern den eines Ausflugsziels mit temporären Nutzungs- bzw. Besuchsschwerpunkten

Nutzung / Frequentierung: überwiegend Nutzung als stadtnahes Ausflugsziel, begünstigt durch eine bis in den Park führende Straßenbahnlinie und das dort befindliche Hotel Herrenkrug und einen benachbarten Biergarten, früher dort Gesellschaftshaus; bedingt durch die Stadtstruktur nur bedingt wohnungsnaher Nutzung durch Anwohner

Sanierung: Unterhaltung und Instandsetzung erfolgen durch die Stadt Magdeburg, Stadtplanungsamt, auf Grundlage einer denkmalpflegerischen Zielstellung der Landschaftsarchitektin Katja Trippler; bereits nach der kompletten Überflutung 2002 erfolgten mit öffentlichen Mitteln geförderte Instandsetzungen auch des Wegesystems. Erneute Maßnahmen, insbesondere der massive Ausbau des den Park mitprägenden Flussdeichsystems und weitere Hochwasserschutzmaßnahmen erfolgten in Folge der Elbflut 2013, gefördert mit Fluthilfemitteln, ausgegeben vom Landesverwaltungsamt Sachsen-Anhalt.



Abb. 115 Parkweg mit farblich gefasster Asphaltdeckschicht (Benecken, 2022)



Abb. 116 Weg mit farblich gefasster Asphaltdeckschicht und Sockel für mobile Flutmauer (Benecken, 2022)



Abb. 117 Wege mit farblich gefasster Asphaltdeckschicht und rötlicher wassergebundener Deckschicht (Benecken, 2022)



Abb. 118 Übergang farblich gefasste Asphaltdeckschicht und rötliche wassergebundene Deckschicht mit Bandeisenkante (Benecken, 2022)



Abb. 119 Übergang farblich gefasste Asphaltdeckschicht und rötliche wassergebundene Deckschicht (Benecken, 2022)



Abb. 120 Weg mit farblich gefasster Asphaltdeckschicht und abzweigender wassergebunden befestigter Weg (Benecken, 2022)



Abb. 121 Detail farblich gefasste Asphaltdeckschicht (Benecken, 2022)



Abb. 122 Asphaltdeckschicht, Wegekante (Benecken, 2022)



Abb. 123 Asphaltdeckschicht, Anschlussfuge (Benecken, 2022)



Abb. 124 Asphaltdeckschicht an Flutmauer (Benecken, 2022)



Abb. 125 farblich gefasste Asphaltdeckschicht mit Gerinne, Bordsteinkante und anschließender rötlicher wassergebundener Wegedeckschicht (Benecken, 2023)

Analyse des Wegezustandes nach den Sanierungen:

- Im Winter 2022 guter Erhaltungs- und Pflegezustand sowohl der Wege mit Asphalt-, als auch wassergebundener Deckschicht
- Schlagloch- und Rissbildung oder seitliche Ausbrüche waren an den Asphaltdeckschichten nicht zu beobachten. Die seitlichen Kanten wurden exakt ausgeführt (Abb. 122), Wegeschwünge gemäß den Gestaltungsprinzipien der landschaftlichen Parkanlage sind beim Bau durchaus gelungen nachvollzogen worden (Abb. 115, 120). Baubedingte Anschlussfugen sind an Abzweigungen erkennbar (Abb. 123). Die Durchfärbung erfolgte weitgehend gleichmäßig mit unregelmäßiger Pigmentkonzentration an nur wenigen Stellen (Abb. 121).
- Auch die wassergebunden befestigten Wege ließen keine Bau- oder Unterhaltungsmängel wie Schlagloch- oder Pfützenbildung, übermäßigen Abtrag der Deckschichten, Spurrinnen oder übermäßigen Humusauftrag erkennen (Abb. 117, 120). Die Anarbeitung an die seitlichen Bandeisenkanten oder angrenzende Asphaltdeckschichten erfolgte exakt (Abb. 118).

Interpretation: Typische Baumängel wie eine ungleichmäßige Verdichtung der Tragschicht mit anschließender Wellen- oder Schlaglochbildung bei wassergebunden befestigten Wegen sind nicht erkennbar. Überdies war der Pflegezustand im Winter 2022 als durchaus gut zu bezeichnen. Übermäßiger verfestigter Humusauftrag durch Laubfall war durch Beräumung vermieden worden. Ebenso wenig waren übermäßige Wildkräuterbildung oder Verformungen der wassergebundenen Deckschichten als Folge unterlassener Nachprofilierung zu beobachten. Erleichtert werden dürften Pflege und Unterhalt dadurch, dass es sich beim Herrenkrugpark um einen eher temporär, jedoch nicht konstant stärker genutzten Park in Stadtrandlage handelt. Nutzungsspuren durch Inanspruchnahme von Wegen auch nach längeren Regenfällen oder Frost-Tau-Wechsel sind entsprechend nur bedingt zu erwarten.

Denkmalpflegerisches Fazit: Der Herrenkrugpark besitzt in seinen landschaftlichen Parkteilen den Charakter einer gartenkünstlerisch weiterentwickelten und aufgeschmückten Flußauenlandschaft.

Das geschwungene Wegesystem korrespondiert mit organisch angeordneten Parkräumen, strukturierenden Gehölgruppen und Einzelbäumen. Das Wegesystem soll entsprechend keinen artifiziellen Charakter besitzen, sondern sich der landschaftlichen Gestaltung ein- und unterordnen und durchaus Bestandteil derselben sein. Vor diesem Hintergrund ist die Ausführung der asphaltbefestigten Wege ambivalent zu bewerten. Gelungen ist der Nachvollzug der geschwungenen Wegeführungen. Auch beeinträchtigen keine Bau- und Unterhaltungsmängel das Erscheinungsbild der Parkanlage. Derzeit zu konstatierende Nachteile sind:

- Trotz des Versuchs, die Färbungen von wassergebundenen und asphaltierten Deckschichten einander anzupassen, waren diese bei leicht feuchter Witterung im Herbst 2022 deutlich voneinander zu unterscheiden und erzeugten klar eine Kontrastbildung zwischen beiden (Abb. 117, 120)
- Die Kontrastwirkung zwischen den Wegedeckschichten dürfte auch auf unterschiedliche Oberflächenrauigkeiten zurückzuführen sein, mit gewissen Spiegeleffekten bei den sehr glatt ausgeführten Asphaltbefestigungen.
- Technisch kaum zu vermeidende Effekte wie Anschlussfugen (Abb. 123) verstärken den technisch-artifiziellen Charakter der Asphaltdeckschichten.

Durch die beschriebenen Aspekte entsteht durch die Einfügung von Asphaltwegen in die Landschaftsparkanlage durchaus ein verfremdendes Element bzw. ein gestalterischer Bruch. Dieser steht im Widerspruch zum gestalterischen Ideal der künstlerisch überhöhten und idealisierten Kulturlandschaft. Bedingt kann eine Beeinträchtigung des denkmalkonstituierenden Erscheinungsbildes konstatiert werden.

11.3 Referenzobjekt Park Hohenerxleben

Status: Baudenkmal gem. § 2 (2) Nr. 1 DSchG LSA

Kurzcharakteristik: früher sentimentaler Landschaftspark mit Aspekten einer „ornamental farm“ am Südufer der Bode und an den südlich benachbarten Hängen, erste Strukturen auf Eichenwäldchen (angepflanzt 1754 durch Gebhardt Anton von Krosigk) zurückgehend, Weiterentwicklung seit Anfang des 19. Jahrhunderts mit Elementen wie der Eichenallee, einem Rosenwäldchen, Sitz- und Ruheplätzen und einer Orangerie mit seitlichen Gewächshausanbauten (nicht mehr vorhanden), ebenfalls nicht mehr vorhanden eine intensivere Gestaltung im Sinne eines Pleasuregrounds mit Schmuckbeeten im Umfeld des Schlosses

Nutzung / Frequentierung: Nutzung als Naherholungsziel durch Anwohner und vermutlich Bewohner der benachbarten Ortschaften, in begrenztem Umfang touristische Frequentierung durch Nutzer des den Park durchziehenden Europaradwegs R1 und Gäste des Schlosses Hohenerxleben mit der darin befindlichen Gaststätte und den dortigen Übernachtungsmöglichkeiten.

Sanierung: Die denkmalpflegerische Zielstellung für die Sanierung des Parks nach Flutschäden durch das Bodehochwasser 2013 wurde 2016/17 durch das Landschaftsarchitekturbüro Welz, Schönebeck, in Abstimmung mit dem Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt in Halle erarbeitet. Planung und Bauüberwachung für den Schlosspark erfolgten durch das Landschaftsarchitekturbüro Därr, Halle/S. Verantwortlich für die Wiederherstellung des Boderadweges, zugleich Hauptweg im Park und Europaradweg R 1, war das Büro Steinbrecher und Partner Rathenow (Planung und Bauüberwachung). Die Sanierungen erfolgten 2020-2021/2022 im Auftrag der Stadt Staßfurt und gefördert mit Mitteln zur Behebung von Schäden durch die Flut 2013, ausgegeben vom Landesverwaltungsamt Sachsen-Anhalt. Durch die Stadt Staßfurt wurde eine dauerhafte, möglichst überflutungsresistente Wiederherstellung des Radweges angestrebt. Diese Position wurde auch durch die zuständige Denkmalschutzbehörde des Salzlandkreises vertreten. Beabsichtigt wurde der Ausbau mit einer epoxidharzgebundenen Deckschicht. Denkmalfachliche Position des Landesamtes für Archäologie und Denkmalpflege LSA war, dass zur Wahrung des gartenkünstlerisch relevanten Erscheinungsbildes der landschaftlichen Parkanlage ein Ausbau in traditioneller wassergebundener Bauweise mit verstärktem Unterbau erfolgen sollte. In Abstimmungen zur Abwendung des Dissens wurde wegen mangelnder Langzeiterfahrungswerte mit epoxidharzgebundenen Wegedeckschichten und in Anbetracht des Investitionsvolumens von dieser Ausbauvariante abgesehen. Stattdessen sollte auf Wunsch der Stadt Staßfurt ein eingefärbter Gussasphalt verwendet werden, welcher schließlich auch eingebaut wurde.



Abb. 126 Europaradweg mit eingefärbter Gussasphaltdeckschicht und Gerinne aus Granit-Kleinstein am Abstieg mit stärkerem Gefälle östlich des Schlosses Hohenerxleben zum Bodetal (Benecken, 2023)



Abb. 127 wie Abb.126, Detail, Übergang zwischen Gussasphalt und Gerinne (gebundene Bauweise) (Benecken, 2023)



Abb. 128 Europaradweg (Gussasphalt) mit abzweigendem Parkweg (Wassergebundene Deckschicht und Gerinne aus Naturstein-Kleinstein in gebundener Bauweise) (Benecken, 2023)



Abb. 129 Verschwenk des Europaradweges aus dem historischen Verlauf des Parkweges (Eichenallee) heraus, dort wassergebundene Deckschicht (Benecken, 2023)



Abb. 130 Europaradweg (Gussasphalt) und angrenzende Fläche eines Sitzplatzes mit einer wassergebundenen Wegedeckschicht (Benecken, 2023)



Abb. 131 Europaradweg mit angrenzendem Sitzplatz (Findlingssetzungen mit parkgestalterischer Bedeutung und wassergebundene Wegedeckschicht) (Benecken, 2023)



Abb. 132 Blick vom Parkweg zum Teich (wassergebundene Deckschicht) auf den Europaradweg und eine dahinter befindliche Findlingssetzung mit parkgestalterischer Bedeutung (Benecken, 2023)



Abb. 133 Übergang vom Europaradweg zu einer weiteren Sitzplatzfläche (wassergebundener Deckschichtbelag) (Benecken, 2023)



Abb. 134 Situation am „von Krosigk“-Denkmal, Gussasphaltdeckschicht auf dem Europaradweg, Verwendung hellgrauen Mosaikpflasters zur Be-



Abb. 135 Ende der Ausbaustrecke des Europaradweges vor der ehem. Eisenbahnbrücke über das Bodetal im östlichen Parkteil (Benecken,



Abb. 136 nicht ausgebauter Abschnitt des Boderadweges (Europaradweg) zwischen dem zentralen Teil des Schlossparks Hohenerleben und dem Schlosspark Neugattersleben (Benecken, 2023)

Analyse des Wegezustandes nach den Sanierungen (2021/2022) im März 2023:

- Technisch einwandfreier Zustand der Gussasphaltdeckschicht und der seitlichen Gerinne ohne Ausbrüche oder Rissbildungen
- kein verbliebener Humusauftrag auf der Trasse des Europaradweges
- starke Abweichungen zwischen Farbigkeit und Textur (Oberflächenrauigkeit) des Europaradweges und der angrenzenden wassergebunden befestigten Bereiche
- Technisch einwandfreier Zustand der sanierten wassergebunden befestigten Wegeabschnitte ohne nennenswerte Wellen- und Schlagloch- (Pfützen-) –bildung oder Wildkräuterwachstum, jedoch teils erheblicher, nicht beräumter Humusauftrag

Zustand länger unsanierter Wegeabschnitte

- Im betrachteten Parkbereich nicht vorhanden.

Interpretation: Der intakte Zustand der Wegedecken dürfte auf technisch korrekten Einbau einschließlich seitlicher Entwässerungsgerinne und Querschläge (Wasserableitungsrinnen im Verlauf stark abschüssiger, wassergebunden ausgebauter Wege) zurückzuführen sein. Der starke Humusauftrag lässt auf im Verlauf des Monats März 2023 noch nicht erfolgte Pflege der wassergebun-

den ausgebauten Wegeabschnitte schließen. Bei nicht erfolgreicher Beräumung von Gerinnen und Querschlägen ist deren Funktion nicht gegeben und kommt es zu Wasserrückstau auf die wassergebundenen Wegedeckschichten. Nicht erfolgende Beräumung von Humus hätte partielle Wildkräuterbildung und eine Auflösung der Wasserbindung der betroffenen Wegeabschnitte zur Folge.

Denkmalpflegerisches Fazit:

Wassergebunden befestigte Wegeabschnitte

Die Ausführung überwiegend ohne feste Kanteneinfassungen und mit variablem Unterbau ist gut mit dem insgesamt eher extensiv gestalteten Landschaftspark verträglich. Gestaltungsprinzip einer „ornamental farm“, als welche der Park in Hohenerxleben weitgehend interpretiert werden kann, ist die punktuelle Ausschmückung der vorhandenen Kulturlandschaft einschließlich Akzentuierung vorhandener topographischer Elemente und Sichtbezüge. Wege leiten danach die Besucher zwar wie auch in späteren landschaftlichen Parkanlagen zum Erleben der inszenierten Landschaft, sollen sich aber selbst möglichst unauffällig einordnen und wie auch sonst in der Landschaft vorhandene Erschließungs- und Verbindungswege wirken. Durch die Ausführung von Gerinnen und Querschlägen im Fall stark abschüssiger Wege wurde hiervon zwar abgewichen. Jedoch sind diese technisch bedingten Einbauten punktuell zum Erhalt und Schutz des Wegeaufbaus vor Ausspülungen und übermäßiger Erosion der Deckschicht hinnehmbar. Das hierfür verwendete Natursteinpflastermaterial ist hinsichtlich Textur und Farbgebung eher zurückhaltend und ordnet sich dem Parkcharakter weitgehend unter. Im Bereich der Eichenallee konnte durch Verwendung einer wassergebundenen Deckschicht auf einen durchgehenden regelgerechten Unterbau verzichtet werden, welche im Zusammenhang mit den dafür erforderlichen Auskofferungen in Kronentraufbereichen den Baumbestand gefährdet hätte.

Europaradweg mit Gussasphalt

Es wurde versucht, durch eine gelblich-ockerfarbige Einfärbung eine Annäherung an das Erscheinungsbild wassergebundener Wegedecken zu erreichen. Wie die vorangegangenen fotografischen Beispiele zeigen, weicht der erreichte Farbton jedoch stark von demjenigen der angrenzenden wassergebundenen Deckschichten ab (vgl. Abb. 128, 129, 132, 133). Es ist zu erwarten, dass sich dieser Effekt bei unterschiedlichem Alterungsverhalten der Materialien und Wegeaufbauten noch verstärkt. Diesbezüglich sollte in einigen Jahren eine weitere Analyse erfolgen. Der stark abweichende Charakter beider Deckschichten ist zudem durch deren sehr unterschiedliche Oberflächentextur bedingt, welche bei dem Gussasphalt so glatt ausgefallen ist, wie sie sich bei wassergebundenen Deckschichten nicht herstellen bzw. langfristig kaum erhalten lässt (vgl. Abb. 126, 130). Durch die Verarbeitung von Materialien mit gröberen Kornanteilen hätte sich dem ggf. begegnen lassen. Auffällig ist zudem, dass für die Gerinne am Europaradweg im Unterschied zu den wassergebunden befestigten Wegen einheitlich hellgrauer Granit verwendet wurde, welcher im Park als Fremdkörper wahrzunehmen ist (Abb. 126 und 127 im Vergleich zu Abb. 128).

Da der für die Herstellung erforderliche Unterbau im Bereich der Eichenallee Auskofferungen erfordert hätte, welche den Baumerhalt durch Eingriffe in den Bestand statisch wirksamer Starkwurzeln gefährdet hätte, musste die Radwegetrasse in diesem Bereich aus der Allee heraus verschwenkt werden, was durchaus als struktureller Eingriff in das historische Parkgefüge zu bewerten ist (Abb. 129). Wäre der Gehölzaltbestand im Bereich der fotografisch festgehaltenen Nachpflanzungen auf der Wegeseite Richtung Bode erhalten geblieben, hätte die Radwegetrasse aus Gründen des Baum-

schutzes ggf. noch weiter verschwenkt angelegt werden müssen. Denkmalfachlich ergeben sich also durchaus einige negative Effekte hinsichtlich Substanz und Erscheinungsbild der historischen Parkanlage, welche wie folgt zusammengefasst werden können:

- Artifiziert-technischer Charakter durch Farbigeit und Textur der Oberfläche und Ausführung der Gerinne
- Kontrastwirkung zu den angrenzenden Wegebereichen
- Beeinträchtigung des Erscheinungsbildes benachbarter Sitzplätze und Denkmale durch Störung von deren fließender Einbindung in die Parklandschaft (Abb. 131, 132, 133, 134)
- Eingriff in die historische Struktur des Landschaftsparks durch den im Sinne des Baumschutzes erforderlichen Verschwenk der Hauptwegetrasse im Bereich der Eichenallee.

Der mit Gussasphalt ausgebaute Wegebereich bricht im Bereich der ehemaligen Eisenbahnbrücke im östlichen Parkteil abrupt ab und geht schließlich bis zum Schlosspark Neugattersleben in einen weitgehend naturbelassenen Waldweg über. Dieser allerdings ist durch seine leicht erhöhte Lage weniger durch Überflutungsschäden gefährdet.

11.4 Referenzobjekt Schlosspark Neugattersleben

Status: Baudenkmal gem. gem. § 2 (2) Nr. 1 DSchG LSA

Kurzcharakteristik: weiträumige, extensiv gestaltete Landschaftsparkanlage zwischen Bode und den nördlich gelegenen Uferhängen mit formalen Elementen (Hainbuchenallee, Eibengang), intensiver gestalteter, pleasuregroundartiger Bereich im eingefriedeten Areal um das Schloss, ab 1758 gestalterische weiterentwickelte und Umgestaltung der vorherigen Renaissance- und Barockanlagen durch das Adelsgeschlecht von Alvensleben, historisierende und romantisierende Umgestaltung des Schlosses 1870 und 1883-1884 durch Werner Alvo von Alvensleben (1840-1929), unter seiner Ägide auch Erweiterung des Schlossparks und Bau von drei historisierenden Bodebrücken (Stampfbeton, Nachbildung einer Naturstein- und Schindelcharakteristik), seit den 1990er Jahren befinden sich im Schloss private Firmensitze und eine Bildungseinrichtung

Nutzung / Frequentierung: Nutzung als Naherholungsziel durch Anwohner und vermutlich Bewohner der benachbarten Ortschaften, in begrenztem Umfang touristische Frequentierung durch Nutzer des den Park durchziehenden Europaradweges R1 (Gastronomie in Neugattersleben und im benachbarten Schloss Hohenerxleben), die Nutzung durch Besucher und Mitarbeiter der Einrichtungen im Schloss Neugattersleben ist schwer quantifizierbar

Sanierung: Die denkmalpflegerische Zielstellung für die Sanierung des Parks nach Flutschäden durch das Bodehochwasser 2013 erstellte ab 2015 das Landschaftsarchitekturbüro Süßmann, Magdeburg. Nach Abstimmung mit dem Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt in Halle erfolgte anschließend die Parkwiederherstellung federführend durch die Stadt Nienburg stellvertretend für private Flächeneigentümer. Planung und Bauleitung übernahm ebenfalls das Büro Süßmann. Eine Förderung der Maßnahmen erfolgte mit Mitteln zur Behebung von Schäden durch die Flut 2013, ausgegeben vom Landesverwaltungsamt Sachsen-Anhalt. Wie im benachbarten Park Hohenerxleben wurde zunächst ein Ausbau des Europaradweges mit einer epoxidharzgebundenen Deckschicht in Aussicht genommen. Wegen auch hier angemeldeter Bedenken des Landesamtes für Denkmalpflege hinsichtlich des Erscheinungsbildes der Landschaftsparkanlage bestanden zunächst Planungen, die durch die Parkanlage verlaufende Radwegetrasse an das gestalterisch hier weniger sensible kanalisierte Bodeufer zu verlegen. Schließlich wurde jedoch davon abgesehen und der durch den Schlosspark verlaufende Abschnitt des Europaradweges in Abstimmung mit dem Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt in wassergebundener Bauweise saniert. Kleinere asphaltierte und gepflasterte Wegeabschnitte bestehen im Bereich der Bodebrückenrampen abseits des Europaradweges



Abb. 137 wassergebundene Deckschicht ohne gebaute Kanteneinfassung und Bankett (Benecken, 2023)

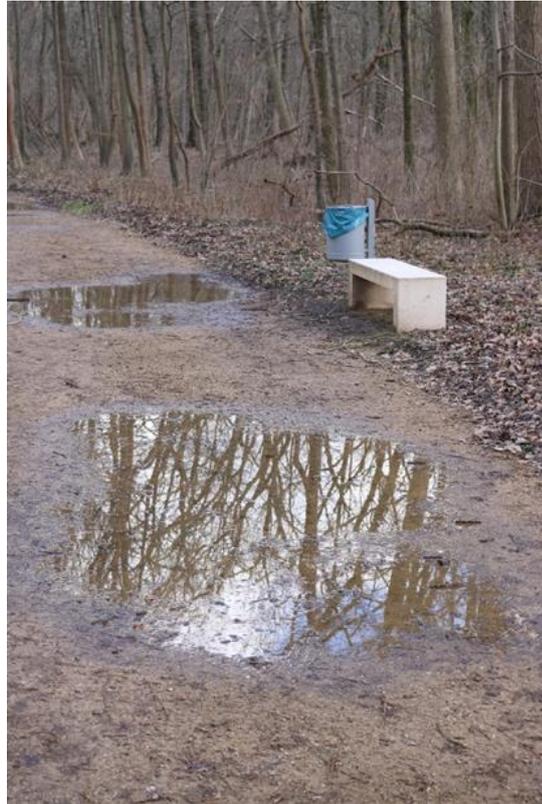


Abb. 138 punktuelle Pfützenbildung infolge mangelhafter Wasserableitung durch Fehler in der Profilierung, Anfang März 2023 (Benecken, 2023)



Abb. 139 wassergebunden ausgebauter Weg ohne gebaute Kanten im Bereich der Hainbuchenallee (ergänzt durch Nachpflanzungen) (Benecken, 2023)



Abb. 140 Detail Wegekante ohne gebaute Abgrenzung im Bereich von Gehölzbeständen (Hainbuchenallee) (Benecken, 2023)



Abb. 141 Wegekreuzung im Bereich der Hainbuchenallee (Benecken, 2023)



Abb. 142 Übergang von der wassergebundenen Wegedecke zur Feldsteinpflasterung vor der mittleren Bodebrücke (Benecken, 2023)



Abb. 143 Sitzplatz an der Hainbuchenallee (Europaradweg) mit einheitlicher wassergebundener Wegedeckschicht (Benecken, 2023)



Abb. 144 historischer Sandsteinblock auf wassergebunden befestigter Wegedecke (Benecken, 2023)



Abb. 145 Wassergebunden befestigte Wege als Teil der landschaftlichen Szenerie im zentralen Parkteil (Benecken, 2023)



Abb. 146 Wegeanschluss südlich der westlichen Bodebrücke (Benecken, 2023)

Analyse des Wegezustandes nach den Sanierungen (Frühjahr 2023):

- Weitgehend intakter Zustand der Wegedeckschichten mit überwiegend funktionaler Profilierung und nur geringem Humusauftrag
- Pfützenbildung infolge von Mängeln an der Profilierung ist lediglich punktuell zu beobachten
- Die nicht baulich gesicherten Wegekanten sind durchgängig gut zu erkennen und nicht durch Überlaufen, Ausschwemmungen, Materialabtrag, Humusauftrag oder Wildkrautbildung verunklart.

Interpretation: Abgesehen von punktuellen Ausnahmen (vgl. Abb. 138) dürfte der Wegebau technisch korrekt mit ausreichender Verdichtung und Profilierung des Unterbaus und der Deckschicht erfolgt sein. Probleme hinsichtlich der Wasserableitung von der Deckschicht in die umgebenden Pflanzflächen sind überwiegend nicht vorhanden. Hierzu trägt auch bei, dass die äußeren Ränder der Deckschicht leicht erhöht zu den umgebenden Pflanzflächen eingebaut wurden. Befestigte Gerinne oder Querschläge sind im Bereich der erneuerten Wege in Neugattersleben technisch nicht erforderlich. Geringer Humusauftrag und kaum zu beobachtender Materialabtrag in die Pflanzflächen oder Bankette sprechen für eine mindestens ausreichende Pflege.

Denkmalpflegerisches Fazit: Im Bereich der erneuerten wassergebunden befestigten Wege sind keine Beeinträchtigungen des denkmalpflegerisch intendierten Erscheinungsbildes der Parkanlage zu konstatieren. Der Verzicht auf gebaute Wegekanten, auch Bandeisen, ist dem landschaftlichen Charakter der überwiegend extensiv gestalteten Parkanlage zuträglich (vgl. Abb. 145). Positiv zu vermer-

ken ist der einheitliche Charakter der Deckschicht im Bereich von Ausbuchtungen oder platzartigen Erweiterungen an Wegehaupttrassen (vgl. Abb. 143.). Das Erscheinungsbild von historischen Steinsetzungen oder angrenzenden Natursteinpflasterungen wird durch den Charakter der gewählten wassergebundenen Deckschicht nicht beeinträchtigt, bzw. kontrastbedingte negative Effekte sind nicht zu konstatieren (vgl. Abb. 142, 144). Durch die bei wassergebundener Befestigung mögliche technische Anpassung des Unterbaus zur Berücksichtigung von Erfordernissen des Gehölzschutzes (Erhalt statisch wirksamer Starkwurzeln) war ein Ausbau der historischen Wegetrassen in überkommener Breite bei unmittelbarer Nachbarschaft von Einzelgehölz- und Alleebeständen möglich, bzw. auch die Nachpflanzung von Gehölzen an der historischen Wegetrasse (vgl. Abb. 141, 143). Technische Anpassungen (Einbau von Wurzelbrücken oder Baumscheiben, Verlegung der Wegetrasse) mit Auswirkungen auf Substanz und Erscheinungsbild des Kulturdenkmals waren nicht erforderlich.

Zusammenfassung:

- Die Wegesanierung erfolgte mit gutem Ergebnis hinsichtlich Erhalt und Wiederherstellung des Erscheinungsbilds der historischen Parkanlage.
- Schäden an der denkmalkonstituierenden Substanz (Gehölzbestände, bauliche Strukturen) durch den Wegebau sind nicht zu konstatieren und infolge von dessen Ausführung nicht zu erwarten.

11.5 Referenzobjekt Johannapark Leipzig

Status: Kulturdenkmal gem. § 2 SächsDSchG, Ausweisungsmerkmal „Gartendenkmal“

Kurzcharakteristik: 1858 Konzept durch Peter Joseph Lenné für den Bankier Wilhelm Theodor Seyferth, im Detail veränderte Umsetzung durch Lennés Schüler Carl Otto Wittenberg 1861 bis 1863 (1858-1900 zunächst Ratsgärtner, dann Stadtgardendirektor der Stadt Leipzig); konzipiert als privater Villengarten, jedoch öffentlich zugänglich, nach dem Tod Seyferths Übergang an die Stadt Leipzig und Adaptierung als städtische Parkanlage, u.a. durch Flächenarrondierung und auch Wegeausbau. Heute überwiegend landschaftliche Parkanlage mit Resten formaler Gestaltungen im Sinne des „gemischten Stils“.

Nutzung / Frequentierung: intensive Nutzung als Stadtpark, auf den Hauptwegen starker Fahrrad- und Fußgängerverkehr, u.a., da der Johannapark das Bindeglied von der Innenstadt zu weiteren, westlich gelegenen Parkanlagen und ebenso zu den Stadtteilen westlich des Elstermühlgrabens darstellt; zur Beruhigung des Fahrradverkehrs auf einem Hauptweg wurden auf Höhe des Spielplatzes 1999 gepflasterte Bodenwellen eingebaut. Die Wege sind ganz überwiegend wassergebunden befestigt und mit Bandeisenkanten eingefasst. Eine Ausnahme stellt ein Streifen aus Kupferschieferschlackepflaster am nördlichen Hauptweg (Rest einer vormaligen Fußgängerbahn) dar. Eine in der Zeit der DDR eingebaute Querung der Hauptwiese mit einem asphaltierten Weg wurde Ende der 1990er Jahre ebenfalls zu einem wassergebunden befestigten Weg umgebaut.

Sanierung: Auf Grundlage einer Konzeption des Landschaftsarchitekturbüros Franz / Leipzig erfolgte 1998/99 eine umfassende Instandsetzung der Parkanlage einschließlich der Wege, zuletzt 2020/21 wurden Teilabschnitte des südlichen Hauptweges saniert. Aus denkmalpflegerischen Gründen werden Sanierungen und Instandsetzungen aller Wege mit der genannten Ausnahme ausschließlich in wassergebundener Bauweise vorgenommen. Dies erfolgt auch auf Grundlage einer mit dem Landesamt für Denkmalpflege abgestimmten gartendenkmalpflegerischen Zielstellung von 1995 (Landschaftsarchitekturbüro Amin / Franz / Wend, Leipzig)



Abb. 147 Aufgeweichte Deckschicht und Pfützenbildung unmittelbar nach Frost-Tau-Wechsel auf einem unsanierten Hauptwegeabschnitt (Februar 2023) (Benecken, 2023)



Abb. 148 wie Abb. 147 (Benecken, 2023)



Abb. 149 Zustand sanierter Hauptwegeabschnitt unmittelbar nach Frost-Tau-Wechsel (Februar 2023) (Benecken, 2023)



Abb. 150 wie Abb. 149 (Benecken, 2023)



Abb. 151 Zustand unsanierte, stark frequentierte Fahrradverkehrsverbindung unmittelbar nach Frost-Tau-Wechsel (Februar 2023) (Benecken, 2023)



Abb. 152 Detail Zustand unsanierter Wegerand nach Frost-Tau-Wechsel (Februar 2023) (Benecken, 2023)



Abb. 153 Übergang hist. Kupferschlackebahn zu wassergebundenem Wegebelaag, Zustand unmittelbar nach Frost-Tau-Wechsel (Februar 2023) (Benecken, 2023)



Abb. 154 Pflasterschwelle in wassergebundener Wegedecke zur Beruhigung des Fahrradverkehrs auf Höhe des Spielplatzes (Benecken, 2023)

Analyse des Wegezustandes nach den Sanierungen:

- Im Frühjahr 2023 noch relativ intakter Zustand mit weitgehend ebener Wegefläche ohne Ausspülungen, Aufweichungen und Wellenbildung, lediglich in den Randbereichen Ausspülungen über die Bandeisenkante in die Vegetationsfläche und Pfützenbildung auf der Wegefläche (vgl. Abb. 149, 150)

Zustand länger unsanierter Wegeabschnitte

- Verformungen der Wegedeckschichten durch Spurrinnen von Pflegefahrzeugen und Fahrrädern (Abb. 148, 152)
- Aufweichen der Deckschicht nach Frost-Tau-Wechsel als Folge länger zurückliegender Verdichtung (Abwalzen) und Profilierung (Abb. 148, 152)
- Pfützenbildung durch wellenartige Ausformung der Deckschicht als Folge mangelnder Verteilung und Verdichtung des Tragschichtmaterials und dann einsetzende Setzungstendenzen (Abb. 147, 151)
- Punktuelle Ausspülungen bzw. Materialabtrag an den rampenartigen Anläufen zu den Parkbrücken und zu gepflasterten Abschnitten (Abb. 153)

Interpretation: Die geschilderten Nutzungsspuren sind auf die außerordentlich intensive ganzjährige Nutzung, insbesondere auch durch Fahrradfahrer, zurückzuführen. Auch im Winterhalbjahr, nach stärkeren Regenfällen und ungeachtet des Frost-Tau-Wechsels findet diese statt. Selbst bei jährlich erfolgenden regelkonformen Instandsetzungsmaßnahmen sind so Nutzungsspuren an den Wegen

nicht auszuschließen. Den Ausspülungen an den kurzen, jedoch stark geneigten Wegeabschnitten an den Brückenrampen soll mit dem Einbau kleinräumiger Pflasterungen begegnet werden.

Denkmalpflegerisches Fazit: Aufgrund der gartenhistorischen und –künstlerischen Bedeutung des Johannaparks soll an der wassergebundenen Befestigung der Hauptwege festgehalten werden. Diese entspricht hier dem denkmalpflegerischen Prinzip der Materialgerechtigkeit und ist für das Erscheinungsbild der intensiv durchgestalteten Landschaftsparkanlage mit zahlreichen Durchblicken und Blickperspektiven maßgeblich. Nutzungsspuren und Pflegedefizite beeinträchtigen zwar den Charakter der auf Peter Joseph Lenné zurückgehenden Gartenschöpfung. Jedoch sind diese Effekte auch bereits seit dem Übergang der Anlage an die Stadt Leipzig und der Adaptierung als städtische Parkanlage belegt. Seither erfolgen kontinuierlich und zeitlich engmaschig Sanierungs- und Instandsetzungsarbeiten. Diese sind die Voraussetzung zur Aufrechterhaltung eines denkmalfachlich vertretbaren Erscheinungsbildes. Trotz der geschilderten Abstriche ist dieses bis heute gegeben. Weitergehende Befestigungen der historischen Parkwegeabschnitte werden vom Denkmalfachamt (Landesamt für Denkmalpflege Sachsen, der zuständigen Denkmalschutzbehörde bei der Stadt Leipzig und dem anlagenverwaltenden Amt (Amt für Stadtgrün und Gewässer) abgelehnt.

11.6 Referenzobjekt Großkühnauer Park (Dessau-Roßlau)

Status: Baudenkmal gem. gem. § 2 (2) Nr. 1 DSchG LSA, Bestandteil des Denkmalsbereichs gem. 2 (2) Nr. 2 DSchG LSA „Gartenreich Dessau-Wörlitz“ und der UNESCO-Welterbestätte „Gartenreich Dessau-Wörlitz“, Bestandteil des UNESCO-Biosphärenreservats Mittelelbe / Flusslandschaft Elbe

Kurzcharakteristik: landschaftliche Parkanlage unter gestalterischem Einbezug natur- und kultur-landschaftlicher Elemente (Elbaue, Altwasser „Kühnauer See“, Huteeichen) und der benachbarten historischen Ortslage Großkühnau mit Kirche und Schloss sowie einer mittelalterlichen Burgwallanlage (Rest der Burg Großkühnau von 945), letzte begonnene Parkanlage des Gartenreichs Dessau Wörlitz, angelegt ab 1805 bis 1845, teilweise 1860, im Vergleich zu anderen Anlagen des Gartenreichs freiere landschaftliche Gestaltung mit weniger stringentem Bezug der Parkräume auf die vorhandenen baulichen Bezugspunkte, geprägt eher durch übergreifend gestaltete Landschaftsräume, als durch kleinräumige Parkszenarien

Nutzung / Frequentierung: Frequentierung durch kulturtouristische Besucher der UNESCO-Welterbestätte „Gartenreich Dessau-Wörlitz“ und Nutzer des Elberadweges, Nutzung als Naherholungsziel der benachbarten Ortslagen und insbesondere der nördlichen Stadtteile Dessaus ist anzunehmen

Sanierung: kontinuierliche Unterhaltung durch die Stadt Dessau auf Grundlage einer Denkmalpflegerischen Zielstellung des Landschaftsarchitekturbüros Uwe Merz (2003/2004), beauftragt durch den Landesheimatbund Sachsen-Anhalt, initiiert durch das Landesamt für Denkmalpflege Sachsen-Anhalt im Rahmen des denkmalpflegerisch-touristischen Landesprojektes „Gartenräume – Historische Parks in Sachsen-Anhalt sowie des Denkmalrahmenplans Gartenreich Dessau-Wörlitz (Landesamt für Denkmalpflege LSA, Kulturstiftung Dessau-Wörlitz, Landschaftsarchitekturbüros Franz, Leipzig und Dr. Reichhoff, Dessau-Roßlau, 2009)

Nach den Flutereignissen 2002 und insbesondere 2013 erfolgte eine Sanierung der Parkwege, gefördert mit Fluthilfemitteln, ausgegeben vom Landesverwaltungsamt Sachsen-Anhalt. Verantwortlich für die Durchführung war die Stadt Dessau-Roßlau in Abstimmung mit dem Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt. Auf Wunsch der Stadt Dessau sollten auf Gefällestrecken an Deichquerungen und am Geländerücken mit Weinberg und Weinberghaus epoxidharzgebundene Wegedecken eingebaut werden. Ausdrücklich sollten Erfahrungen mit deren Beständigkeit und Eigenschaften gesammelt werden. Zudem wären die denkmalfachlich favorisierten wassergebundenen Wegedecken in den genannten abschüssigen Bereichen nur mit erhöhtem Pflegeaufwand und Instandsetzungsbedarf sowie dem Einbau von wasserableitenden Querschlägen zu erhalten gewesen. Erosion und Ausspülungen bei stärkeren Regenereignissen sind hier verstärkt zu erwarten. Aus diesen Gründen stimmte das Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie dem Einbau epoxidharzgebundener Wegedecken in den genannten Bereichen zu. Konstruktiv besitzen sie einen Unterbau, welcher mit einer Asphalttragschicht abschließt.



Abb. 155 Wassergebunden befestigter Weg am Deichdurchlass bei der Ortslage Großkühnau (Benecken, 2022)

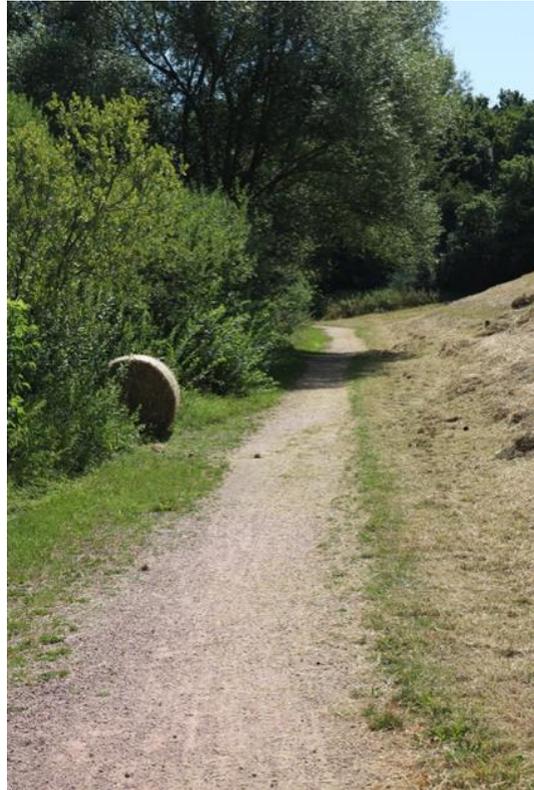


Abb. 156 Wassergebunden befestigter Weg am Deichfuß bei der Ortslage Großkühnau (Benecken, 2022)



Abb. 157 Gefällestrecke nach Deichquerung östlich Großkühnau (epoxidharzgebunden) (Benecken, 2022)



Abb. 158 wie Abb. 157, Detail, Wegekante und Fuge, Schäden (Sommer 2022) (Benecken, 2022)



Abb. 159 wie Abb. 157, Detail mit Fuge und Pollerverankerung (Benecken, 2023)



Abb. 160 wie Abb. 157, Detail mit Fuge und Wegekante (Benecken, 2022)



Abb. 161 wie Abb. 157, Ausformung Wegeschwung am Deichfuß (Benecken, 2022)



Abb. 162 wie Abb. 157, Übergang zum wassergebundenen Wegebau in ebener Lage (Benecken, 2022)



Abb. 163 wie Abb. 157, Übergang zum wassergebundenen Wegeausbau in ebener Lage (Benecken, 2022)



Abb. 164 Zustand wassergebunden befestigter Weg (Sommer 2022) (Benecken, 2022)



Abb. 165 Fahrradsprurrinnen in wassergebundener Wegedecke (Sommer 2022) (Benecken, 2022)



Abb. 166 Detail epoxidharzgebunden befestigte Wegedecke (Sommer 2022) (Benecken, 2022)



Abb. 167 Übergang wassergebunden befestigter zu epoxidharzgebunden befestigtem Wegeabschnitt (Weinberg, Sommer 2022) (Benecken, 2023)



Abb. 168 wie Abb. 167, Detail (Benecken, 2022)

Analyse des Wegezustandes nach den Sanierungen (Sommer 2022):

- Sowohl die wassergebunden, als auch die mit einer epoxidharzgebundenen Deckschicht befestigten Wegeabschnitte weisen bereits Schäden auf, welche jedoch konstruktionsbedingt unterschiedlicher Natur sind.
- An den epoxidharzgebunden befestigten Wegen sind insbesondere an den baubedingten Fugen Rissbildungen und ggf. bevorstehende Materialausbrüche zu beobachten (Abb. 158, 160)
- Die wassergebunden befestigten Wege weisen im Bereich des Elberadweges Fahrradschnecken (Abb. 164) und abschnittsweise durchweichte sowie verformte Deckschichten auf (Abb. 165). Dies gilt in weitaus geringerem Maße für die Wegeabschnitte am Weinberg (Abb. 167, 168)
- Im gestalteten Landschaftsraum zwischen der eigentlichen Parkanlage und der Ortslage Großkühnau sind die Kanten der wassergebunden befestigten Wege weniger exakt ausgebildet oder unterhalten, als in der eigentlichen Parkanlage (Abb. 155 und 156 vs. 163 und 167)
- Optisch unterscheiden sich wassergebunden und mit einer epoxidharzgebundenen Deckschicht befestigten Wegeabschnitte deutlich. Dies gilt sowohl hinsichtlich der Farbgebung, als auch der Oberflächenrauigkeit / Textur (Abb. 162, 163, 167, 168)

Interpretation: Der Zustand der wassergebunden befestigten Wege variiert in Abhängigkeit von Pflege- und Unterhaltungsintensität sowie der Nutzung. So weist der stark frequentierte Elberadweg nutzungsbedingt in größerem Umfang Fahrradspurrinnen in der Deckschicht auf, als die weniger befahrenen Wegeabschnitte am Weinberg. Auch die Verformungen und Durchweichungen in einem leicht abgesenkten Bereich (Abb. 165) dürften z.T. darauf zurückzuführen sein. Ggf. treten geringere Verdichtung des Unterbaus und daraus folgende Setzungserscheinungen hinzu.

Die angesprochenen Rissbildungen an den Rändern der epoxidharzgebundenen Wegedecken können lagebedingt nicht auf den Fahrradverkehr auf dem Elberadweg zurückzuführen sein. Denkbar sind auch hier Verdichtungsmängel im Unterbau, ggf. in Verbindung mit der Nutzung durch Pflegefahrzeuge (Abb. 163). Offensichtlich hängt die Rissbildung mit geringerer Oberflächenflexibilität der statisch gebundenen Deckschicht im Vergleich zu den flexibleren wassergebundenen Deckschichten zusammen. Es ist davon auszugehen, dass die Rissbildungen bei weiteren Belastungen zu Materialausbrüchen führen können.

Denkmalpflegerisches Fazit: Schäden und Unterhaltungsmängel sowohl der wassergebundenen, als auch der epoxidharzgebunden befestigten Wegeabschnitte beeinträchtigen das Erscheinungsbild der idealisiert gestalteten Landschaftsräume durchaus. Hintergrund dürften insbesondere im Bereich des Elberadweges auch Intensität und Art der Nutzung (Befahrung mit Pflegefahrzeugen) sein. Dies betrifft auch die Erlebbarkeit durch Besucher (Fußgänger und Fahrradfahrer) im Zusammenhang mit dem Zustand der Wegedecken. Bei der geringeren Frequentierung der Wege am Weinberg sind diese Effekte dort derzeit eher zu vernachlässigen. Ebenso ist die geringere Pflege der Wegekanten im Landschaftsraum zwischen Park und Ortslage zwar auffällig, jedoch als negativer Effekt für das Erscheinungsbild des Kulturdenkmals von nachrangiger Bedeutung.

Auffällig ist der artifizielle Charakter der epoxidharzgebundenen Wegedecken. Dieser ist begründet in der gleichmäßig glatten Oberflächenbeschaffenheit (Abb. 166), den baubedingten Fugen (Abb. 157, 158) und auch der angesprochenen Rissbildung (Abb. 158, 160). Diese Effekte stehen durchaus im Widerspruch zum Prinzip der idealisierten Kulturlandschaft im Gartenreich Dessau-Wörlitz. Verstärkt wird dies durch den auffälligen Kontrast zwischen den beiden Befestigungsarten. Der Angleich ihrer Farbigkeit und Oberflächentextur weist deutlich Mängel auf. Erschwert dürfte dieser auch dadurch sein, dass die Epoxidharzbindung beide Faktoren beeinflusst und offensichtlich nicht ausreichend gegengesteuert werden konnte.

Zusammenfassung:

- Nutzungsspuren und Schäden an den Wegedecken beeinträchtigen Erscheinungsbild und Erlebbarkeit der Landschaftsräume
- Der artifizielle Charakter der epoxidharzgebundenen Wegedecken und ihr optischer Kontrast zu den wassergebunden befestigten Wegeabschnitten stellt ein den Charakter des Kulturdenkmals verfremdendes Element dar.
- Schäden an der denkmalkonstituierenden Substanz (Gehölzbestände, Bauten, andere Parkeinbauten) durch den Wegebau sind nicht zu konstatieren.

11.7 Referenzobjekt Vorderer Tiergarten (Dessau-Roßlau)

Status: Baudenkmal gem. gem. § 2 (2) Nr. 1 DSchG LSA, Bestandteil des Denkmalsbereichs gem. 2 (2) Nr. 2 DSchG LSA „Gartenreich Dessau-Wörlitz“ und der UNESCO-Welterbestätte „Gartenreich Dessau-Wörlitz“

Kurzcharakteristik: gestalteter Landschaftsraum unter Einbezug der stadtnahen Mulde und von ursprünglich der großherzoglichen Jagd dienenden Waldgebieten, alleegesäumte Wegeabschnitte, ursprünglich räumlicher Bezug zu dem auf der gegenüberliegenden Uferseite der Mulde gelegenen Schlossgarten der Stadt Dessau.

Nutzung / Frequentierung: Zentrumsnahes Naherholungsziel der Stadt Dessau (Verbindung mit dem Stadtzentrum über die Tiergartenbrücke der Stadt Dessau, Frequentierung durch kulturtouristische Besucher der UNESCO-Welterbestätte „Gartenreich Dessau-Wörlitz“ vermutlich nur von untergeordneter Bedeutung)

Sanierung: kontinuierliche Unterhaltung durch die Stadt Dessau u.a. auf Grundlage des Denkmalrahmenplans Gartenreich Dessau-Wörlitz (Landesamt für Denkmalpflege LSA, Kulturstiftung Dessau-Wörlitz, Landschaftsarchitekturbüros Franz, Leipzig und Dr. Reichhoff, Dessau-Roßlau, 2009)

Nach den Flutereignissen 2002 und insbesondere 2013 an der Mulde erfolgte eine Sanierung der Parkwege. Verantwortlich für die Durchführung war die Stadt Dessau-Roßlau in Abstimmung mit dem Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt. Auf Wunsch der Stadt Dessau sollte der Hauptweg vom Zentrum der Stadt über eine Fahrradbrücke östlich des Restes des ehemaligen Stadtschlusses (Tiergartenbrücke) in den Tiergarten mit einer epoxidharzgebundenen Wegedecke ausgebaut werden. Wie im Großkühnauer Park sollten dadurch Erfahrungen mit deren Beständigkeit und Eigenschaften gewonnen werden. Ausschlaggebend war ferner die Nähe der Mulde in ihrem Unterlauf mit latenter Hochwassergefahr; mit einer epoxidharzgebundenen Deckschicht wurde die Hoffnung auf größere Beständigkeit bei Hochwasserereignissen verbunden. Vom Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie wurde eine Sanierung in wassergebundener Bauweise favorisiert. Wegen des gestalterisch eher extensiven Charakters des Tiergartens und vor dem Hintergrund der kurz zusammengefassten Argumentation der Stadt Dessau wurde dem Ausbau mit epoxidharzgebundener Deckschicht jedoch nicht widersprochen.



Abb. 169 Epoxidharzgebundene Deckschicht mit Übergang zur wassergebundenen Wegedecke (Benecken, 2022)



Abb. 170 Epoxidharzgebundene Wegedecke und seitliche Einfassungen (Sommer 2022) (Benecken, 2022)



Abb. 171 weiterer Verlauf des Hauptweges in den Vorderen Tiergarten mit Kleinsteinpflaster und wassergebundenem Wegebelag im Verlauf einer Allee (Sommer 2022) (Benecken, 2022)



Abb. 172 Rissbildungen in der epoxidharzgebundenen Wegedecke an der mit Bandeisen gefassten Wegekante (Sommer 2022) (Benecken, 2022)

Analyse des Wegezustandes nach den Sanierungen (Sommer 2022):

- Die epoxidharzgebundene Wegedecke weist intensive Rissbildungen an den Rändern seitlich der Kanteneinfassung auf (Abb. 172).

- Die wassergebunden befestigten Wege befinden sich in einem vergleichsweise guten Zustand, leichte Fahrradspurrinnen in der Deckschicht sind lediglich oberflächlich und gefährden nicht den Wegeaufbau (Abb. 169, 171)

Interpretation: Der gute Zustand der wassergebundenen Wegedecke im Sommer 2022 dürfte auf die trockene Witterung zum Zeitpunkt der Beobachtung und eine ausreichende Pflege bei genügender Profilierung und zu vernachlässigenden baulichen Mängeln zurückzuführen sein. Die Fahrradspuren deuten auf eine rege Nutzung der Hauptverbindung vom Dessauer Stadtzentrum in den Tiergarten hin.

Die Rissbildungen an den Rändern der epoxidharzgebundenen Wegedecke können ggf. auf Setzungen des Unterbaus zurückzuführen sein. Dass ungenügende Verdichtung, temporär starke Durchfeuchtung oder ggf. auch Oberflächenbelastung, etwa durch Pflegefahrzeuge, ursächliche Faktoren gewesen sein können, lässt sich vermuten, ist jedoch ohne nähere Untersuchung nicht belegt. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass eine gewisse Sprödigkeit, bzw. geringe Flexibilität der Oberfläche zu den Rissbildungen führte. Ausgehend vom Befund müssen bevorstehende Materialausbrüche angenommen werden.

Denkmalpflegerisches Fazit: Die Schäden an der epoxidharzgebunden befestigten Wegedecke beeinträchtigen das Erscheinungsbild des extensiv gestalteten Tiergartens und dessen Erlebbarkeit derzeit nur gering. Bei voranschreitenden Schäden und auftretenden Materialausbrüchen kann sich dies jedoch ändern. Auffällig ist auch im Tiergarten der artifizielle Charakter der epoxidharzgebundenen Wegedecke, bedingt durch die Gleichmäßigkeit der Oberflächenbeschaffenheit und die Rissbildung. Auffällig ist auch hier der Kontrast zwischen den Befestigungsarten (wasser- und epoxidharzgebunden). Der Angleich ihrer Farbigkeit und Oberflächentextur ist nicht befriedigend gelungen. Das Erscheinungsbild der wassergebundenen Wegedecken ist hingegen befriedigend. Zudem begünstigt der bei dieser Befestigungsart flexible Ausbau der Tragschicht den Gehölzerhalt in den betroffenen Alleen, da statisch wirksame Starkwurzeln bei Auskofferungen erhalten und im Wegeverlauf bestehen bleiben können.

Zusammenfassung:

- Schäden an den Wegedecken beeinträchtigen Erscheinungsbild und Erlebbarkeit der Landschaftsräume derzeit nicht wesentlich.
- Der artifizielle Charakter der epoxidharzgebundenen Wegedecken und ihr optischer Kontrast zu den wassergebunden befestigten Wegeabschnitten stellt ein den Charakter des Tiergartens verfremdendes Element dar.
- Schäden an der denkmalkonstituierenden Substanz (hier insbesondere die wegebegleitende Allee) durch den Wegebau konnten nicht festgestellt werden.

11.8 Referenzobjekt ehemalige Deutsche Hochschule für Körperkultur (DHFK) Leipzig heute sportwissenschaftliche Fakultät der Universität, „Campus Jahnallee“

Status: Kulturdenkmal gem. § 2 SächsDSchG, Sachgesamtheit, Ausweisungsmerkmal der betroffenen Freiflächen: „Gartendenkmal“

Kurzcharakteristik: repräsentativer Gebäudekomplex im Stil der „nationalen Bautradition“ der 1950er Jahre, teilweise im Stil der Moderne der 1960er Jahre, errichtet einschließlich der auf die Gebäude ausgerichteten Freiflächenstrukturen (Wege, Stützmauern, Freitreppen) 1953-1957, gestalterischer Einbezug älterer Elemente wie einer Eichenallee und der westlich benachbarten Strukturen des 1932-1939 errichteten Richard-Wagner-Hains am Elsterflutbecken, dessen Denkmalsplatz teilweise mit der DHFK überbaut; gestalterischer Zusammenhang der Gesamtanlage auch mit dem nördlich benachbarten ehemaligen Sportforum Leipzig (1950-1956), dessen Hauptachse (Ehem. Zentralstadion-Glockenturm-Festweisse) südlich auf den Gebäudekomplex der ehem. DHFK ausgerichtet ist.

Nutzung / Frequentierung: intensive Nutzung hauptsächlich durch Studenten und Mitarbeiter der heutigen sportwissenschaftlichen Fakultät der Universität Leipzig, „Campus Jahnallee“

Sanierung: Die Sanierungen wurden durch den Staatsbetrieb Sächsisches Immobilien- und Baumanagement, Niederlassung Leipzig II (ehem. Staatshochbauamt Leipzig 2) beauftragt und konzipiert durch das Landschaftsarchitekturbüro Franz, Leipzig. Abstimmungen mit dem Landesamt für Denkmalpflege Sachsen erfolgten 2015 und 2016. Danach sollten die gebäudenahen Wege wegen teils starker Beanspruchung (regelmäßige Befahrungen im Bereich der Poststelle der Fakultät und der sog. Ernst-Grube-Halle) und abschüssiger Abschnitte mit einer Asphaltdecke zzgl. Oberflächenbehandlung aus einer gelblich-beigen Epoxydharz-Einstreu versehen werden (Belastungsklasse Bk 0,3 / Wohnwege). Als Einfassung war eine 8 mm starke Bandeisenkante vorgesehen. Wassergebunden befestigte, weniger stark beanspruchte Wegeabschnitte sind unmittelbar benachbart und sollten farblich angeglichen werden. Folgende Aufbauten waren vorgesehen:

Regelaufbau farbiger Asphalt. Ausbauhöhe 55 cm:

- 4 cm Asphaltdecke zuzüglich Oberflächenbehandlung (gelblich-beige Einstreu in Epoxidharz)
- 8 cm Asphalttragschicht
- 15 cm Schottertragschicht 0/45
- 23 cm Frostschuttschicht

Regelaufbauhöhe wassergebundene Decken. Ausbauhöhe 35 cm:

- 4 cm Deckschicht, Körnung 0/8 gelblich-beige
- 6 cm Dynamische Schicht, Körnung 0/16
- 25 cm Schottertragschicht, Körnung 0/32

Nach denkmalschutzrechtlicher Genehmigung im Jahr 2018 wurden die Maßnahmen erst 2021 umgesetzt und anschließend durch die Denkmalschutzbehörde der Stadt Leipzig abgenommen.



Abb. 173 Übergang wassergebundene Wegedecke – Asphaltdecke mit epoxidharzgebundener Abstreue, Wegeeinfassung aus Bandeisenkante (Sommer 2022) (Benecken, 2022)



Abb. 174 wie Abb. 173, zusätzlich Pigmentunregelmäßigkeiten um Pollerstandort in der epoxidharzgebundenen Deckschicht (Benecken, 2022)



Abb. 175 zusätzlich Pigmentunregelmäßigkeiten um Pollerstandort in der epoxidharzgebundenen Deckschicht (Benecken, 2022)



Abb. 176 Pigmentunregelmäßigkeit an einer Störung unter der epoxidharzgebundenen Deckschicht (Benecken, 2022)



Abb. 177 kleinflächig aufgebrachte epoxidharzgebundene Deckschicht auf Kanaldeckel (Benecken, 2022)



Abb. 178 im Vergleich zu Abb. 5, Kanaldeckel mit Betonfüllung in wassergebundener Deckschicht (Benecken, 2022)

Analyse des Wegezustandes im Sommer 2022:

- Die wassergebundenen Wegeaufbauten wiesen eine leichte Wellenstruktur an der Oberfläche auf.
- Konstruktive Defekte an den epoxidharzgebundenen Wegedeckschichten auf Asphaltunterbau waren nicht festzustellen. Einzig einige Unregelmäßigkeiten hinsichtlich der Pigmentierung waren zu konstatieren (Abb. 174, 175, 176)
- Pflegedefizite und deren Folgen (Humusauftrag, Wildkräuterbildung, Ausspülungen oder übermäßiger Materialabtrag) waren nicht zu beobachten.

Interpretation: Ein erkennbarer Hinweis auf leichte einbaubedingte Mängel war im Sommer 2022 die wellenartige Struktur der wassergebunden befestigten Wegedeckschicht. Diese kann auf eine ungleichmäßige Verdichtung des Unterbaus hinweisen und erschwert den regelkonformen Aufbau eines seitlichen Dachgefälles, welches zu einer ungestörten Entwässerung erforderlich ist. Die wellenartigen Vertiefungen können bei Feuchtigkeit die Pfützenbildung begünstigen und damit der punktuellen Aufweichung der Deckschicht Vorschub leisten. Die Ursachen der zu beobachtenden Pigmentunregelmäßigkeiten in der epoxidharzgebundenen Deckschicht lassen sich lediglich auf Grundlage ihrer Beobachtung nicht aufklären. Damit verbundene Erhaltungsprobleme dürften jedoch nicht vorliegen. Da die epoxidharzgebundene Deckschicht einen Unterbau aus Asphalt besitzt, dürften auch dessen Eigenschaften maßgeblich für die Beständigkeit des Wegeaufbaus insgesamt sein; die epoxidharzgebundene Deckschicht besitzt hier ja primär eine optische Funktion. Dies bedeutet allerdings auch, dass die mit solchen Wegedecken verbundene Eigenschaft einer bedingten Wasserdurchlässigkeit, mithin lediglich einer Teilversiegelung, hier nicht vorliegt.

Trotz gewisser Nutzungsspitzen während des Lehrbetriebs sind die Nutzungsintensität und –kontinuität auf den Wegeflächen der sportwissenschaftlichen Fakultät der Universität Leipzig deutlich geringer, als auf Wegen der innerstädtischen Parks wie des Johannaparks. Entsprechend sind hier geringere oder zeitlich verzögerte Abnutzungsschäden auch bei ähnlicher Pflegeintensität zu erwarten.

Denkmalpflegerisches Fazit: Bau- oder konstruktionsbedingte Beeinträchtigungen des Erscheinungsbilds des Kulturdenkmals waren im Sommer 2022 zu vernachlässigen. In geringem Umfang in Wegenähe vorhandene Gehölzsubstanz konnte durch angepasste Bauweise bei der Schaffung des Unterbaus für die hier eingebaute wassergebundene Wegedecke erhalten werden; ein für Befahrungen tragfähiger Unterbau war hier nicht erforderlich. Der farbliche Angleich der beiden benachbarten Wegedecken ist zwar vergleichsweise gut gelungen, aber dennoch wahrzunehmen. Bedeutender sind ggf. die Effekte durch abweichende Korngrößenzusammensetzungen der Deckschichten und eine daraus resultierende unterschiedliche Oberflächentextur (Abb. 173, 174, 175). Auch diese trägt sowohl aus der Nähe, als auch bei Beobachtung aus der Distanz dazu bei, dass die unterschiedlichen Befestigungsarten klar voneinander zu unterscheiden sind. Sicherlich ist damit ein leicht verfremdender Effekt verbunden. Dieser wirkt sich auf den Charakter des Gartendenkmals hier aber geringer aus, als in landschaftlichen Anlagen mit ihrem komplexen gestalterischen Gefüge. Ein abschließend zu vermerkender Effekt ist, dass die epoxidharzgebundene Deckschicht auch auf Kanaldeckeln aufgebracht werden konnte (Abb. 177). Damit lassen sich diese technischen Einbauten etwas besser an ihre Umgebung anpassen, als in wassergebunden befestigten Deckschichten (Abb. 178).

11.9 Referenzobjekt Schlosspark Lützschena Leipzig

Status: Kulturdenkmal gem. § 2 SächsDSchG (Sachgesamtheit einschließlich mehrerer Einzeldenkmale einschließlich Schloss etc.), Ausweisungsmerkmal für den Park „Gartendenkmal“; außerdem NSG

Kurzcharakteristik: frühe landschaftliche „sentimentale“ Parkanlage unter Ausnutzung der vorhandenen Auwaldstrukturen einschließlich zahlreicher Gewässer, teils waldartiger Charakter, kleinräumige Gestaltung mit unterschiedlichen thematischen „Gartenszenen“, die neben den Gewässern und den Gehölzen durch Kleinarchitekturen und Denkmale geprägt sind;

1822-1825 Anlage durch den in den russischen Adelsstand erhobenen Leipziger Handelsherrn Maximilian Speck von Sternburg, Weiterentwicklung durch seinen Sohn Alexander (1821-1911) und seinen Enkel Alexander James (1856-1916), nach starker Vernachlässigung, Verwilderung und Verfall 1998 Rückerwerb durch Wolf-Dietrich Freiherr Speck-von Sternburg, seither etappenweise Wiederherstellung in Kooperation mit der Stadt Leipzig, Grünflächenamt, später Amt für Stadtgrün und Gewässer, der städtischen Denkmalschutzbehörde und dem Landesamt für denkmalpflege Sachsen

Nutzung / Frequentierung: Naherholungsziel für den Großraum Leipzig, begünstigt durch den den Park tangierenden Elsterradweg (läuft nicht direkt durch den Park) und das sich in diesem befindliche Auwaldzentrum, eine Umweltbildungs- und Informationseinrichtung, Ziel für wohnungsnahe Erholungsnutzung von Bewohnern der benachbarten Ortsteile

Sanierung: Auf Grundlage einer Denkmalpflegerischen Zielstellung des Landschaftsarchitekturbüros Franz / Leipzig erfolgte seit 1998 eine schrittweise Wiederherstellung von Parkszenen Kleinarchitekturen, maßgeblich waren der private Eigentümer, ein örtlicher Förderverein in Kooperation mit dem Ortschaftsrat Lützschena und das Grünflächenamt bzw. später Amt für Stadtgrün und Gewässer der Stadt Leipzig, welchem in weiten Bereichen Unterhaltung und Pflege übertragen sind. Nach starken Schäden am Wegesystem infolge Befahrungen zur Gehölzentnahme im Jahr 2022 erfolgte bis zum Frühjahr 2023 eine Instandsetzung verschiedener Wegeabschnitte durch dieses Amt. In ausgewählten Bereichen und bei vorhandenem Unterbau wurde eine ockerfarbene wassergebundene Wegedecke (Fabrikat: Tegra) aufgebracht. Bei fehlendem Unterbau und in den waldartigen Bereichen wurde eine Kiesdecke (Wandkies) ohne Unterbau mit feineren Kornanteilen zum Erreichen einer leichten Bindigkeit aufgebracht.



Abb. 179 Weg mit Wandkiesdecke, vorn unsanierterer Wegebereich (Benecken, 2023)



Abb. 180 wie Abb. 173, zusätzlich Pigmentunregelmäßigkeiten um Pollerstandort in der epoxidharzgebundenen Deckschicht (Benecken, 2023)



Abb. 181 Wandkieswegedecke in waldartigem Bereich (Benecken, 2023)



Abb. 182 Wandkiesdecke am Übergang zu einem unbefestigten Wegeabschnitt (Benecken, 2022)



Abb. 183 Wassergebundene Wegedecke (Tegra) am Dianatempel nach Regenereignis (Benecken, 2023)



Abb. 184 Wassergebundene Wegedecke (Tegra) nach Regenereignis, Detail (Benecken, 2023)



Abb. 185 Unsanierter Wegeabschnitt nach Regenereignis, rechts Ansatz Wandkiesdecke (Benecken, 2023)



Abb. 186 Sanierter Wegeanschluss (wassergebundene Decke) nach Regenereignis (Benecken, 2023)



Abb. 187 Sanierter Sommerweg (wassergebundene Decke) östlich des Schlosses nach Regenerereignis (Benecken, 2023)



Abb. 188 Sanierter Sommerweg (wassergebundene Decke) östlich des Schlosses nach Regenerereignis (Benecken, 2022)

Analyse des Wegezustandes nach den Sanierungen (Frühjahr 2023):

- Nach einem Regenereignis weisen die unsanierten und lediglich punktuell reparierten Wegeabschnitte (kein durchgängiger Unterbau) starke Durchweichungen und Verformungen auf und sind weitgehend nicht nutzbar (Abb. 185)
- Die mit Wandkies ausgebauten Wegeabschnitte weisen auch nach einem Regenereignis eine geschlossene und gut nutzbare Oberfläche auf. Lediglich punktuell und an den Rändern ist Staunässe und Pfützenbildung zu verzeichnen.
- Die mit wassergebundener Wegedecke (Tegra) ausgebauten Wegedecken befinden sich optisch überwiegend in einem ähnlichen Zustand, wie die Wandkiesdecken. Lediglich punktuell und an wegekanten unter dem Niveau der anschließenden Flächen sind Staunässe und Pfützenbildung zu beobachten.
- Der Sommerweg in der Allee östlich des Schlosses neben einer feldsteingepflasterten Fahrbahn (Sanierung mit wassergebundener Wegedecke /Tegra) weist nach einem Regenereignis starke Staunässe und eine unregelmäßige Wegedecke (Wellenbildung) sowie ein leichtes Gefälle in Richtung der Pflasterung auf.

Interpretation: Der schlechte Zustand der unsanierten Wegeabschnitte ist auf Schäden durch intensive Befahrung auch mit schwereren Fahrzeugen im Jahr 2022 in Verbindung mit weitgehend nicht

vorhandenem Unterbau und fehlender Entwässerung zurückzuführen. Nach Regenereignissen sind sie nicht mehr nutzbar.

Wenige Wochen nach dem Einbau befinden sich die Wandkiesdecken optisch und funktional in einem befriedigenden Zustand. Die Nutzbarkeit war auch nach einem Regenereignis uneingeschränkt gegeben. Punktuelle Pfützen- und Staunässebildung dürften auf kleinräumige Setzungen sowie vor allem nicht funktionierende Entwässerung durch Lage der Wegeränder unter dem Niveau der anschließenden Vegetationsflächen zurückzuführen sein. Sie sind jedoch auch ein Hinweis darauf, dass die angenommene Wasserdurchlässigkeit nur bedingt gegeben ist, vermutlich wegen der bekannten bindigen Anteile im Material.

Staunässe und Pfützenbildung am Rand der mit wassergebundener Decke ausgebauten Wege dürften auf ähnliche Effekte zurückzuführen sein, wie bei der Wandkiesdecke. Erkennbar war jedoch eine stärkere Durchweichung nach einem Regenereignis. Anzunehmen ist eine weitaus geringere Wasserdurchlässigkeit. Der optisch dennoch gute Zustand war auf fehlende Nutzung durch Fußgänger oder Radfahrer im Verlauf eines Regenereignisses und unmittelbar danach zurückzuführen.

Der Sommerweg in der Allee östlich des Schlosses besitzt keine funktionierende Entwässerung und einen stark ungleichmäßig aufgebauten und verdichteten Unterbau (Wellenbildung). Es besteht ein leichtes Dachgefälle in Richtung der erhöhten Feldsteinpflasterbahn. Nach einem Regenereignis führte dies zu fast flächendeckender Staunässe und starker Pfützenbildung. Eine Nutzbarkeit war nicht gegeben. Durch die bestehenden Baumängel ist ohne Korrekturen von schnell voranschreitenden Schäden infolge Durchweichung und Auflösung der Deckschicht auszugehen.

Denkmalpflegerisches Fazit: Unter Berücksichtigung von Charakter und Stilistik des Parks sollen grundsätzlich abseits historisch natursteingepflasterter Wegeabschnitte ausschließlich wassergebundene oder weitgehend ungebundene Wegedeckschichten verwendet werden. Dies korreliert mit dem Erscheinungsbild der sentimental Landschaftsparkanlage. Der Zustand der unsanierten Wegeabschnitte nach starken Nutzungsschäden und derjenige des wassergebunden befestigten Sommerweges mit Baumängeln beeinträchtigen sowohl das Erscheinungsbild der Parkanlage, als auch ihre Erleb- und Nutzbarkeit durch Besucher. Dies gilt nicht für die übrigen wassergebunden befestigten oder mit einer Wandkiesschicht versehenen Wegeabschnitte. Sie sind in der erfolgten Ausführung gleichermaßen mit dem denkmalpflegerisch intendierten Erscheinungsbild der als Kulturdenkmal geschützten Parkanlage vereinbar. Größere Baumängel oder Pflegedefizite waren hier im Frühjahr 2023 nicht erkennbar. Beide Ausbauformen ermöglichen einen flexiblen Umgang mit Auskofferungen bzw. den Erhalt statisch wirksamer Starkwurzeln, mithin den Schutz von Gehölzen als denkmalkonstituierender Substanz. Inwieweit die verwendeten Wandkiesbefestigungen ausreichend verformungsfest bei der Befahrung mit Pflegefahrzeugen sind, muss sich erst im Zuge der praktischen Nutzung erweisen.

12 Fazit

Hauptanliegen des Projektes war, neben den in historischen Parkanlagen und Gärten traditionell eingesetzten wassergebundenen Wegedecken weitere Wegedeckenmaterialien auf Basis von Epoxidharz oder Asphalt objektiv hinsichtlich

- ihrer Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit
- ihrer Denkmalverträglichkeit,
- der Energieaufwendungen für die Pflege sowie
- ihrer ökologischen Bilanz

miteinander zu vergleichen.

Das Projekt wurde interdisziplinär bearbeitet. Es erfolgten Recherchen in Literatur und Praxis, eine Abstimmung der zu untersuchenden Materialien unter Einbindung der Gartendenkmalpflege des LDA Sachsen-Anhalt, dabei wurden u.a. die aktuell eingesetzten farbigen Asphaltdecken, die eingebauten Epoxidharzdecken und die stabilisierten wassergebundenen Decken berücksichtigt. Weiter erfolgten eine Ökobilanzierung verschiedener Wegedeckenmaterialien und Wegebauweisen, Laboruntersuchungen verschiedener Wegedeckenmaterialien, ein Monitoring bestehender Wegeausführungen vor Ort und eine Bewertung der Wegeausführungen nach denkmalpflegerischen Gesichtspunkten und objektspezifischen Zielstellungen an Hand von Fallbeispielen.

Die Ökobilanzierung umfasste wasser-, bitumen- und epoxidharzgebundene Wegebauweisen nach der DWA-A 904 und RStO und Erweiterungen. Als zentrale Umweltwirkungskategorien wurde das Treibhausgaspotenzial (Global Warming Potential, GWP), Versauerungspotenzial (Acidification Potential, AP) und der Primärgesamtenergiebedarf (PEges) gemäß ISO 14040/44 bilanziert. Die Systemgrenzen beinhalten die Herstellung der Baustoffe, sowie deren Transport vom Werk und zum Entsorgungsort sowie Erneuerungsmaßnahmen (an Wegedecken). Als funktionelle Einheit wurde 1 m² Nettogrundfläche gewählt, sowie ein Bilanzierungszeitraum von 30 Jahren gesetzt. Signifikante Parameter wurden identifiziert und mittels Sensitivitätsanalyse variiert. Durch einen Bilanzierungsumfang von insgesamt 114 Wegebauweisen wird die Aussagekraft der erzielten Ergebnisse unterstrichen.

Die Ergebnisse der Ökobilanzierung zeigen, dass die wassergebundenen Wegebauweisen in den Wirkungskategorien Treibhauspotential (GWP), Versauerungspotential (AP) und Primärgesamtenergiebedarf (PEges) die geringsten Umweltwirkungen aufweisen, gefolgt von den epoxidharzgebundenen und den schließlich bitumengebundenen Wegebauweisen, wobei die Bilanz der epoxidharzgebundenen Wegebauweisen stark von den Eigenschaften der EP-Harze und deren Applikationsmengen abhängig sind.

Laboruntersuchungen erfolgten an insgesamt sieben unterschiedlichen Baustoffgemischen. Dazu zählten zwei bitumengebundene, drei kunstharzgebundene sowie zwei wassergebundene Baustoffgemische. An hergestellten Probekörpern wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Spaltzugschwellversuche zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens und der Steifigkeitsmodule der gebundenen Baustoffgemische
- Untersuchungen zur Temperatur- und UV-Beständigkeit der gebundenen Baustoffgemische
- Frost-Tau-Wechselversuche zur Analyse des Verwitterungswiderstandes der gebundenen Baustoffgemische

- Stempel Eindringversuche zur Beschreibung des Verformungsverhaltens der gebundenen und ungebundenen (oder wasser gebundenen) Baustoffgemische
- Erosionswiderstand gegenüber strömendem Wasser der gebundenen und ungebundenen (oder wasser gebundenen) Baustoffgemische
- Widerstand gegenüber steigendem Grundwasserstand der gebundenen und ungebundenen (oder wasser gebundenen) Baustoffgemische

Erfahrungen in der Unterhaltung verschieden konstruierter Wegedecken und hinsichtlich ihres Verhaltens in Abhängigkeit von Nutzung und witterungsbedingten Einflussgrößen stehen Annahmen und Erwartungen hinsichtlich ihrer Beständigkeit gegenüber, welche häufig den Ausschlag für Investitions- oder Bauvorhaben liefern, so im Vorfeld der nach der Flut 2013 erforderlichen Sanierungsmaßnahmen.

Die von der Hochschule Magdeburg-Stendal gelieferten Ergebnisse (siehe Anlage) hinsichtlich des Verhaltens der untersuchten Materialien sollen im Folgenden in Relation zu den in den vorangegangenen Betrachtungen dargestellten Beobachtungen gestellt werden. Die daraus abzuleitenden Schlussfolgerungen können einen Beitrag zur Versachlichung der Entscheidungsfindung bei Wegebaumaßnahmen liefern.

Untersuchungsergebnis: Kunstharzgebundene Baustoffe besitzen im Verhältnis zu bitumengebundenen Baustoffen bis zu einer bestimmten Belastungsgrenze einen ausgeprägten Dauerfestigkeitsbereich. „Oberhalb dieser Belastungsgrenze kommt es zu deutlichen Schädigungen und teilweise abruptem Bruchverhalten ... Im höheren Beanspruchungsbereich weisen die bitumengebundenen Baustoffe Vorteile bezüglich des Ermüdungsverhaltens gegenüber den kunstharzgebundenen Baustoffen auf.“

Schlussfolgerungen: Die im Dessauer Tiergarten und im Großkühnauer Park beobachteten Rissbildungen in den epoxidharzgebundenen Wegedeckschichten können auf das hier beschriebene Materialverhalten zurückzuführen sein, sofern die angesprochenen Belastungsgrenzen überschritten wurden. Die beobachtete Nutzung durch Pflegefahrzeuge in Großkühnau ist ein Indiz dafür. Insbesondere, wenn die kunstharzgebundenen Wegedecken zu dünn ausgebildet werden, kann die Belastungsgrenze schnell erreicht werden und zu entsprechendem Versagen (Rissbildung) führen.

Auch Setzungstendenzen im Gelände und mangelnde Stabilität des Unterbaus im Grenzbereich zu einem Graben können, im Zusammenhang mit einer zu dünnen Deckschicht, ursächlich für solche Schäden sein, wie die Beobachtungen im Dessauer Tiergarten nahelegen.

Festzustellen ist, dass die vor Ort gesichteten bitumengebundenen Wegeaufbauten vergleichbare Schäden bislang nicht aufweisen. Da diese ebenfalls mindestens durch Pflegefahrzeuge genutzt werden, wäre in Abhängigkeit von weiteren Parametern, wie etwa der Stärke der Asphaltsschichten, zu untersuchen, ob dies als Indiz dafür gewertet werden kann, dass im höheren Beanspruchungsbereich auch vor Ort eingebaute bitumengebundene Wegedecken Vorteile hinsichtlich des Ermüdungsverhaltens gegenüber epoxidharzgebundenen Wegedecken besitzen. Auch epoxidharzgebundene Wegedecken mit einer Asphaltdecke als Tragschicht zeigen Schäden durch Risse, jedoch deutlich weniger. Dass die Tragfähigkeit der Tragschicht, in diesen Fällen eine Asphaltsschicht, das Rissbildungsverhalten

ten der Deckschicht beeinflusst, kann vorausgesetzt werden. Quantifizierende Untersuchungen hierzu waren jedoch nicht Gegenstand des Forschungsprojektes.

Untersuchungsergebnis: „Die Ergebnisse der Spaltzugschwellversuche nach thermischer Belastung und UV-Bestrahlung zeigten, dass die durch den Versuch hervorgerufene Alterung einen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten der bitumen- und kunstharzgebundenen Baustoffgemische hatte ... „

Schlussfolgerungen: Hinsichtlich der aktuell vor Ort gesichteten Fallbeispiele war es nicht möglich, beobachtete Schäden eindeutig auf das angesprochene Ermüdungsverhalten zurückzuführen. Insbesondere in diesem Zusammenhang zu berücksichtigen ist jedoch die erst vergleichsweise kurze Bestandszeit der jeweiligen Wegeaufbauten. Vor diesem Hintergrund spricht die Rissbildung in den epoxidharzgebundenen Wegedecken eher für deren angesprochenes Ermüdungsverhalten.

Untersuchungsergebnis: „Die Ergebnisse der Spaltzugschwellversuche nach Belastung durch Frost-Tau-Wechsel zeigten, dass bei den Baustoffgemischen BB1, BB2, KB2, und KB3 ein Einfluss auf das Ermüdungsverhalten zu erkennen war. ...“ Dieser Effekt wurde vereinfacht ausgedrückt durch Frostsprengung enthaltener Wasseranteile erklärt. Für das Baustoffgemisch KB1 zeigte sich ein solches Verhalten in der untersuchten Stichprobe nicht.

Schlussfolgerungen: Dieses Untersuchungsergebnis zeigt, dass bitumen- und epoxidharzgebundene Wegedecken, durch Frost-Tauwechsel geschädigt werden können, wie bereits bekannt ist. Festzuhalten ist in diesem Zusammenhang, dass wassergebundene Wegedeckschichten nach Frost-Tau-Wechsel grundsätzlich einer Nachverdichtung und Reprofilierung bedürfen. Erfolgt vor diesen Maßnahmen eine intensive Nutzung kann es zu stärkeren Schäden der Deckschicht und deren Vermischung mit der Tragschicht kommen. Der damit verbundene Wartungs- oder Reparaturbedarf wäre im Vergleich demjenigen bei Schäden an bitumen- oder epoxidharzgebundenen Wegedecken gegenüberzustellen. Bei regelgerechter und rechtzeitiger Wartung lässt sich die uneingeschränkte Nutzbarkeit ohne erkennbare Defekte bei wassergebundenen Wegedecken nach Frost-Tau-Wechsel-Schäden wiederherstellen. Bei den bitumen- oder epoxidharzgebundenen Wegebelägen besteht hierzu im Vergleich entweder die Möglichkeit der Ausbesserung von Schadstellen (Risse, Schlaglöcher) oder der Kompletterneuerung der Deckschicht sowie ggf. auch der Tragschicht(en).

Untersuchungsergebnis: „Die Ergebnisse der Stempeleindringversuche zeigen den teilweise sehr deutlichen Einfluss der Temperatur auf die Verformungsbeständigkeit von bitumen- und kunstharzgebundenen Baustoffen.“

Schlussfolgerungen: Grundsätzlich bekannt sind temperaturbedingte Verformungen bitumengebundener Deckschichten, auf die u.a. die Entstehung von Spurrinnen zurückgeführt wird. Vergleichbare temperaturbedingte Verformungen sind tatsächlich von wassergebunden befestigten Deckschichten nicht bekannt. Gleichwohl ist der Widerstand der wassergebundenen Deckschichten gegenüber bleibenden Verformungen deutlich geringer als der von Asphaltdeckschichten und von kunstharzgebundenen Deckschichten.

Bei den bitumen- und kunstharzgebundenen Deckschichten sind der Erhitzungsgrad und die damit zusammenhängenden Folgen auch von der Färbung und der Helligkeitsgrad und somit der Strahlungsabsorption abhängig. Was hier jedoch nicht Untersuchungsgegenstand war.

Untersuchungsergebnis: „Die Ergebnisse der Untersuchung zeigten den signifikanten Einfluss des Wassergehaltes auf das Verformungsverhalten der [wassergebundenen] Baustoffgemische.“

Schlussfolgerungen: Die Empfindlichkeit wassergebundener Befestigungen gegenüber erhöhtem Wassergehalt ist ein bei feuchter Witterung und vorhandenen Bau- oder Pflegedefiziten vor Ort gut zu beobachtender Effekt. Hierzu sei auf das Fallbeispiel der unsanierten Wegeabschnitte im Leipziger Johannapark hingewiesen. Bei regelgerecht gebauten und unterhaltenen wassergebunden befestigten Wegen treten diese Schäden jedoch in deutlich geringerem Maße auf. Kann durch funktionsgerechte Profilierung und Verdichtung der Deckschicht eine ausreichende Entwässerung sichergestellt und eine Pfützenbildung vermieden werden, tritt in der Regel kein Anstieg des Wassergehalts auf, welcher den Bestand der Deckschicht gefährdet. In diesem Zusammenhang sind auch die unterschiedlichen Beobachtungen nach einem stärkeren Regenereignis im Leipziger Schlosspark Lützschena aufschlussreich.

Untersuchungsergebnis: „Die Untersuchungsergebnisse zum Erosionswiderstand gegenüber strömendem Wasser zeigten, dass bei allen gebundenen Baustoffgemischen keine Erosion durch die im Versuch erzeugte Strömung auftrat...“ Zusammengefasst waren Erosionsschäden bei wassergebunden befestigten Deckschichten am Rand der Probekörper beobachtbar. Hinsichtlich einer Ausdehnung des Deckschichtgemisches mit pflanzlich-mineralischem Stabilizeranteil wird vermutet, dass dieser Effekt auf ein Aufquellen des Stabilizers zurückzuführen ist. Festgehalten wird unter der Rahmenbedingung mäßiger Überströmung: „An den strömungsexponierten Bereichen, wie den Rändern oder Ecken, gab es leichte Erosionen, während die Probekörpermitten stabil blieben.“ Ferner heißt es: „Bei Extremversuchen mit starkem Strömungsangriff und beschädigten Probekörperoberflächen trat starke Erosion an der vorderen Kante der Probekörper auf, während in den beschädigten Bereichen vor allem feine Materialien ausgespült wurden. Größere Einzelkörner wurden vereinzelt ausgelesen.“

Schlussfolgerungen: Aufgrund dieser Ergebnisse wäre zu untersuchen, in wieweit beständige und unbeschädigte Kanteneinfassungen stärkere Schäden an wassergebundenen Wegedecken verhindern können. Da auch bei starkem Strömungsangriff gröbere Einzelkörner nur vereinzelt ausgespült wurden, kann angenommen werden, dass bei diesem die Tragschichten weniger geschädigt werden, als die feinkörnigeren Deckschichten. Trifft dieser Befund zu, würde nicht der gesamte Wegebau geschädigt, sondern müsste lediglich die Deckschicht erneuert oder reprofiliert werden. Ist der Strömungsangriff so stark, dass Tragschichten ausgespült oder geschädigt werden, besitzen nicht nur wassergebundene, sondern auch epoxidharz- oder bitumengebundene Deckschichten keinen Bestand und brechen ein. Diese Effekte waren vorliegend kein Untersuchungsgegenstand. Jedoch ist offenkundig, dass bei solchen Ereignissen auch der Bestand von Wegebauten mit fest gebundener Deckschicht von Qualität und Standfestigkeit der Kanteneinfassungen abhängt.

Untersuchungsergebnis: Bei simulierten steigenden Grundwasserständen wiesen die wassergebunden befestigten Probekörper im Gegensatz zu den fest gebundenen in unterschiedlichem Ausmaß Materialverluste an den Ecken und Kanten auf. Stabilizerzusatz gewährleistete abseits von diesen hohe Lagestabilität, jedoch bei Zunahme des Volumens, vermutlich in Folge des Quellverhaltens des Stabilizerszusatzes. Es heißt: „Diese Schlussfolgerungen und die Ergebnisse der Stempeldruckversuche legen nahe, dass erst die Kombination von hygrischen Belastungen und Oberlasten die Qualität der ungebundenen [wassergebundenen] Wegedecken stark beeinflussen bzw. Schädigungen

durch bspw. das Befahren von wassergesättigten [wassergebundenen] Wegedecken zu erwarten sind.“

Schlussfolgerungen: Tatsächlich ist dieser Effekt bei Wegeaufbauten in Nutzung vielfach zu beobachten. Hingewiesen sei auf die Fallbetrachtungen zum Johannapark in Leipzig oder zum Großkühnauer Park in Dessau. Insbesondere an diesen zeigt sich, dass starke Nutzung bei Wassersättigung der Wegeoberflächen zu größeren Schäden führt. Ist die Wassersättigung grundwasserstandbedingt, kann auch die baulich zu beeinflussende Entwässerung aus der Wegefläche heraus nicht eintreten. Andererseits sind Schäden an wassergesättigten Wegedecken bei geringerer Nutzungsintensität ebenfalls von weniger ausgeprägter Natur (vgl. hierzu auch die Betrachtungen zum Leipziger Schlosspark Lützschena).

Ausblick

Weitere Untersuchungen zur Beständigkeit von Wegedeckschichten sollten insbesondere Faktoren wie die Beschaffenheit des Unterbaus und von Kanteneinfassungen, von Bau- und Unterhaltungsmängeln sowie von Nutzungsart und –intensität miteinbeziehen.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Eine Onlineveranstaltung zum Projektabschluss ist in nächster Zeit geplant. Die Veröffentlichung des Abschlussberichts erfolgt online auf der Website der DBU. Die Landesämter für Denkmalpflege und Untere Schutzbehörden in Sachsen und Sachsen-Anhalt werden über die Projektergebnisse in Veranstaltungen informiert.

13 Literaturverzeichnis

- DBU-Vorhaben „Erarbeitung und modellhafte Umsetzung eines innovativen Pflegekonzepts zur nachhaltigen Bewahrung des Hasefriedhofs und Johannisfriedhofs in Osnabrück unter Berücksichtigung von Naturschutz und Denkmalpflege“ AZ 27906-45 , Abschlussbericht
- DIN (2006): Umweltmanagement-Ökobilanz- Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006) und Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006). Deutsches Institut für Normung, Berlin. Berlin: Beuth Verlag.
- Fischer, S. (2019) Ökobilanzierung ausgewählter HanseGrand Klimabaustoffe. Projektarbeit im Auftrag der Firma HanseGrand, 24.01.2019, 42 S.
- Keller, S. (2020) Hochwasserschutz und Wegebau in den Magdeburger Parkanlagen, Denkmalpflege in Sachsen-Anhalt 2020, 1, S. 42–47
- Kundzewicz, Z.W. (2011): Intense Precipitation and High Floods –Observations and Projections, In: In Extremis Disruptive Events and Trends in Climate and Hydrology. Kropp, J., Schellenhuber, H. J. (ed.), Springer, Berlin 2011: 130-142
- Liman, Herbert (1993): „Preußischer Chausseebau, Meilensteine in Berlin“, Berliner Hefte Nr. 5
- Rohde, M. & Schwarz, H. (2008): Wege - Theorie der Technik, Gestaltung und Pflege, In: Pflege in historischen Gärten, Theorie und Praxis (Hrsg. M. Rohde), Muskauer Schriften, Bd. 6., Stiftung „Fürst-Pückler-Park Bad Muskau“
- Steiger, M., Neumann, H.-H., Grodten, T., Wittenburg, C., Dannecker, W. (1998) Salze in Natursteinmauerwerk - Probenahme, Messung und Interpretation. In R. Snethlage, Ed. Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung II, Stuttgart, S. 61-91.
- Stürmer, S., Kulle, Ch. (2017) Untersuchungen von Mauerwerksabbruch (verputztes Mauerwerk aus realen Abbruchgebäuden) und Ableitung von Kriterien für die Anwendung in Betonen mit rezykliertem Gesteinskörnung (RC-Beton mit Typ 2 Körnung) für den ressourcenschonenden Hochbau, AZ 32105, DBU-Abschlussbericht, S. 195
- www.hansegrand.de
- www.stones-baustoffe.de

14 Anlagen

Linda Bromberg, M. Eng., Prof. Dr.-Ing. Sascha Kayser (2023) Laboruntersuchungen an Probekörpern im Rahmen des Projekts „Modellhafte Beurteilung der Beständigkeit von Wegebefestigungen unterschiedlicher Ausführung in historischen Parkanlagen im Einfluss vermehrter Extremwetterereignisse und deren Instandsetzung unter Aspekten der Nachhaltigkeit und Umweltrelevanz“ , 320 S. (inklusive Anlagen)

Sebastian Bernhard Fischer, M. Sc. (2022) Abschlussbericht „Ökobilanzierung Wegedecken Sachsen-Anhalt“ im Rahmen des Projekts „Modellhafte Beurteilung der Beständigkeit von Wegebefestigungen unterschiedlicher Ausführung in historischen Parkanlagen im Einfluss vermehrter Extremwetterereignisse und deren Instandsetzung unter Aspekten der Nachhaltigkeit und Umweltrelevanz“ , 36 S.

Laboruntersuchungen an Probekörpern im Rahmen des Projekts:

**„Modellhafte Beurteilung der Beständigkeit von Wegebefestigungen
unterschiedlicher Ausführung in historischen Parkanlagen
im Einfluss vermehrter Extremwetterereignisse und deren Instandsetzung
unter Aspekten der Nachhaltigkeit und Umweltrelevanz“**

- Abschlussbericht -



Magdeburg, März 2023

Auftraggeber: Deutsche Bundesstiftung Umwelt
An der Bornau 2
49090 Osnabrück
Postfach 1705
49007 Osnabrück

Auftragnehmer: Hochschule Magdeburg-Stendal,
Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit
Professur für Verkehrswegebau
Prof. Dr.-Ing. Sascha Kayser
PF 3655
39011 Magdeburg

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Sascha Kayser

Projektbearbeitung: Linda Bromberg, M. Eng.

Projektkoordination: Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen
und Sachsen-Anhalt e. V.
Dipl.-Min. Matthias Zötzl
Domplatz 3
06108 Halle (Saale)

Datum: 27.03.2023

Prof. Dr.-Ing. S. Kayser

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	5
2. Baustoffgemische.....	7
2.1 Bitumengebundene Baustoffgemische.....	7
2.2 Kunstharzgebundene Baustoffgemische.....	10
2.3 Ungebundene Baustoffgemische	12
3. Herstellung der Probekörper.....	14
4. Untersuchungsprogramm	17
4.1 Spaltzugschwellversuche zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens und der Steifigkeitsmodule	18
4.2 Untersuchungen zur thermischen Belastung und UV-Beständigkeit der bitumen- und kunstharzgebundenen Baustoffgemische	27
4.3 Frost-Tau-Wechselversuche zur Analyse des Verwitterungs- widerstandes der Baustoffgemische	29
4.4 Stempelleindringversuche zur Beschreibung des Verformungs- verhaltens der gebundenen und ungebundenen Baustoffgemische.....	31
4.5 Erosionswiderstand gegenüber strömendem Wasser	33
4.6 Widerstand gegen steigenden Grundwasserstand.....	36
5. Ergebnisse	39
5.1 Spaltzugschwellversuche.....	39
5.1.1 Bitumengebundene Baustoffgemische.....	40
5.1.2 Kunstharzgebundene Baustoffgemische.....	45
5.1.3 Fazit.....	52
5.2 Untersuchungen zur thermischen Belastung und UV-Beständigkeit der gebundenen Baustoffgemische	56
5.2.1 Bitumengebundene Baustoffgemische.....	57
5.2.2 Kunstharzgebundene Baustoffgemische.....	60
5.3 Frost-Tau-Wechselversuche zur Analyse des Verwitterungs- widerstandes der gebundenen Baustoffgemische	63
5.3.1 Bitumengebundene Baustoffgemische.....	64
5.3.2 Kunstharzgebundene Baustoffgemische.....	66
5.4 Stempelleindringversuche zur Beschreibung des Verformungs- verhaltens der gebundenen und ungebundenen Baustoffgemische.....	69
5.4.1 Bitumengebundene Baustoffgemische.....	69

5.4.2	Kunstharzgebundene Baustoffgemische.....	72
5.4.3	Ungebundene Baustoffgemische	74
5.5	Erosionswiderstand gegenüber strömendem Wasser	78
5.5.1	Gebundene Baustoffgemische BB1, BB2, KB1, KB2, KB3.....	79
5.5.2	Ungebundenes Baustoffgemisch UB1	80
5.5.3	Ungebundenes Baustoffgemisch UB2	84
5.5.4	Ergänzende Untersuchungen zum Erosionswiderstand	87
5.5.5	Fazit.....	89
5.6	Widerstand gegen steigenden Grundwasserstand.....	90
5.6.1	Gebundene Baustoffgemische BB1, BB2, KB1, KB2, KB3.....	91
5.6.2	Ungebundenes Baustoffgemisch UB1	92
5.6.3	Ungebundenes Baustoffgemisch UB2	95
5.6.4	Fazit.....	97
6.	Zusammenfassung	98
7.	Quellenverzeichnis	101

Anlagenverzeichnis	102
Anlage 1: Datenblätter der Baustoffgemische	103
Anlage 1.1: Datenblatt Baustoffgemisch BB1	104
Anlage 1.2: Datenblatt Baustoffgemisch BB2	108
Anlage 1.3: Datenblatt Baustoffgemisch UB1	110
Anlage 1.4: Datenblatt Baustoffgemisch UB2	117
Anlage 2: Spaltzugschwellversuche zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens.....	125
Anlage 2.1: Baustoffgemisch BB1	125
Anlage 2.2: Baustoffgemisch BB2	136
Anlage 2.3: Baustoffgemisch KB1	147
Anlage 2.4: Baustoffgemisch KB2	161
Anlage 2.5: Baustoffgemisch KB3	175
Anlage 3: Spaltzugschwellversuche nach thermischer Belastung	186
Anlage 3.1: Baustoffgemisch BB1	186
Anlage 3.2: Baustoffgemisch BB2	193
Anlage 3.3: Baustoffgemisch KB1	200
Anlage 3.4: Baustoffgemisch KB2	205
Anlage 3.5: Baustoffgemisch KB3	211
Anlage 4: Spaltzugschwellversuche nach thermischer Belastung + UV-Bestrahlung ..	216
Anlage 4.1: Baustoffgemisch BB1	216
Anlage 4.2: Baustoffgemisch BB2	221
Anlage 4.3: Baustoffgemisch KB1	227
Anlage 4.4: Baustoffgemisch KB2	232
Anlage 4.5: Baustoffgemisch KB3	237
Anlage 5: Spaltzugschwellversuche nach Frost-Tau-Wechsel-Belastung	242
Anlage 5.1: Baustoffgemisch BB1	242
Anlage 5.2: Baustoffgemisch BB2	248
Anlage 5.3: Baustoffgemisch KB1	254
Anlage 5.4: Baustoffgemisch KB2	259
Anlage 5.5: Baustoffgemisch KB3	265
Anlage 6: Stempfeleindringversuche	271
Anlage 6.1: Baustoffgemisch BB1	271
Anlage 6.2: Baustoffgemisch BB2	276

Anlage 6.3: Baustoffgemisch KB1	281
Anlage 6.4: Baustoffgemisch KB2.....	286
Anlage 6.5: Baustoffgemisch KB3.....	291
Anlage 6.6: Baustoffgemisch UB1.....	296
Anlage 6.7: Baustoffgemisch UB2.....	304
Anlage 7: Erosionswiderstand gegenüber strömendem Wasser	307
Anlage 8: Widerstand gegen steigenden Grundwasserstand	311

1. Einleitung

Die Professur für Verkehrswegebau des Fachbereiches Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit der Hochschule Magdeburg-Stendal wurde mit dem Schreiben vom 13. Januar 2020 mit Laboruntersuchungen an Probekörpern im Rahmen des Projekts „Modellhafte Beurteilung der Beständigkeit von Wegebefestigungen unterschiedlicher Ausführung in historischen Parkanlagen im Einfluss vermehrter Extremwetterereignisse und deren Instandsetzung unter Aspekten der Nachhaltigkeit und Umweltrelevanz“ beauftragt. Ziel des Projekts war es, wassergebundene Wegedecken und verschiedene alternativ angebotene Materialien, wie Epoxidharzsysteme und diverse Asphaltmischungen objektiv hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit, Belastbarkeit, Denkmalverträglichkeit, der Kosten für Herstellung und Pflege und ihrer ökologischen Bilanz miteinander zu vergleichen. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf der Stabilität der verschiedenen Materialien im Zusammenhang mit Hochwasserereignissen und damit verbundenen erhöhten Grundwasserständen. Bezogen auf komplexe Fragestellungen zu Wegen in historischen Parks soll es anhand der Projektergebnisse möglich sein, für unterschiedliche, modellhafte Wegesituationen objektive Material- und Konstruktionsempfehlungen zu geben, die zum einen die denkmalpflegerischen Verpflichtungen wahren und darüber hinaus in extremen Belastungsbereichen auch eine passende Lösung darstellen.

Im Rahmen des Projekts wurden durch die Hochschule Magdeburg-Stendal insgesamt sieben unterschiedliche Baustoffgemische labortechnisch untersucht. Hierzu zählten zwei bitumengebundene, drei kunstharzgebundene sowie zwei ungebundene Baustoffgemische.

Die Laboruntersuchungen umfassten die Charakterisierung der mechanischen Leistungsfähigkeit, sowie das Widerstandsverhalten gegen hygrische Belastungen.

Es wurden folgenden Untersuchungen durchgeführt:

- Spaltzugschwellversuche zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens und der Steifigkeitsmodule der gebundenen Baustoffgemische
- Untersuchungen zur Temperatur- und UV-Beständigkeit der gebundenen Baustoffgemische
- Frost-Tau-Wechselversuche zur Analyse des Verwitterungswiderstandes der gebundenen Baustoffgemische
- Stempeleindringversuche zur Beschreibung des Verformungsverhaltens der gebundenen und ungebundenen Baustoffgemische
- Erosionswiderstand gegenüber strömendem Wasser der gebundenen und ungebundenen Baustoffgemische
- Widerstand gegenüber steigendem Grundwasserstand der gebundenen und ungebundenen Baustoffgemische

Anmerkung:

Die Maßnahmen zur Eindämmung der Coronavirus-Pandemie führten im Forschungsprojekt Wegedecken zu erheblichen Einschränkungen und Verzögerungen. Der geplante Zeithorizont mit Beginn der Projektbearbeitung durch die Hochschule Magdeburg-Stendal im April 2020 verzögerte sich aufgrund des eingeschränkten Betriebes (Lockdown im Frühjahr 2020). Die Bearbeitung startete um ein halbes Jahr verspätet mit der Einstellung einer Projektmitarbeiterin im November 2020. Durch die Beschränkungen konnten Untersuchungsmaterialien erst verspätet geliefert werden. Das letzte Untersuchungsmaterial konnte erst im Oktober 2021 beschafft werden. Aufgrund der verspäteten Lieferungen konnten die stark variierenden Eigenschaften der Materialien erst verzögert bestimmt werden. Dies führte zu einer verzögerten Ermittlung der Versuchsparameter und somit verschob sich der Beginn der Versuchsdurchführungen. Zudem kam es zu Einschränkungen der Projektmitarbeiter während des Lockdowns (Kontaktbeschränkungen durch das Hygiene Konzept der Hochschule, zeitweilige Homeoffice Pflicht, etc.).

2. Baustoffgemische

Im Rahmen des Projekts wurden insgesamt sieben unterschiedliche Baustoffgemische labor-technisch untersucht. Hierzu zählten zwei bitumengebundene Baustoffgemische, drei kunstharzgebundene Baustoffgemische sowie zwei ungebundene Baustoffgemische.

2.1 Bitumengebundene Baustoffgemische

Die zwei bitumengebundenen Baustoffe werden nachfolgend mit den Kurzbezeichnungen BB1 und BB2 bezeichnet.

Bitumengebundenes Baustoffgemisch BB1:

Das bitumengebundene Baustoffgemisch BB 1 wurde vom Hersteller angeliefert. Sämtliche Eimer entstammten der gleichen Produktionscharge. Es handelte sich um einen Walzasphalt, AC 11 DS, bestehend aus einem polymermodifizierten Bitumen 25/55 - 55 und einer Gesteinskörnung (Natursand, Rhyolith, Grauwacke, gemischt mit Asphaltgranulat 11 RA 0/8 (AC D)) mit einem Größtkorn von 11 mm, vgl. **Abb. 2.1**.



Abb. 2.1: Bitumengebundenes Baustoffgemisch BB1 [Bromberg, 2021]

Das Datenblatt des Baustoffgemisches BB1 ist **Anlage 1** zu entnehmen.

Baustoffgemisch BB2:

Das Baustoffgemisch BB2 wurde im Oktober 2021 durch die Hochschule Magdeburg-Stendal am Mischwerk in Schönebeck entgegengenommen. Alle Eimer wurden in der gleichen Produktionscharge abgefüllt. Das Baustoffgemisch BB2 bestand aus Kalkstein, Farbpigmenten, Farbpulver (gelb), Natursand, Granit (gelb) und einem Bindemittel (Mexphalt C 35/50). Die Gesteinskornmischung hatte ein Größtkorn von 8 mm, vgl. **Abb. 2.2**.



Abb. 2.2: Baustoffgemisch BB2 [Bromberg, 2021]

Das Datenblatt des Baustoffgemisches BB2 ist in **Anlage 1** enthalten.

Anmerkung: Nach Definition ist Asphalt ein Material, das Bitumen als wesentlichen Bestandteil enthält [B.J. Kerkhof, 1925]. Das Baustoffgemisch BB2 enthält jedoch kein Bitumen als Bindemittel und ist daher per Definition nicht als Asphalt zu bezeichnen. Dennoch wird im Rahmen dieses FuE-Projekts dieses Baustoffgemisches BB2 innerhalb der Baustoffgruppe „Asphalt“ geführt und somit den bitumengebundenen Baustoffen zugeordnet, da es u.a. auch in der Praxis als „farbiger Asphalt“ vermarktet wird.

Der Einbau des Baustoffgemisches BB2 konnte im Oktober 2021 in einer Parkanlage in Wolmirstedt verfolgt werden, vgl. **Abb. 2.3**.



Abb. 2.3: Einbau des Baustoffgemisches BB2 in einer Parkanlage in Wolmirstedt [Bromberg, 2021]

2.2 Kunstharzgebundene Baustoffgemische

Die drei untersuchten kunstharzgebundenen Baustoffe werden nachfolgend als KB1, KB2 und KB3 bezeichnet.

Kunstharzgebundenes Baustoffgemisch KB1:

Für das kunstharzgebundene Baustoffgemisch KB1 wurde die Gesteinskörnung in 25 kg Säcken geliefert. Zusätzlich wurde ein Zweikomponenten-Splittbinder bereitgestellt. Die Gesteinskörnung bestand aus einem Quarzkiesgemisch mit Korngrößen von 1,4 mm bis 2,3 mm, vgl. **Abb. 2.4**.



Abb. 2.4: Gesteinskörnung des kunstharzgebundenen Baustoffgemisch KB1 [Bromberg, 2021]

Kunstharzgebundenes Baustoffgemisch KB2:

Für das kunstharzgebundene Baustoffgemisch KB2 wurde die Gesteinskörnung in 25 kg Säcken an die Hochschule Magdeburg geliefert und ein Zweikomponenten-Splittbinder bereitgestellt. Als Gesteinskörnung wurde ein Basaltsplittgemisch mit Korngrößen von 1 mm bis 3 mm verwendet, vgl. **Abb. 2.5**.



Abb. 2.5: Gesteinskörnung des kunstharzgebundenen Baustoffgemisch KB2 [Bromberg, 2021]

Kunstharzgebundenes Baustoffgemisch KB3:

Das kunstharzgebundene Baustoffgemisch KB3 wurde der Hochschule Magdeburg in rechteckigen Probplatten mit den Abmaßen 320 mm x 260 mm in einer Tiefe von 60 mm und 40 mm zur Verfügung gestellt, vgl. **Abb. 2.6**. Die Gesteinskörnung bestand aus einem gelb-farbenen Granitgemisch mit Korngrößen von 3 mm bis 5 mm. Zum Binder wurden keine Angaben vom Hersteller gemacht.



Abb. 2.6: Gesteinskörnung des kunstharzgebundenen Baustoffgemisch KB3 [Bromberg, 2021]

2.3 Ungebundene Baustoffgemische

Die zwei untersuchten ungebundenen Baustoffe werden nachfolgend mit den Kurzbezeichnungen UB1 und UB2 betitelt.

Ungebundenes Baustoffgemisch UB1:

Das ungebundene Baustoffgemisch UB1 wurde der Hochschule Magdeburg in einem 1000 kg fassenden Bigbag zur Verfügung gestellt. Das Baustoffgemisch bestand aus einem Andesit und einem pflanzlich-mineralischen Binder ohne Kunstharz-, oder Zementzusätze. Das Gemisch hatte ein Größtkorn von 8 mm, vgl. **Abb. 2.7**.



Abb. 2.7: Gesteinskörnung des ungebundenen Baustoffgemisch UB1 [Bromberg, 2021]

Anlage 1 zeigt das Datenblatt für das Baustoffgemisches UB1.

Anmerkung: Da der verwendete pflanzlich-mineralische Binder keinem klassischen Bindemittel, wie Kunstharz, Bitumen oder Zement entsprach und wesentlich geringere abbindende Eigenschaften aufwies, wurde das Baustoffgemisch UB1 trotz des verwendeten Binders den ungebundenen Baustoffgemischen zugeordnet.

Ungebundenes Baustoffgemisch UB2:

Das ungebundene Baustoffgemisch UB2 wurde ebenfalls in einem 1000 kg Bigbag geliefert. Es bestand, wie UB1, aus einem Andesit mit einem Größtkorn von 8 mm, vgl. **Abb. 2.8**. UB2 beinhaltete keinen Binder.



Abb. 2.8: Gesteinskörnung des ungebundenen Baustoffgemisch UB2 [Bromberg, 2021]

Das Datenblatt für Baustoffgemisch UB2 ist **Anlage 1** zu entnehmen.

3. Herstellung der Probekörper

Für die Untersuchungen wurden Probekörper (PK) aus den bitumen- und kunstharzgebundenen Baustoffgemischen hergestellt.

Bitumengebundene Baustoffgemische BB1 und BB2:

Für die Herstellung der PK der Baustoffgemische BB1 und BB2 wurden die Asphalte in den gelieferten Eimern erwärmt und mit Hilfe des Walzsektorverdichters, vgl. **Abb. 3.1** (links), zu Platten mit den Abmaßen 320 mm x 260 mm verdichtet. Nach dem Abkühlen wurden zylindrische Probekörper mit Hilfe eines Kernbohrgeräts hergestellt, vgl. **Abb. 3.1** (rechts). Die zylindrischen Probekörper wiesen einen Durchmesser $D = 100$ mm und eine Höhe von $H = 40$ mm bzw. $H = 60$ mm auf, vgl. **Abb. 3.2**. Insgesamt wurden 83 Probekörper aus dem Baustoffgemisch BB1 und 89 Probekörper aus Baustoffgemisch BB2 hergestellt.



Abb. 3.1: Walzsektorverdichter (links), Kernbohrgerät zum Herausbohren der PK (rechts) [Bromberg, 2021]



Abb. 3.2: Probekörper der Baustoffgemische BB1 und BB2 [Bromberg, 2021]

Kunstharzgebundenes Baustoffgemisch KB1 und KB2:

Für die Herstellung der PK des kunstharzgebundenen Baustoffgemisches KB1 wurde die lose Gesteinsmischung mit Hilfe eines Zwangsrührers mit dem Zweikomponenten-Splittbinder vermischt. Dieses Gemisch wurde in dafür angefertigte Schalungsformen aus Holz- bzw. Styropor gebracht und verdichtet, vgl. **Abb. 3.3**. Nach einer Aushärtedauer von 48 Stunden wurden zylindrische Probekörper mit einem Kernbohrgerät ausgebohrt. Die Probekörper wiesen einen Durchmesser $D = 100 \text{ mm}$ und eine Probekörperhöhe von $H = 40 \text{ mm}$ bzw. $H = 60 \text{ mm}$ auf.

Aus dem Baustoff KB1 wurden insgesamt 117 Probekörper und mit KB2 insgesamt 111 Probekörper hergestellt.

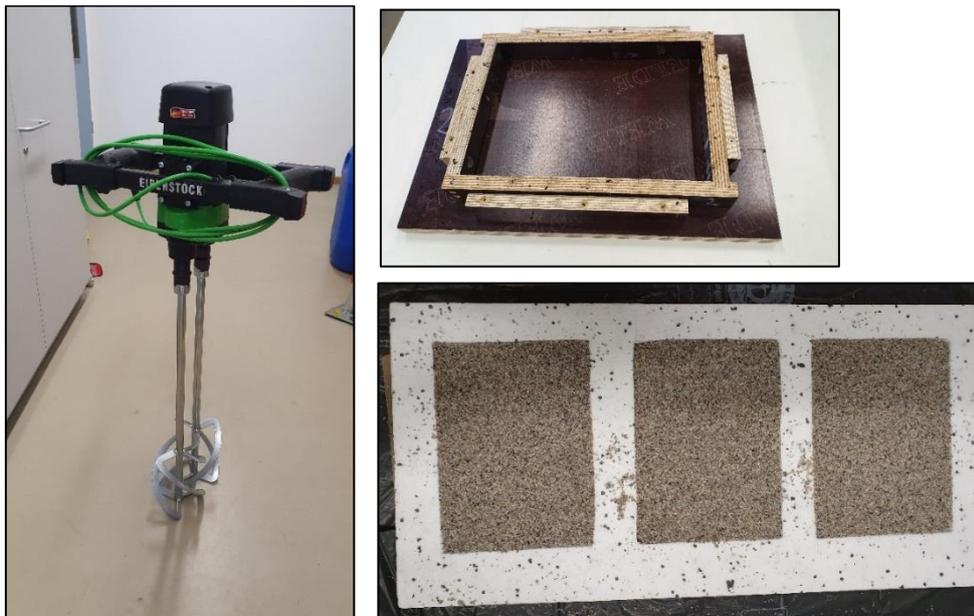


Abb. 3.3: Zwangsrührer (links), Schalungsformen aus Holz (rechts, oben) und Styropor (rechts, unten) [Bromberg, 2021]

Kunstharzgebundenes Baustoffgemisch KB3

Für das kunstharzgebundenen Baustoffgemisch KB3 wurden die zylindrischen Probekörper mit einem Probekörperdurchmesser von $D = 100 \text{ mm}$ und einer Probekörperhöhe von $H = 40 \text{ mm}$ bzw. $H = 60 \text{ mm}$ aus den gelieferten Probekörperplatten ausgebohrt. Insgesamt wurden 99 PK für das Baustoffgemisch KB3 hergestellt.

Die **Abb. 3.4.** zeigt Probekörper der drei unterschiedlichen kunstharzgebundenen Materialien.



Abb. 3.4: Probekörper der kunstharzgebundenen Baustoffgemische KB1, KB2 und KB3 [Bromberg, 2021]

4. Untersuchungsprogramm

Das Untersuchungsprogramm umfasste die Charakterisierung der mechanischen Leistungsfähigkeit und des Widerstandsverhaltens gegen hygrische Belastungen. Im Einzelnen waren dies folgende Versuche:

- Spaltzugschwellversuche zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens und der Steifigkeitsmodule der gebundenen Baustoffgemische
- Untersuchungen zur Temperatur- und UV-Beständigkeit der gebundenen Baustoffgemische
- Frost-Tau-Wechselversuche zur Analyse des Verwitterungswiderstandes der gebundenen Baustoffgemische
- Stempeleindringversuche zur Beschreibung des Verformungsverhaltens der gebundenen und ungebundenen Baustoffgemische
- Erosionswiderstand gegenüber strömendem Wasser der gebundenen und ungebundenen Baustoffgemische
- Widerstand gegenüber steigendem Grundwasserstand der gebundenen und ungebundenen Baustoffgemische

4.1 Spaltzugschwellversuche zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens und der Steifigkeitsmodule

Der Spaltzugschwellversuch ist eine Methode zur Bestimmung der Steifigkeitsmodule sowie der Ermüdungseigenschaften von Asphalt. Mit dem Versuch wird das Verhalten des Materials unter sich wiederholenden Lastzyklen simuliert. Im Spaltzugschwellversuch wird eine Asphaltprobe in einer Spannvorrichtung platziert und einer sinusförmigen Belastung ausgesetzt, die in Intensität und Frequenz variiert werden kann. Während des Tests wird die Querverformung des Materials gemessen. Die sinusförmige Druck-Schwellbelastung wird in einen zylindrischen Probekörper über zwei auf der Mantelfläche diametral gegenüberliegenden Lasteintragungsschienen eingebracht, vgl. **Abb. 4.1**.

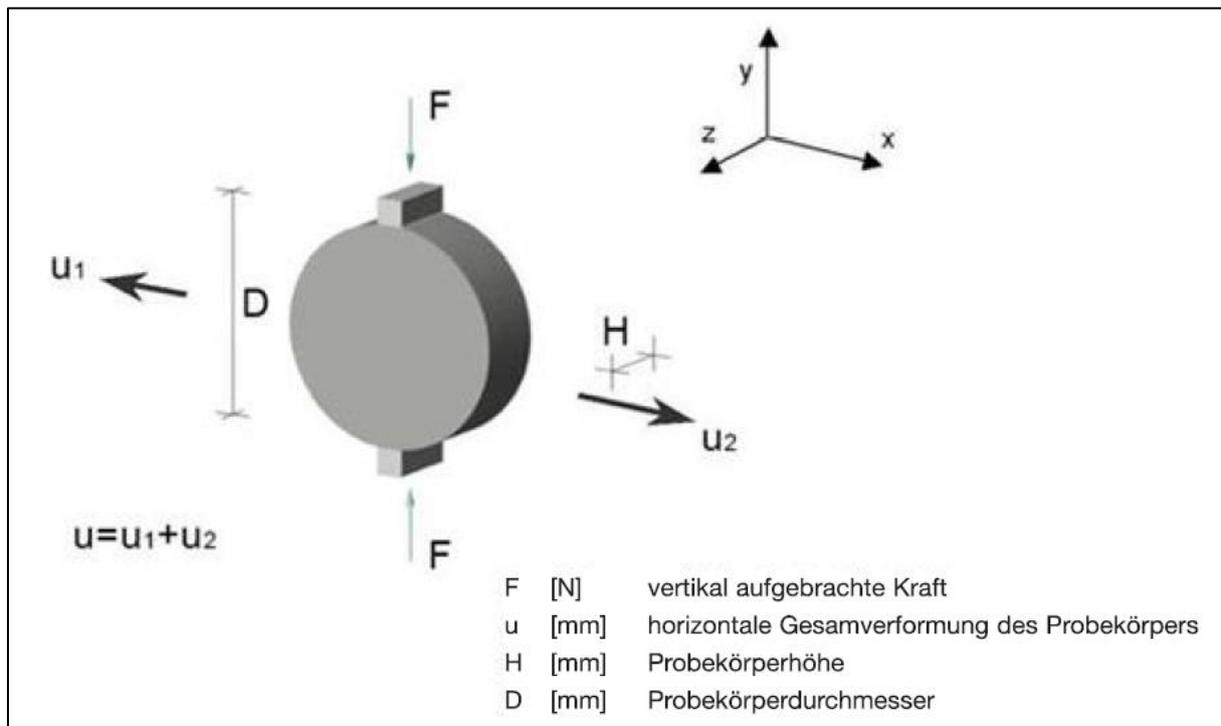


Abb. 4.1: Prinzip des Spaltzug-Schwellversuchs [TP Asphalt-StB, Teil 24]

Bei Belastung des Probekörpers wird eine vertikal gerichtete Druckspannung induziert, die über die vertikale Probekörperachse variabel ist. Daraus resultiert eine horizontal gerichtete Zugspannung, welche im mittleren Bereich der vertikalen Probekörperachse nahezu konstant ist, vgl. **Abb. 4.2**. Anhand der vertikal aufgebrachten Belastung F des Probekörpers sowie der dazugehörigen Querverformung u können die elastische Dehnung und die Steifigkeit in Probekörpermitte berechnet werden [TP Asphalt-StB, Teil 24 und Teil 26].

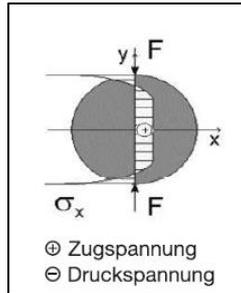


Abb. 4.2: Horizontalspannungsverlauf im Probekörper in der y-Achse [TP Asphalt-StB, Teil 24]

Abb. 4.3 zeigt das Prinzip des Spannungsverlaufes in Form einer kraftgeregelten, harmonischen Sinusschwellbelastung ohne Lastpausen. Die Belastungsfunktion muss dabei stetig verlaufen, [TP Asphalt-StB, Teil 24].

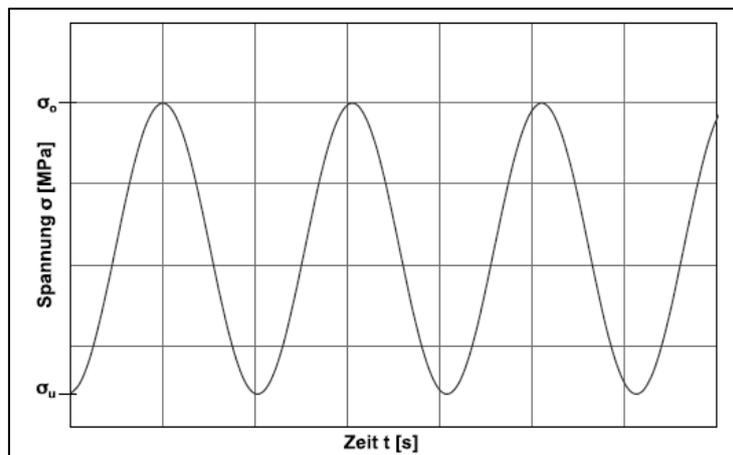


Abb. 4.3: Prinzip des Spannungsverlaufes [TP Asphalt-StB, Teil 24]

Der Steifigkeitsmodul im Spaltzugschwellversuch wird aus der gemessenen Last-Verformungs-Beziehung berechnet. Hierzu wird der Lastbereich zwischen dem linearen elastischen Bereich und dem Beginn der irreversiblen Verformung ausgewählt. Der Steigungsgrad dieser Linie wird dann als Steifigkeitsmodul bezeichnet.

Nach der Prüfvorschrift TP Asphalt-StB Teil 26 „Spaltzug-Schwellversuch – Bestimmung der Steifigkeit (2018)“ stellt sich der Zusammenhang wie folgt dar:

$$|E^*| = \frac{\Delta F}{\Delta u \cdot H} \cdot \left(\frac{4}{\pi} - 1 + \nu \right)$$

mit:

$|E^*|$ = absoluter Wert des komplexen E-Moduls (Steifigkeitsmodul)
auf 1 MPa gerundet [MPa],

ΔF = Differenz von maximaler und minimaler Kraft [N],

Δu = Differenz von maximaler und minimaler horizontaler Gesamtverformung
des Probekörpers [mm], Gl. 1

H = Probekörperhöhe [mm],

ν = Querdehnzahl/Poissonzahl [-].

Des Weiteren geht in die Berechnung die Querdehnzahl ein. Die Querdehnzahl hat einen signifikanten Einfluss auf den Steifigkeitsmodul im Spaltzugschwellversuch. Die Querdehnzahl bezieht sich auf die Querdehnung, die bei einer Belastung in Längsrichtung des Asphaltprobenstabes entsteht.

In der Praxis wird die Querdehnzahl häufig als Konstante angenommen und in den Berechnungen verwendet. Um die Steifigkeit von Asphalt unter realistischen Bedingungen besser charakterisieren zu können, wird sie laut o.g. Regelwerk wie folgt berechnet:

$$\nu = 0,15 + \frac{0,35}{1 + e^{[1,83034 - 0,07619 \cdot T]}}$$
 Gl. 2

mit:

ν = Querdehnzahl / Poissonzahl [-] auf drei Nachkommastellen,

T = Prüftemperatur [°C].

Die Querdehnzahl ist ein temperaturabhängiger Parameter. Diese kann prinzipiell während des Versuches gemessen bzw. ausgewertet werden. Dafür ist jedoch eine Messung der elastischen Verformung in vertikaler und horizontaler Richtung in Probekörpermitte erforderlich. Mit der zur Verfügung stehenden Versuchs- und Messeinrichtung ist dies jedoch derzeit nicht möglich. Daher wurde die Querdehnzahl in Anlehnung an die Prüfvorschrift nach Gleichung 2 bestimmt. Nachfolgend wird die durch die aufgebrachte Kraft im Versuch im Probekörpermittelpunkt erzeugte Dehnung berechnet. Die horizontale elastische Dehnung beim Spaltzugschwellversuch bei Asphalt bezieht sich auf die Dehnung in horizontaler Richtung (in der Ebene des Asphaltprobekörpers) im Bereich des Probekörpermittelpunkts, wenn der Probekörper wiederholt mit Lastzyklen belastet wird.

$$\varepsilon_{el} = \frac{2 \cdot \Delta u}{D} \cdot \frac{(1 + 3 \cdot \nu)}{(4 + \pi \cdot \nu - \pi)} \cdot 1000$$
 Gl. 3

mit:

ε_{el} = elastische horizontale Dehnung [%] auf vier Nachkommastellen,

D = Probekörperdurchmesser [mm],

Δu = Differenz von maximaler und minimaler horizontaler Gesamtverformung des
Probekörpers [mm],

ν = Querdehnzahl/Poissonzahl [-].

Die elastische Anfangsdehnung wird durch die Messung der Dehnung während der ersten Belastungszyklen eines Materials bestimmt, bevor es zu einer bleibenden Deformation kommt.

Diese Dehnung wird als proportionale Dehnung oder elastische Dehnung bezeichnet. Die elastische Dehnung wird berechnet, indem die Veränderung der Länge des Materials durch die ursprüngliche Länge dividiert wird. Mathematisch ausgedrückt lautet die Formel:

$$\text{elastische Dehnung} = (\text{Länge unter Last} - \text{ursprüngliche Länge}) / \text{ursprüngliche Länge} \quad \text{Gl. 4}$$

Die Länge unter Last ist die Länge des Materials unter Belastung. Die ursprüngliche Länge ist die Länge des Materials im unbelasteten Zustand.

Es ist wichtig zu beachten, dass die elastische Dehnung nur während der ersten Belastungszyklen gemessen werden kann, bevor es zu einer bleibenden Deformation des Materials kommt. Wenn das Material einer längeren Belastung ausgesetzt wird, kann es zu einer dauerhaften Verformung kommen, die als plastische Dehnung bezeichnet wird. Die plastische Dehnung kann nicht rückgängig gemacht werden und trägt daher nicht zur elastischen Anfangsdehnung bei. Die elastische Anfangsdehnung ist ein wichtiger Parameter bei der Bestimmung der Ermüdungslebensdauer von Asphalt. Sie gibt Auskunft darüber, wie gut das Material Belastungen standhalten kann, ohne dauerhaft zu verformen.

Die Spaltzugschwellversuche wurden mit einer servohydraulischen Präzisionsprüfmaschine durchgeführt, vgl. **Abb. 4.4** (links). Die Prüfmaschine mit elektronischem Kraftaufnehmer und verstellbaren elektronischen Wegaufnehmern ist für weggeregelte zyklische und statische Belastungsversuche ausgelegt und verfügt über eine Klimakammer, die eine Temperierung und Vermessung der Proben im Bereich von -80 °C bis +180 °C ermöglicht. **Abb. 4.4** zeigt die Innenkammer der Prüfmaschine (mittig) und die Wegaufnehmer der Prüfmaschine (rechts).



Abb. 4.4: Servohydraulische Präzisionsprüfmaschine (links), Innenkammer der Prüfmaschine (Mitte), Wegaufnehmer (rechts) [Bromberg, 2021]

Für die Spaltzugschwellversuche wurden aus den gebundenen Baustoffgemischen Probekörper mit den Abmessungen $D = 100 \text{ mm}$ und $H = 40 \text{ mm}$ (Größtkorn $\leq 16 \text{ mm}$) verwendet, vgl. **Tab. 4.1**.

Tab.: 4.1: Abmessungen der Probekörper in Abhängigkeit vom Durchmesser des Größtkorns [TP Asphalt-StB, Teil 24]

Durchmesser des Größtkorns	Probekörperdurchmesser D [mm]	Probekörperhöhe H [mm]
$\leq 16 \text{ mm}$	100 ± 2	40 ± 3
$> 16 \text{ bis } < 32 \text{ mm}$	150 ± 2	60 ± 3
$\geq 32 \text{ mm}$	150 ± 2	90 ± 3

Ermüdungswiderstand:

Die Versuche zur Bestimmung des Ermüdungswiderstandes erfolgten nach der Technischen Prüfvorschrift für Asphalt TP Asphalt-StB, Teil 24.

In einem Ermüdungsversuch werden die anfängliche elastische Dehnung sowie die Ermüdungswechselzahl bestimmt. Aus einer Versuchsreihe, die aus mehreren Ermüdungsversuchen besteht, lässt sich die materialspezifische Ermüdungsfunktion ermitteln, [TP Asphalt-StB, Teil 24].

Für die Aufstellung der Ermüdungsfunktion werden bei einer Prüftemperatur von 20 °C für die Durchführung mindestens 10 Probekörper benötigt. Dabei wird ein Probekörper für einen Vorversuch zur Bestimmung der Oberspannung verwendet. Die weiteren neun Probekörper dienen der Ermittlung von 3 Beanspruchungszuständen (bzw. drei Oberspannungen) mit jeweils 3 Probekörpern.

Die Oberspannung ist so festzulegen, dass die anfänglichen elastischen horizontalen Dehnungen im Probekörpermittelpunkt in einem Bereich von 0,050 ‰ bis 0,300 ‰ liegen. Die Lastaufbringung erfolgt laut TP Asphalt, Teil 24 mit einer Frequenz von 10 Hz für Asphalt.

Mit dem kunsthartzgebundenen Baustoffgemischen KB1, KB2 und KB3 wurden eine Vielzahl von Tastversuchen zur Festlegung der auf den Probekörper aufzubringenden Oberspannung durchgeführt. Da der linear elastische Bereich in den Vorversuchen der Ermüdungsfunktion für Asphalt ausgelegt ist, führten die Vorversuche mit dem kunsthartzgebundenen Baustoffgemisch KB1, KB2 und KB3 zu keinem auswertbaren Ergebnis. Weiterführend wurden daher Tastversuche für unterschiedliche Oberspannungen durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass das Material einen Quasi-Dauerfestigkeitsbereich aufweist, vgl. **Abb. 4.5**. Daher kommt es bis zum Auftreten der Belastungsgrenze zu nahezu keinen Erscheinungen der Materialermüdung oder anderen Ausfallerscheinungen. Darüber hinaus führt eine Frequenz der Lastaufbringung von 10 Hz bei den kunsthartzgebundenen Baustoffgemischen zu Schwingungen des Probekörpers.

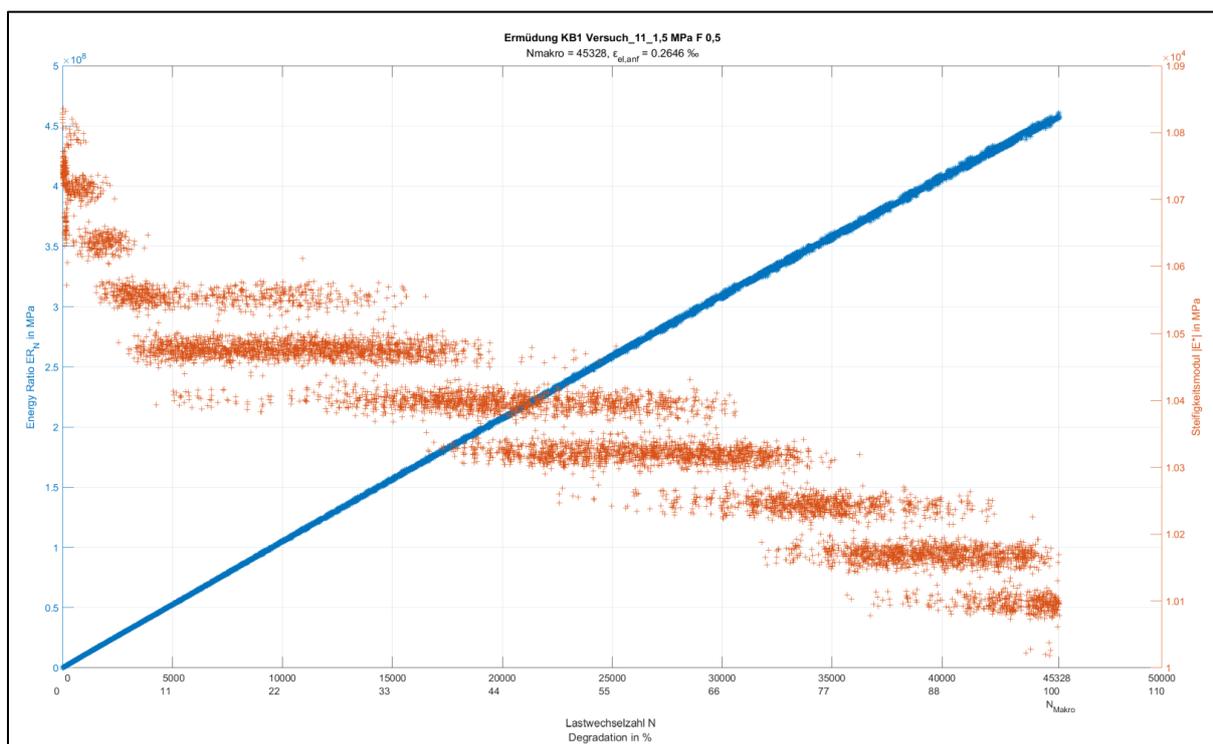


Abb. 4.5: Exemplarische Darstellung eines Versuchs mit dem Baustoffgemisch KB1 im Quasi-Dauerfestigkeitsbereich

Anhand der durch die Tastversuche gewonnenen Erkenntnisse wurde die Frequenz auf 0,5 Hz herabgesetzt und der Spaltzugschwellversuch erneut bei einer Temperatur von 20 °C und

Oberspannungen von 1,2 MPa bis 1,9 MPa durchgeführt. Die Tastversuche zum Ermüdungsverhalten der kunstharzgebundenen Baustoffgemische nahmen somit einen Großteil der labortechnischen Versuchszeit in Anspruch.

Die ersten Tastversuche mit den bitumengebundenen Baustoffgemischen BB1 und BB2 wurden nach der Technischen Prüfvorschriften für Asphalt TP Asphalt-StB Teil 24 mit einer Frequenz von 10 Hz durchgeführt. Auf Grundlage der Erkenntnisse aus den Tastversuchen der kunstharzgebundenen Baustoffe und um eine Vergleichbarkeit der Materialien zu gewährleisten, wurde die Frequenz ebenfalls auf 0,5 Hz herabgesetzt und eine Temperatur von 20 °C verwendet. Dabei wurde eine Oberspannung im Bereich zwischen 0,3 und 0,7 MPa ermittelt.

Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktion

Der Steifigkeitsmodul ist ein Maß für die Steifigkeit eines Baustoffes. Er gibt an, wie sich der Baustoff unter Belastung verhält. Der Steifigkeitsmodul kann bei bestimmten Baustoffen temperatur- und frequenzabhängig sein. Je höher der Steifigkeitsmodul eines Baustoffs ist, desto widerstandsfähiger ist er gegenüber Verformungen. Die Versuche zur Bestimmung der Steifigkeit erfolgten nach der Technischen Prüfvorschrift für Asphalt TP Asphalt-StB, Teil 26.

Anhand der vertikal aufgebrauchten Belastung F des Probekörpers sowie der dazugehörigen Querverformung kann die Steifigkeit berechnet werden. Aus einer Versuchsreihe, die aus mehreren Einzelversuchen besteht, lassen sich die Hauptkurve sowie die Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktion berechnen. Die Bestimmung erfolgt bei verschiedenen Prüftemperaturen anhand von Multistage-Versuchen mit Variation der Prüffrequenz [TP Asphalt-StB, Teil 26]. Die Prüftemperaturen wurden auf 0 °C, 10 °C und 20 °C festgelegt, die Prüffrequenzen auf 0,1 Hz, 0,3 Hz und 1,0 Hz.

Die Auswertung der Lastwechsel für die elastische Anfangsdehnung erfolgte unter Beachtung der Prüffrequenz, vgl. **Tab. 4.2**.

Tab.: 4.2: Ausgewertete Lastwechsel unter Berücksichtigung der Prüffrequenz [TP Asphalt-StB, Teil 26]

Belastungsfrequenz f [Hz]	Lastwechselzahl N [-]	Auswertung der Lastwechsel
10,0	110	98 bis 102
5,0	100	93 bis 97
3,0	50	43 bis 47
1,0	20	13 bis 17
0,3	15	8 bis 12
0,1	10	3 bis 7

Für die Bestimmung der Steifigkeitsmodule für die drei Temperaturen werden mindestens 12 Prüfkörper benötigt, d.h. vier Probekörper je Temperatur. Dabei werden drei Probekörper für jeweils einen Vorversuch zur Bestimmung der Oberspannung je Temperatur verwendet und weitere neun Probekörper für eine dreifach Belegung je Temperatur.

Die Oberspannung ist dabei so festzulegen, dass die anfänglichen elastischen horizontalen Dehnungen im Probekörpermittelpunkt in einem Bereich von 0,050 ‰ bis 0,100 ‰ liegen.

Abb. 4.6 zeigt hierzu einen in die Prüfmaschine eingebauten Probekörper.



Abb. 4.6: Servohydraulische Präzisionsprüfmaschine mit eingebautem Probekörper [Bromberg, 2021]

4.2 Untersuchungen zur thermischen Belastung und UV-Beständigkeit der bitumen- und kunstharzgebundenen Baustoffgemische

Thermische Belastung:

Bei hohen Temperaturen kann es bei gebundenen Baustoffen wie Asphalt zum Erweichen des Bindemittels kommen, was zu Verformungen und Rissen führen kann. Außerdem können hohe Temperaturen zur Oxidation führen, was zu einer Verhärtung des Bindemittels und zu einer Verringerung der Elastizität führen kann. Daher kann der gebundene Baustoff spröde und rissanfälliger werden. Durch die Verdampfung von flüchtigen Bestandteilen kann die Härte und Zähigkeit gebundener Baustoffe beeinträchtigt werden (Gong et al., 2022).

Um die thermische Belastbarkeit der bitumen- und kunstharzgebundenen Baustoffgemische zu untersuchen, wurden diese Baustoffe für eine Dauer von 168 Stunden (7 Tage) durchgehend bei einer Temperatur von 70 °C in einem Wärmeschrank gelagert, vgl. **Abb. 4.7**. Die im Rahmen dieses FuE-Projektes angewendete Verfahrensweise zur Beurteilung der thermischen Belastbarkeit diente somit nicht dazu die Alterungsprozesse realitätsnah zu simulieren, sondern die Auswirkungen thermischer Einflüsse auf die mechanischen Eigenschaften der unterschiedlichen Baustoffgemische vergleichend beurteilen zu können.



Abb. 4.7: Wärmeschrank mit Probekörpern [Bromberg, 2021]

UV-Beständigkeit:

UV-Strahlung kann dazu führen, dass das Bindemittel im Asphalt altert und zerfällt, was die Haltbarkeit des Asphalts beeinträchtigt. UV-Strahlung wirkt direkt auf das Bindemittel und verursacht eine oxidative Zersetzung. Dies führt dazu, dass das Bindemittel spröde werden kann und seine Fähigkeit zur Bindung der Gesteinskörnung verringert wird (Yu et al., 2019).

In den Versuchen wurde die UV-Bestrahlung mit einer HQI-Metallhalogendampflampe mit 600 W durchgeführt. Hierfür wurden die Probekörper über einen Zeitraum von 30 Tagen einer Bestrahlungsstärke von rd. 450 W/m² ausgesetzt, vgl. **Abb. 4.8**.



Abb. 4.8: Probekörper unter Metallhalogendampflampe [Bromberg, 2021]

Die Bestrahlungsstärke wurde mit Hilfe eines Pyranometers (Strahlungsmesser) eingestellt und regelmäßig überprüft. Die Stärke der erforderlichen (praxisrelevanten) Bestrahlung wurde dem „Photovoltaic Geographical Information System“ kurz PVGIS entnommen. In **Abb. 4.9** sind die gemittelten Werte in der Region Sachsen-Anhalt grafisch in einem Diagramm unter Berücksichtigung der jeweiligen Tageslängen im Monat dargestellt.

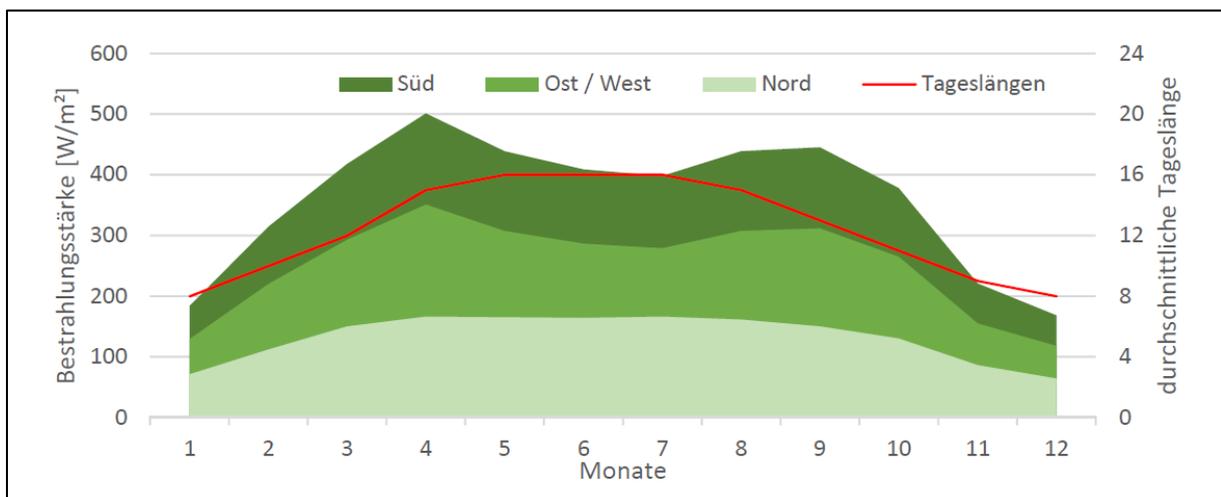


Abb. 4.9: Monatliche Bestrahlungsdaten in Abhängigkeit zur Himmelsrichtung [Schlicht, 2019]

4.3 Frost-Tau-Wechselversuche zur Analyse des Verwitterungswiderstandes der Baustoffgemische

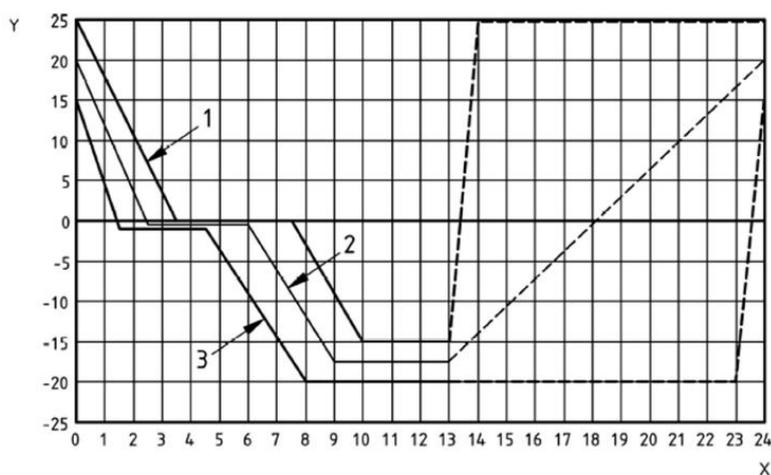
Eine der Hauptwirkungen von Frost-Tau-Wechseln auf gebundene Baustoffe wie Asphalt ist die Schädigung der Bindemittel, die das Gesteinsmaterial im Asphalt zusammenhalten. Wenn Wasser in die Poren des Asphalts eindringt und dann gefriert, erweitert es sich und das Bindemittel kann auseinanderbrechen. Wenn das Eis dann wieder schmilzt, bleibt eine Lücke im Bindemittel, die zur Erosion des Asphalts beitragen kann. Frost-Tau-Wechsel können zudem zu Rissen im Asphalt führen. Wenn Wasser in den Asphalt eindringt und gefriert, kann es das Gesteinsmaterial unter Druck setzen und somit zu Rissen führen. Ein weiterer Effekt von Frost-Tau-Wechseln auf Asphalt ist die Erhöhung der Ermüdungserscheinungen (Teltayev, 2019). Um diese Erscheinungen zu untersuchen, wurden die bitumen-, und kunstharzgebundenen Baustoffe nach Frost-Tau-wechseln hinsichtlich ihres Ermüdungsverhalten untersucht.

Für die Frost-Tau-Wechselversuche wurden die Probekörper in Anlehnung an das Prüfverfahren der DIN EN 1367-1 „*Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung des Widerstandes gegen Frost-Tau-Wechsel mit Ergänzungen zur Prüfung von Baustoffgemischen*“ untersucht. Hierfür wurden die Probekörper gewaschen, von anheftenden Teilchen befreit und anschließend bis zur Massekonstanz bei $110\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ getrocknet. Nach dem Abkühlen auf Raumtemperatur wurden die einzelnen Probekörper gewogen. Vor der Versuchsdurchführung wurden die Probekörper über 24 h in destilliertem Wasser getränkt und anschließend in einen Frost-Tau-Schrank gesetzt, vgl. **Abb. 4.10**. Der Frosttauwechselversuch wurde insgesamt über 10 Frost-Tau-Zyklen mit jeweils 24 Stunden mit einem Temperaturverlauf wie in **Abb. 4.11** dargestellt, gefahren.

Anmerkung: Aufgrund der Materialeigenschaften der ungebundenen Baustoffe und der geforderten Probekörpergeometrien für die Frost-Tau-Wechselversuche konnten die vergleichenden Frost-Tau-Wechsel-Versuche für die ungebundenen Materialien nicht durchgeführt werden. Als Ausgleich erwiesen sich die Stempel Eindringversuche für das ungebundene Material mit unterschiedlichen Wassergehalten als praktikabel. Zudem wurde der Versuchsumfang der Versuche zu den hygrischen Belastungen für die ungebundenen Baustoffe aufgestockt.



Abb. 4.10: Frost-Tau-Wechsel-Gerät Slabtester (links), Probekörper im Slabtester (rechts) [Bromberg, 2021]



- Legende**
- 1 obere Grenze
 - 2 Regelwert
 - 3 untere Grenze
 - X Zeit, Stunden
 - Y Temperatur, °C

Abb. 4.11: Temperaturverlauf während Frost-Tau-Wechsel [DIN EN 1367 -1]

4.4 Stempelindringversuche zur Beschreibung des Verformungsverhaltens der gebundenen und ungebundenen Baustoffgemische

Die Stempelindringversuche dienen der Beurteilung des bleibenden Verformungsverhaltens der Materialien. Dabei wurden die bitumen-, kunstharzgebundenen und ungebundene Baustoffgemische untersucht. Für die Stempelindringversuche wurde der Versuchsablauf der TP Asphalt-StB, Teil 25 A2: „Dynamischer Stempelindringversuch an Walzasphalt“ adaptiert angewandt. Die Stempelindringversuche zeigen somit den Widerstand des Materials gegen bleibende Verformungen. **Abb. 4.12** (links) zeigt die Servohydraulische Präzisionsprüfmaschine mit adaptiertem Stempel und Probekörper. Im dynamischen Stempelindringversuch wird ein Probekörper einer haversine-impulsförmigen Druck-Schwellbelastung ausgesetzt, vgl. **Abb. 4.12** (rechts).

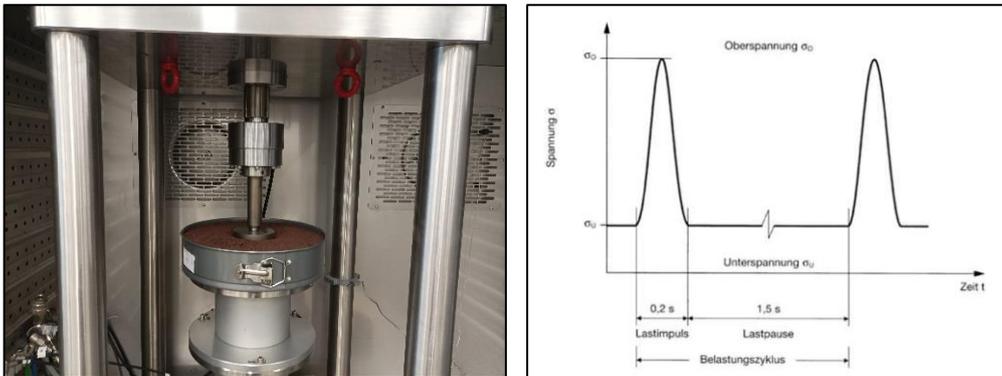


Abb. 4.12: Prüfmaschine mit adaptierter Stempelvorrichtung (links, Bromberg 2022) Prinzip des Spannungsverlaufes während Impulsbelastung (rechts) [TP Asphalt, Teil 25 A2]

Für die im Rahmen des Projekts verwendeten Materialien wurde der Versuchsablauf adaptiert und die aufgebrachte Oberlast bei einer dynamischen Eindringtiefe von $ET_{\text{dyn}} = 1 \text{ mm}$ ausgewertet. Die Versuche wurden bei zwei unterschiedlichen Prüftemperaturen von 20°C und 50°C durchgeführt.

Neben den Untersuchungen zur Temperaturabhängigkeit des Widerstandes gegenüber bleibenden Verformungen der sieben Baustoffgemische, wurden ergänzend Stempelindringversuche durchgeführt, um das Verformungsverhalten des ungebundenen Baustoffgemisches UB1 nach Wasseraufbringung zu untersuchen. Um das Verformungsverhalten des Baustoffgemisches nach der Zugabe von Wasser zu untersuchen, war es erforderlich, das Material in eine haltende Form zu bringen, vgl. **Abb. 4.13**. Ohne eine solche Form wäre das Baustoffgemisch aufgrund seiner Struktur nach der Zugabe von Wasser zerfallen und eine Analyse des Verformungsverhaltens nicht realisierbar. Für diesen Zweck wurde eine Metallform mit einem vergrößerten Durchmesser von 2700 mm gewählt, um einen Einfluss der Randwandung auf das Verformungsverhalten auszuschließen bzw. zu minimieren. Durch die Verwendung dieser

Form konnte das Baustoffgemisch unter kontrollierten Bedingungen befeuchtet und seine Verformung unter verschiedenen Bedingungen gemessen werden. Diese Versuche wurden bei einer Prüftemperatur von 20°C durchgeführt.



Abb. 4.13: Probekörper in Metallform für Versuche mit Wasserzugabe [Bromberg, 2022]

Anmerkung: Die Stempeleindringversuche nach TP Asphalt, Teil 25 A2 sind für Walzasphalte ausgelegt. Um die Versuche für alle Baustoffgemische durchführen zu können, wurde der Versuchsablauf adaptiert. So wurde nicht die dynamische Eindringtiefe nach 10 000 Belastungszyklen ausgewertet, sondern die Kraftaufbringung bei einer festgelegten dynamischen Eindringtiefe von 1 mm bzw. 10 mm. Der adaptierte Versuchsablauf wird nachfolgend als Stempeleindringversuch bezeichnet.

4.5 Erosionswiderstand gegenüber strömendem Wasser

Für die Versuche zum Erosionswiderstand gegenüber strömendem Wasser wurde das Material in eine hydraulische Kipprinne mit Wasser- und Sedimentkreislauf eingebaut. Die Kipprinne besaß eine Gesamtlänge von rd. 10 m und eine Breite von rd. 0,30 m, vgl. **Abb. 4.14**. Die Rinne verfügte über eine Sohle aus Edelstahl und Seitenwänden aus Glas. Im oberen Bereich der Rinne befanden sich Metallschienen, auf denen ein Messschlitten mit Auflagerrollen angebracht wurde. Das Wasser wurde mit einer Pumpe der Firma KSB im Kreislauf gefördert. Der gewünschte Durchfluss wurde mit Hilfe eines Schiebers sowie durch einen Frequenzumrichter zur Anpassung der Drehzahl der Pumpe eingestellt. Anhand eines magnetisch-induktiven Durchflussmessers (MID) an der Rohrleitung wurde der Durchfluss überprüft.

Für die Versuche wurden aus den Baustoffgemischen Platten mit den Abmaßen 32 cm x 26 cm und einer Höhe von $H = 4$ cm hergestellt. Für die ungebundenen Baustoffgemische UB1 und UB2 wurden die Probekörper mit Hilfe des Walzsektorverdichters gefertigt. Die Platten der ungebundenen Materialien wurden über 14 Tage bei Raumtemperatur getrocknet, vgl. **Abb. 4.15** (links), und später für den Versuch in die hydraulische Rinne eingebaut. Als Unterschicht wurde, wie im Wegedeckenbau üblich, eine Frostschutzschicht der Korngruppe 0/32 verwendet, vgl. **Abb. 4.15** (rechts). Die Probekörper wurden seitlich mit Hilfe von Faserbetonplatten befestigt, da Wegedecken auch im Wegebau befestigt eingebaut werden. Die **Abb. 4.15** (unten) zeigt exemplarisch den Versuchsaufbau in der Frontansicht. Die Probekörper wurden bei einer Wassertiefe von $H = 10$ cm mit drei unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten überströmt.

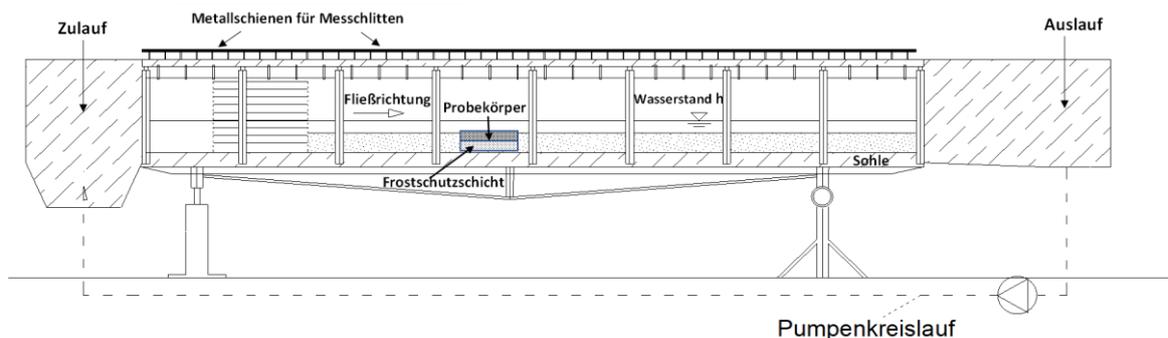


Abb. 4.14: Technische Skizze der hydraulischen Rinne der Hochschule Magdeburg-Stendal [Orlik, 2022, verändert]

Um die bei einem Hochwasserereignis auf dem Vorland vorherrschenden Fließgeschwindigkeiten festzulegen, wurde exemplarisch das Elbehochwasser aus dem Jahr 2013 verwendet. Die auf dem Vorland ermittelten Fließgeschwindigkeiten betragen zwischen 0 m/s bis rd. 0,6 m/s [Ettmer et al., 2019]. Für den Versuch wurden folgende drei Fließgeschwindigkeiten untersucht: $v_1 = 0,3$ m/s, $v_2 = 0,4$ m/s, $v_3 = 0,6$ m/s. Fließgeschwindigkeiten $v > 0,6$ m/s treten auf den Vorländern der Elbe bei Hochwasser i.d.R. selten auf, da die Fließgeschwindigkeiten

durch vorherrschende Rauheiten (Bewuchs, Bebauung) verringert werden. In Flussmitte der Elbe kann die Fließgeschwindigkeit bei Hochwasser dagegen auf bis zu $v \geq 1,5$ m/s ansteigen.

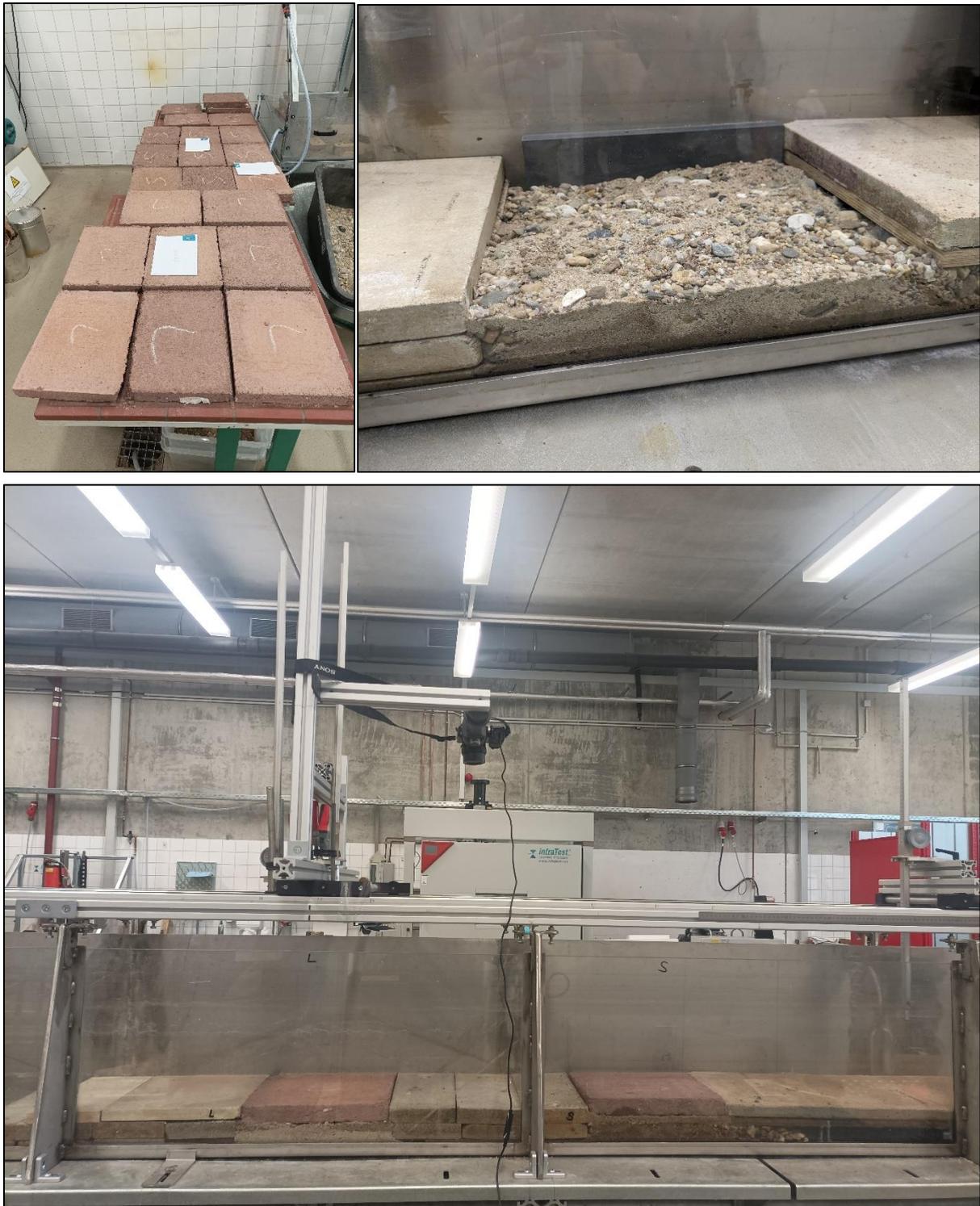


Abb. 4.15: Probplatten aus den Baustoffgemischen UB1 und UB2 (oben, links), Frostschuttschicht (oben, rechts), Versuchsaufbau (unten) [Bromberg, 2022]

Die Versuche wurden mit einer 3-fach-Belegung über eine Dauer von jeweils $t = 120$ h (5 Tage) durchgeführt. Mit Hilfe von Stechpegeln wurde die Erosionstiefe des Materials an 3 Punkten mittig der Probekörper in Längsrichtung erfasst, vgl. **Abb. 4.16**. Stechpegel werden im wasserbaulichen Versuchswesen üblicherweise für einfache Wasserstandsmessungen verwendet. Hierfür wird der Messpegel über eine drehbare Mechanik vertikal bewegt bis dieser die Wasseroberfläche berührt. Mit Stechpegeln können Höhendifferenzen mit einer Genauigkeit im Zehntelmillimeterbereich erfasst werden. Für die im Rahmen des Projekts durchgeführten Versuche wurde auf diese Weise die Höhe bzw. die Erosionstiefe der Probekörper ermittelt.



Abb. 4.16: Stechpegel (links), Stechpegel-Anordnung im Versuchsaufbau (rechts) [Bromberg, 2022]

Zusätzlich wurde in weiteren Strömungsversuchen überprüft, inwieweit sich eine oberflächliche Beschädigung (bzw. initiale Störung) der Probekörper auf den Erosionswiderstand gegenüber strömendem Wasser auswirkt. Hierfür wurden die Probekörper nach der oben beschriebenen Versuchsdauer von $t = 120$ h mittels eines spitzen Gegenstandes vorgeschädigt und anschließend einer Strömungsgeschwindigkeit von $v = 0,6$ m/s über eine Dauer von $t = 48$ h ausgesetzt, vgl. **Abb. 4.17**.

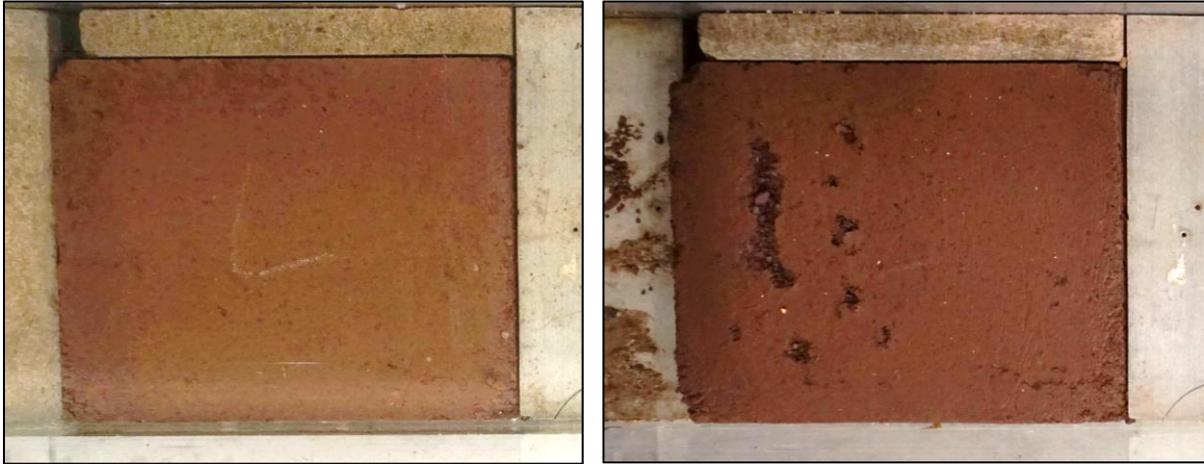


Abb. 4.17: UB 2 ohne Beschädigung (links), mit vorsätzlicher Beschädigung (rechts) [Bromberg, 2022]

Zudem wurden exemplarisch Extremversuche mit starkem Strömungsangriff ohne befestigten Einbau durchgeführt. Alle Versuche wurden fotografisch dokumentiert. Hierfür wurde eine Kamera an der Rinne befestigt und der Versuchsablauf über eine Zeitrafferfunktion aufgenommen. Des Weiteren wurden Videos der Versuchsdurchführung erstellt, die ergänzend zu diesem Bericht digital zur Verfügung gestellt werden. Die Videodokumentation ist der digitalen **Anlage D7** zu entnehmen.

4.6 Widerstand gegen steigenden Grundwasserstand

Um das Verhalten der Baustoffgemische gegenüber Hochwassersituationen und steigendem Grundwasser einschätzen zu können, wurden zunächst Vorversuche für die Materialien UB1 und UB2 durchgeführt. Hierfür wurden zylindrische Probekörper mit Hilfe eines Marshall-Hammers hergestellt. Die Probekörper wurden über 14 Tage bei Raumtemperatur getrocknet und anschließend über eine Zeitspanne von 120 Stunden (5 Tage) in mit Wasser gefüllte Boxen gelegt. Die Wassertiefe in den Boxen betrug $H = \text{rd. } 2 \text{ cm}$. Die Vorversuche wurden fotografisch dokumentiert. Exemplarisch ist in **Abb. 4.18** das Material UB2 zu den Zeitpunkten $t = 0 \text{ h}$ und $t = 120 \text{ h}$ (5 Tage) abgebildet. Die vollständige Fotodokumentation der Vorversuche ist **Anlage 8** zu entnehmen.

Auf Grundlage der Vorversuche wurde anschließend das Untersuchungsprogramm für die Versuche zum Widerstand gegenüber Hochwassersituationen mit langsam ansteigendem Grundwasserstand aufgestellt. Dazu wurden aus den Baustoffen Platten mit den Abmaßen $32 \text{ cm} \times 26 \text{ cm}$ und einer Höhe von $H = 4 \text{ cm}$ hergestellt, vgl. **Kap. 4.5**. Anschließend wurden sie in eine hydraulische Rinne eingebaut, vgl. **Abb. 4.19**.

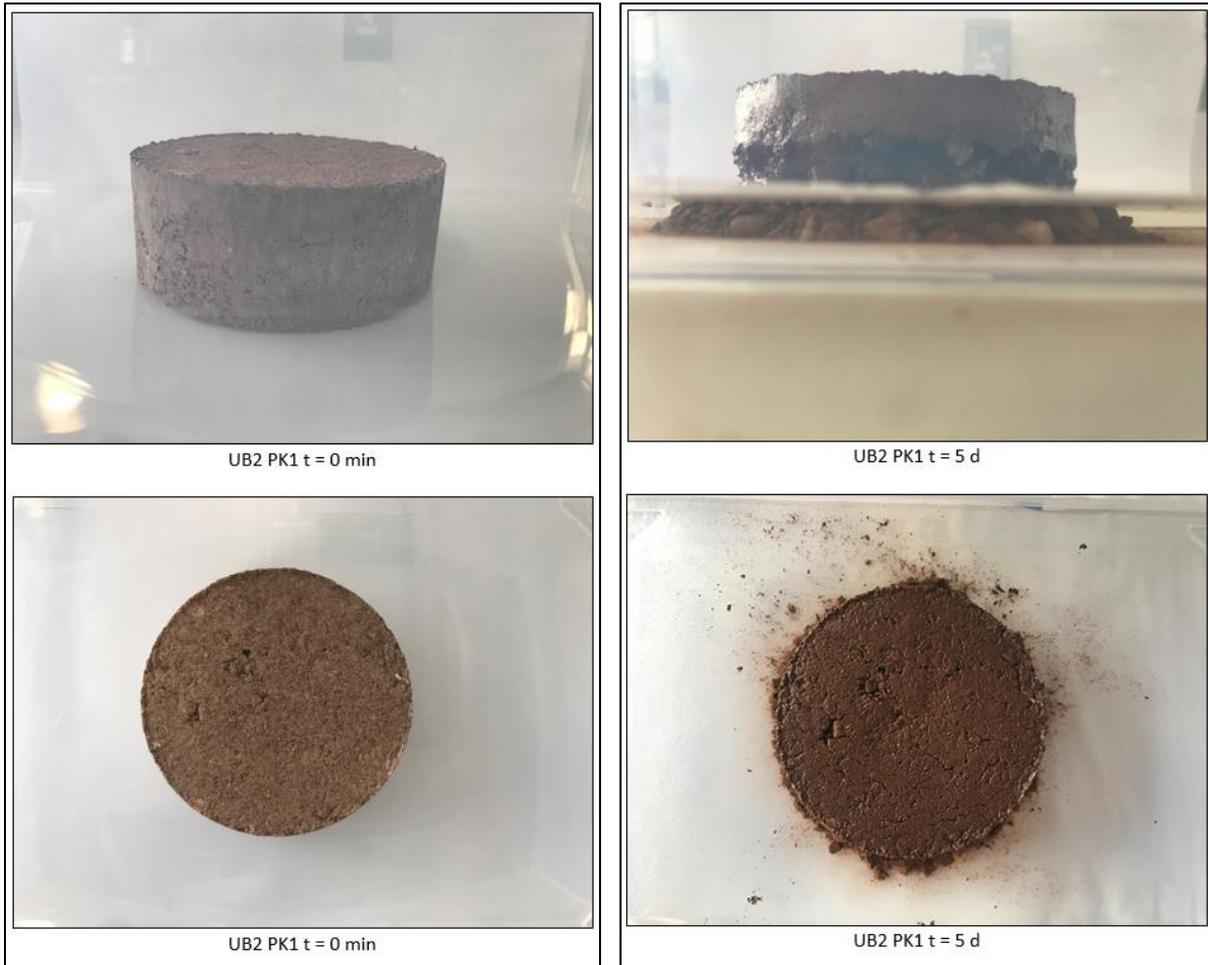


Abb. 4.18: Vorversuch UB2 zum Zeitpunkt $t = 0$ h (links) und $t = 120$ h (rechts) [Bromberg, 2022]



Abb. 4.19: Anordnung der Probekörper der Baustoffgemische UB1 und UB2 im Versuchsaufbau [Bromberg, 2022]

Um einen langsamen ansteigenden Grundwasserspiegel in den Versuchen nachzubilden, wurden fünf Wassertiefen $H = 1\text{ cm}$ bis $H = 5\text{ cm}$ ausgehend von der Probekörperunterkante untersucht. Die eingestellte Wassertiefe wurde für jeweils eine Dauer von 24 h beibehalten und schrittweise um 1 cm erhöht. Bei einer Wassertiefe von $H = 5\text{ cm}$ war der Probekörper um 1 cm mit Wasser überstaut, vgl. **Abb. 4.20**.

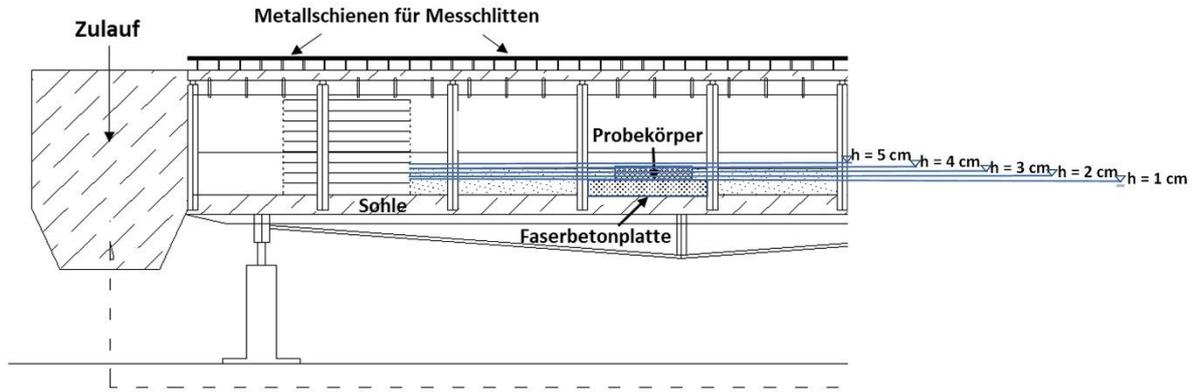


Abb. 4.20: Technische Skizze der hydraulischen Rinne mit Wassertiefen [Orlik, 2022, verändert]

Die Versuche wurden mit einer 3-fach-Belegung über eine Dauer von insgesamt $t = 120\text{ h}$ (5 Tage) durchgeführt. Mit Hilfe von Stechpegeln wurde die Probekörperhöhe an 3 Punkten längs der Probekörper ermittelt, um ein mögliches Absacken oder sonstige Verformungen der Probekörper zu erfassen, vgl. **Abb. 4.21**.



Abb. 4.21: Stechpegel Messpunkte am Probekörper [Bromberg, 2022]

Auch die Versuche zum Widerstand gegenüber Hochwassersituationen wurden fotografisch dokumentiert und u.a. mit einer Zeitrafferfunktion aufgenommen. Die Zeitraffer-Videos der Versuchsdurchführung werden ergänzend digital zur Verfügung gestellt. Die Videodokumentation ist in **Anlage D8** enthalten.

5. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen sind im nachfolgenden Kapitel für die einzelnen Laboruntersuchungen aufgeführt. Für jede labortechnische Analyse werden die Ergebnisse der untersuchten Baustoffgemische nacheinander dargestellt. Am Ende jeder Versuchsreihe befindet sich eine kurze Zusammenfassung der Ergebnisse in Form eines Fazits. Das Fazit gibt einen Überblick über die wichtigsten Ergebnisse und enthält Schlussfolgerungen, die aus der jeweiligen Versuchsreihe gezogen werden konnten.

5.1 Spaltzugschwellversuche

Die Spaltzugschwellversuche wurden durchgeführt, um den Ermüdungswiderstand und die Steifigkeitsmoduln der Baustoffgemische zu bestimmen. Anschließend wurden die Ergebnisse für die einzelnen Materialien im unbelasteten Zustand in Tabellen und Grafiken dargestellt. Zur weiteren Dokumentation wurden die Spaltzugschwellversuche und das Ermüdungsverhalten der Materialien in Zeitraffervideos aufgezeichnet, die in der digitalen **Anlage D2** zu finden sind.

Anmerkung:

Der Versuchsaufbau und -ablauf der Technischen Prüfvorschriften für Asphalt TP Asphalt-StB Teil 24 ist für Asphaltgemische ausgelegt. Um eine Vergleichbarkeit zwischen den unterschiedlich gebundenen Baustoffen zu ermöglichen, wurde dieses Verfahren für kunststoffgebundene Baugemische adaptiert. Daher wurde zunächst die mechanische Leistungsfähigkeit des bitumengebundenen Baustoffgemisches BB1 und des kunstharzgebundenen Baustoffgemisches KB2 in Tastversuchen verglichen. Auf Grundlage dieser Tastversuche wurden Erkenntnisse zur Übertragung von Spaltzugschwellversuchen auf kunstharzgebundene Baugemische abgeleitet.

Aufgrund technischer Einschränkungen hinsichtlich der Aufnahmedauer der Kamera wurden die Probekörper für die Videodokumentation mit einer größeren Oberspannung belastet als in den Versuchen, die der Ergebnisauswertung zu Grunde liegen. Die in der Videodokumentation zu erkennenden Muster des Ermüdungsverhaltens bestätigten dabei noch einmal zusätzlich die Erkenntnisse, die aus den Projektversuchen gewonnen wurden.

5.1.1 Bitumengebundene Baustoffgemische

Bitumengebundenes Baustoffgemisch BB1

Die Ergebnisse der Versuche zum Ermüdungsverhalten des bitumengebundenen Baustoffgemisches BB1 sind in **Abb. 5.1** dargestellt. Eine tabellarische Übersicht der Ergebnisse sowie die einzelnen Prüfprotokolle sind der **Anlage 2** zu entnehmen.

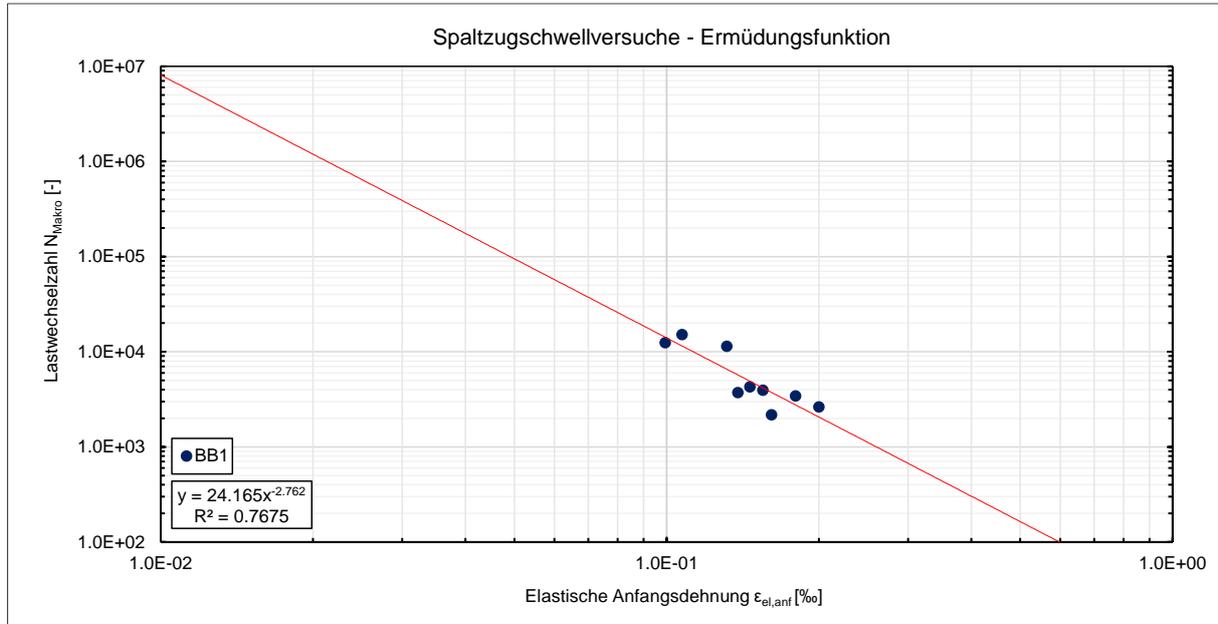


Abb. 5.1: Ermüdungsfunktion für das Baustoffgemisch BB1

Zudem wurde das Ermüdungsverhalten des Materials BB1 mit einem Video dokumentiert, vgl. digitale **Anlage D2**. Die **Abb. 5.2** zeigt exemplarisch 3 Bilder dieses Videos. Zuerkennen ist, dass sich der Probekörper zunächst leicht horizontal verformt (Bild oben links), es anschließend zu einer Rissbildung (Bild oben rechts) und letztlich zum Bruch des Probekörpers kommt (Bild unten). Infolge des dynamischen Lasteintrags entstehen wechselnde Beanspruchungen im Asphalt. Durch die wiederholenden Spannungsänderungen entsteht eine Ermüdung des Baustoffes. Die Folge der Ermüdung ist die Entstehung eines Risses bzw. Bruches.

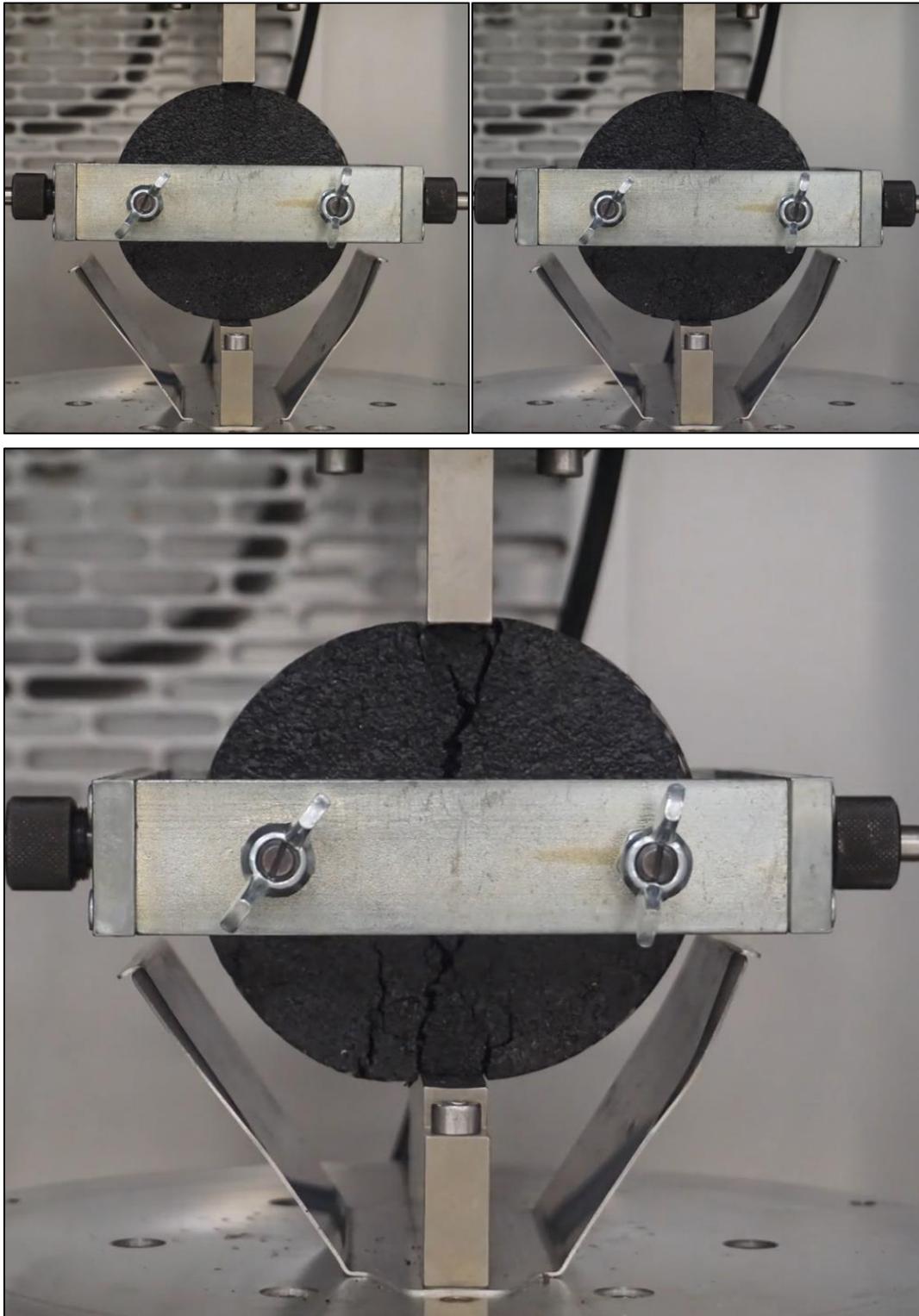


Abb. 5.2: Ermüdungsverhalten des Baustoffgemisches BB1 [Bromberg, 2022]

Für die Versuche zur Bestimmung der Steifigkeitsmoduln sind die ermittelten Werte in **Abb. 5.3** dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Steifigkeitsmodule für das Baustoffgemisch BB1 mit zunehmender Temperatur und kleiner werdender Frequenz – wie für bitumengebundene Baustoffe typisch - abnehmen.

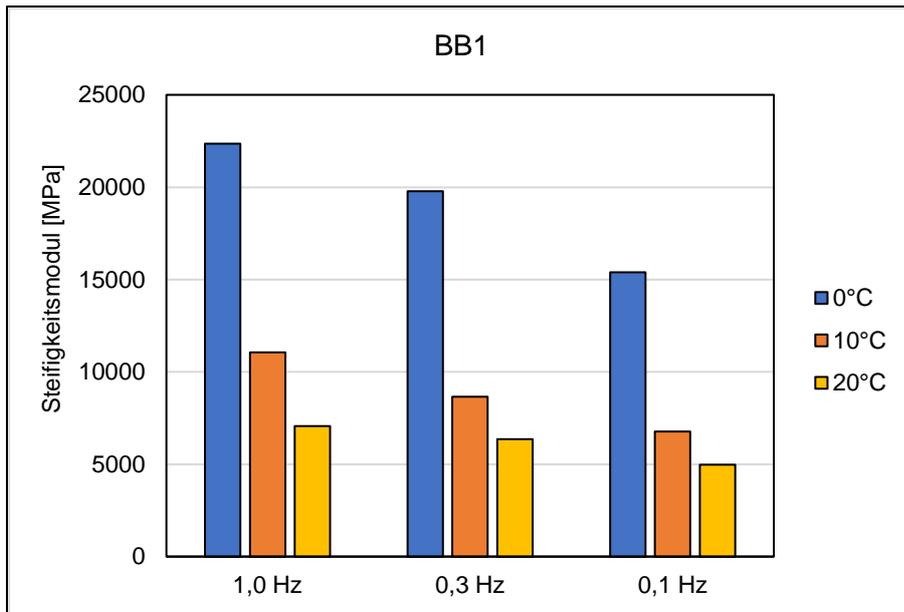


Abb. 5.3: Ergebnisse der Versuche zum Steifigkeitsmodul des Baustoffgemisches BB1

Bitumengebundenes Baustoffgemisch BB2

Die Ergebnisse der Versuche zum Ermüdungsverhalten des bitumengebundenen Baustoffgemisches BB2 sind in **Abb. 5.4** dargestellt. Eine tabellarische Übersicht der Ergebnisse sowie die einzelnen Prüfprotokolle sind der **Anlage 2** zu entnehmen.

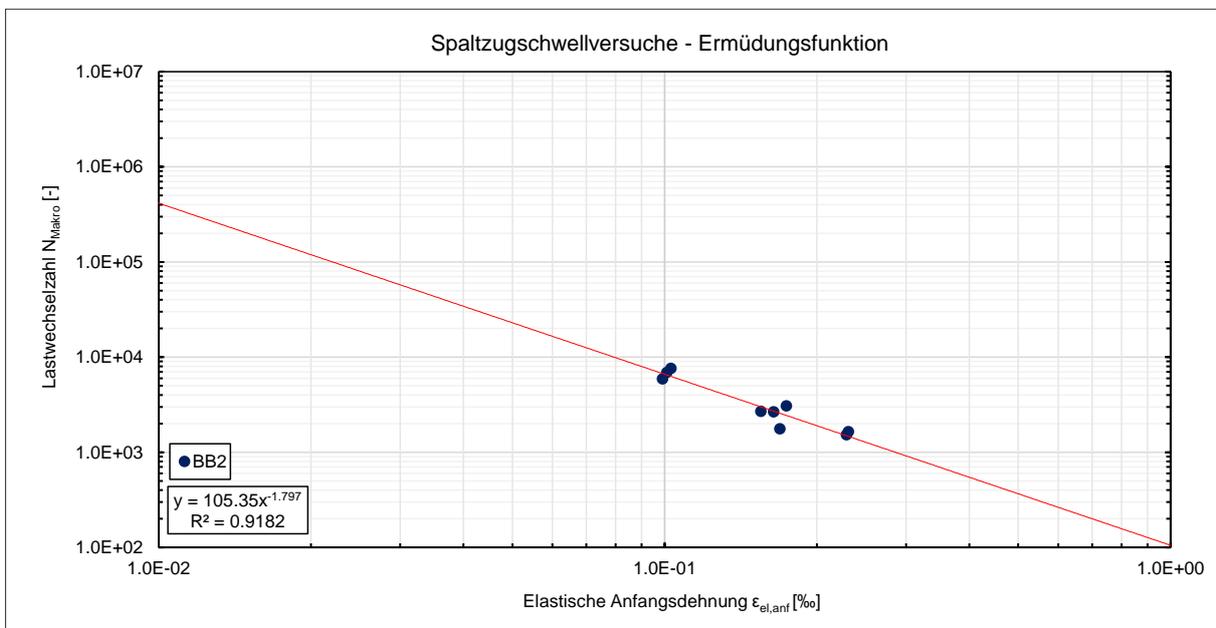


Abb. 5.4: Ermüdungsfunktion für das Baustoffgemisch BB2

Zudem wurde das Ermüdungsverhalten des Materials BB2 mit einem Video dokumentiert, vgl. digitale **Anlage D2**. Die **Abb. 5.5** zeigt exemplarisch 3 Bilder dieses Videos. Oben links ist der

Startzeitpunkt des Ermüdungsversuchs dargestellt. Oben rechts ist bereits eine Verformung des Probekörpers infolge der Lastaufbringung zu erkennen. Unten ist der Probekörper zum Versuchsende nach Ermüdung des Materials zu sehen. In diesem Versuch kam es zu keinem Bruch des Probekörpers. Es ist jedoch eine deutliche horizontale Verformung mit Rissbildung zu erkennen.

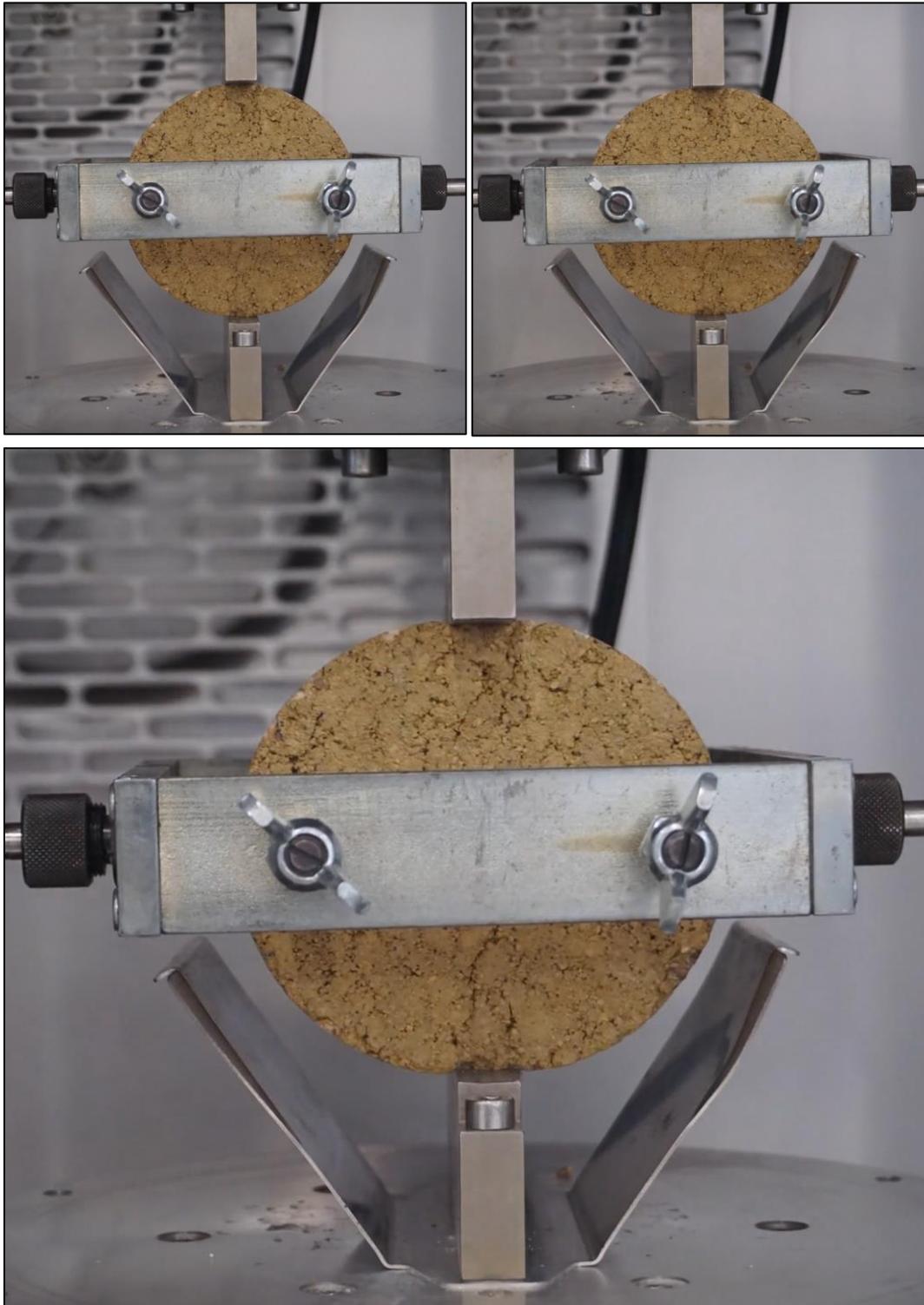


Abb. 5.5: Ermüdungsverhalten des Baustoffgemisches BB2 [Bromberg, 2022]

Für die Versuche zur Bestimmung der Steifigkeitsmoduln sind die ermittelten Werte in **Abb. 5.6** dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Steifigkeitsmoduln auch für das Baustoffgemisch **BB2** mit zunehmender Temperatur und kleiner werdender Belastungsfrequenz abnehmen und leicht unterhalb der Werte für das Baustoffgemisch BB1 liegen. Für die Versuche zur Bestimmung der Steifigkeitsmoduln sind die ermittelten Werte in **Abb. 5.6** dargestellt.

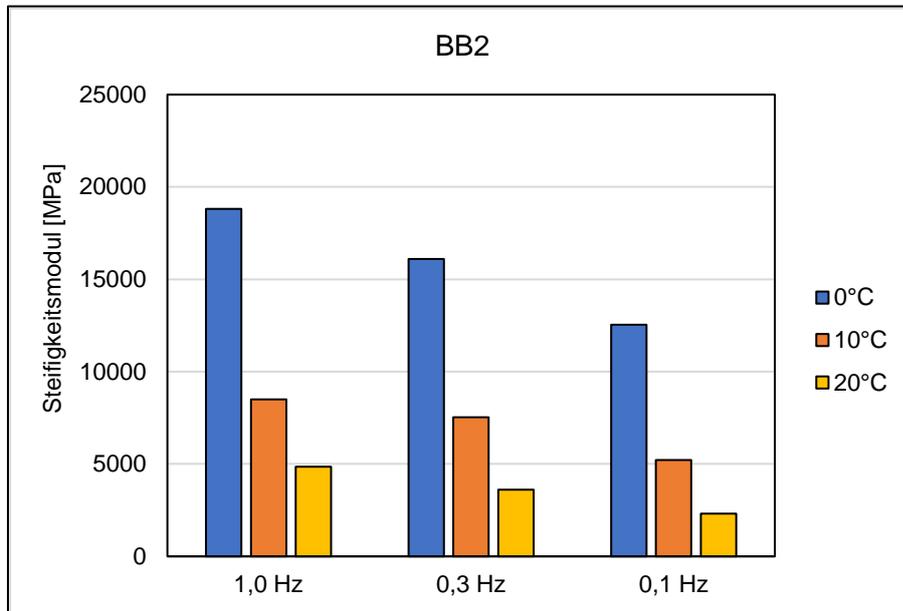


Abb. 5.6: Ergebnisse der Versuche zum Steifigkeitsmodul des Baustoffgemisches BB2

5.1.2 Kunstharzgebundene Baustoffgemische

Kunstharzgebundenes Baustoffgemisch KB1

Die Ergebnisse der Versuche zum Ermüdungsverhalten des kunstharzgebundenen Baustoffgemisches KB1 sind in **Abb. 5.7** dargestellt. Eine tabellarische Übersicht der Ergebnisse sowie die einzelnen Prüfprotokolle sind der **Anlage 2** zu entnehmen.

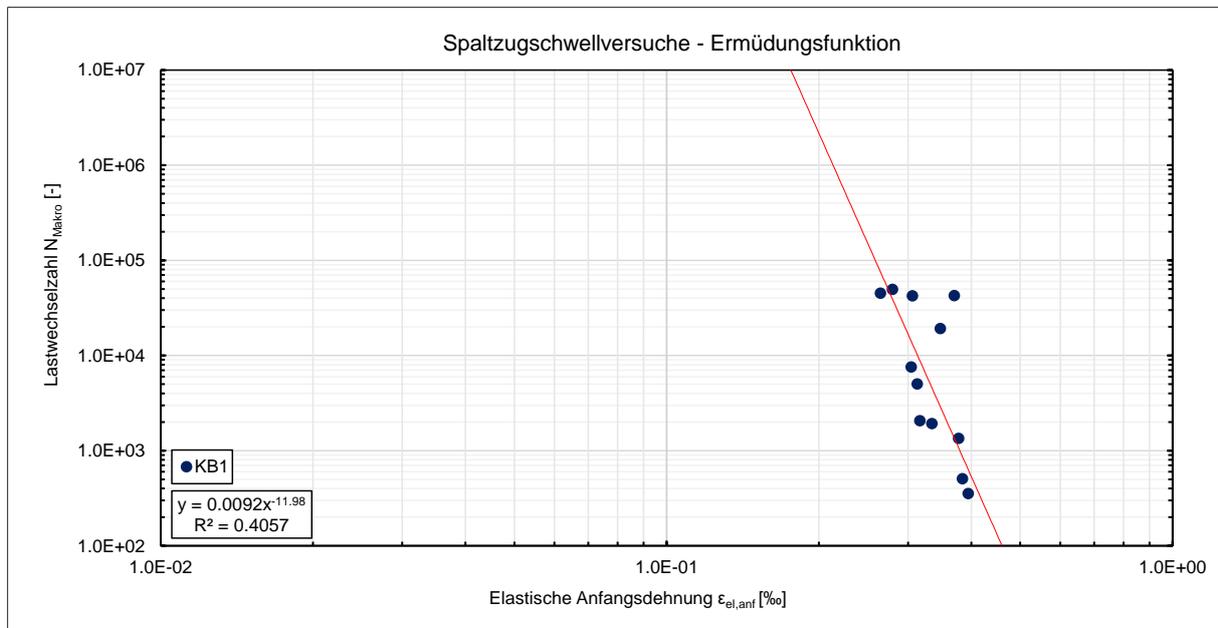


Abb. 5.7: Ermüdungsfunktion für das Baustoffgemisch KB1

Abb. 5.8 zeigt exemplarisch 3 Bilder der Versuchsdurchführung. Oben links ist der Startzeitpunkt des Ermüdungsversuchs dargestellt. Oben rechts ist eine Abbildung kurz vor dem Bruch des Probekörpers zu sehen und unten ist der Probekörper zum Versuchsende nach Ermüdung bzw. Bruch des Materials dargestellt. Festzuhalten ist, dass beim kunstharzgebundene Material KB1 infolge der dynamischen Lasteintragung nahezu keine horizontale Verformung vor dem abrupten Bruch des Probekörpers erfolgt.

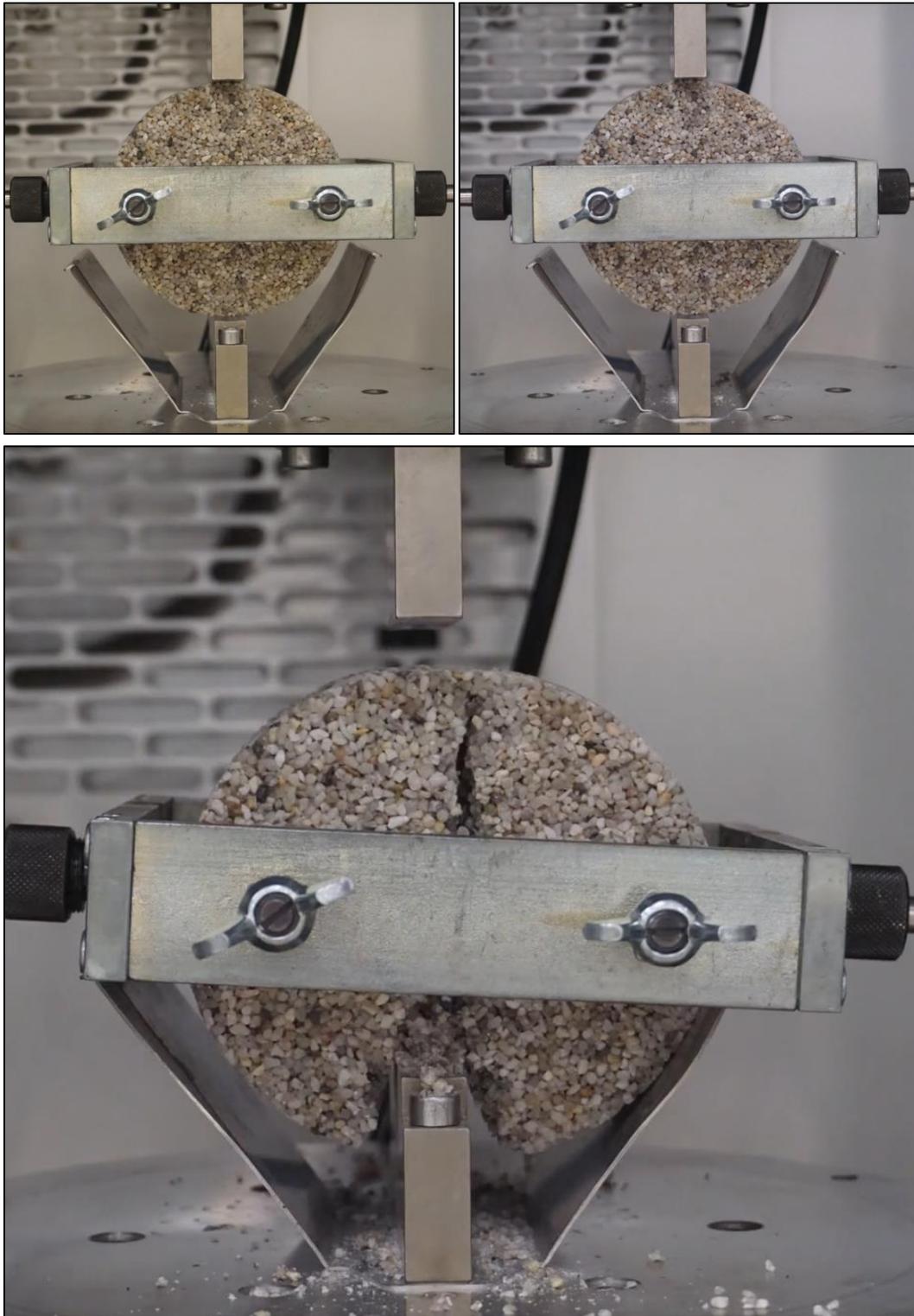


Abb. 5.8: Ermüdungsverhalten des Baustoffgemisches KB1 [Bromberg, 2022]

Für die Versuche zur Bestimmung der Steifigkeitsmoduln für das Baustoffgemisch KB1 sind die ermittelten Werte in **Abb. 5.9** dargestellt. Die Steifigkeitsmoduln lagen für die Temperaturen von 0°C bis 20 °C in einem ähnlichen Bereich. Sie liegen insbesondere bei größeren Temperaturen auf einem höheren Niveau als die Steifigkeitsmoduln von BB1 und BB2.

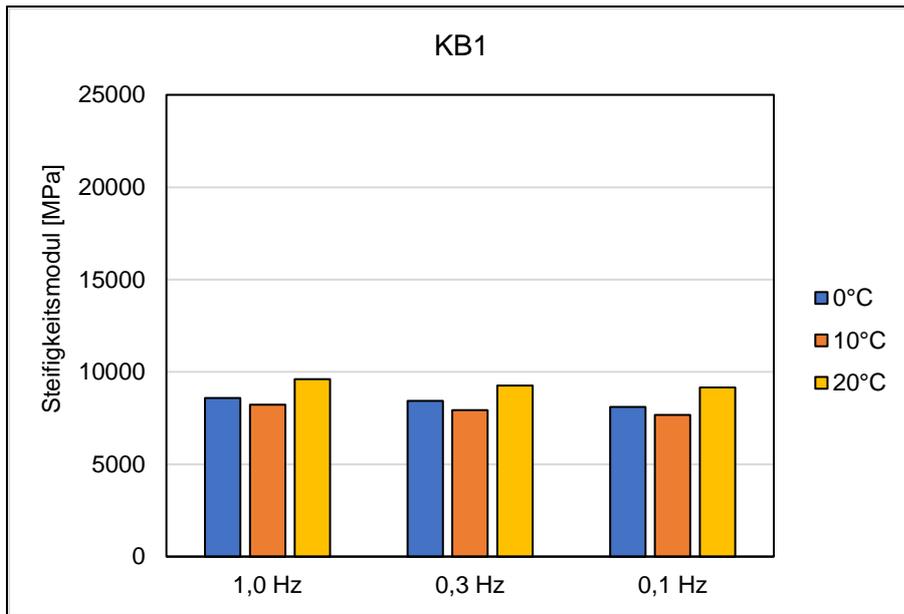


Abb. 5.9: Ergebnisse der Versuche zum Steifigkeitsmodul des Baustoffgemisches KB1

Kunstharzgebundenes Baustoffgemisch KB2

Die Ergebnisse der Versuche zum Ermüdungsverhalten des Baustoffgemisches KB2 sind in **Abb. 5.10** dargestellt. Eine tabellarische Übersicht der Ergebnisse sowie die einzelnen Prüfprotokolle sind der **Anlage 2** zu entnehmen.

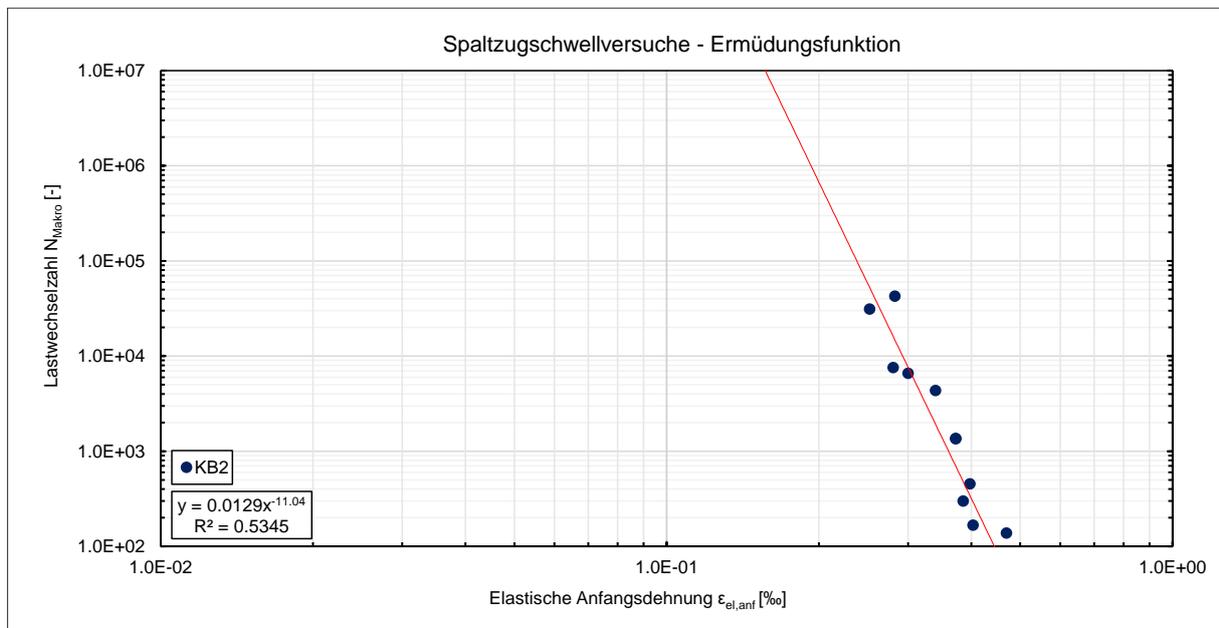


Abb. 5.10: Ermüdungsfunktion für das Baustoffgemisch KB2

Abb. 5.11 zeigt exemplarisch 3 Bilder dieses Videos. Oben links ist der Startzeitpunkt des Ermüdungsversuchs dargestellt, oben rechts ist eine Abbildung kurz vor dem Bruch des Probekörpers und unten ist der Probekörper zum Versuchsende nach Ermüdung des Materials zu sehen. Es stellte sich heraus, dass das kunstharzgebundene Material KB2 unter dynamischer Lasteintragung nahezu keine horizontale Verformung aufwies, bevor es schließlich zu einem abrupten Bruch des Probekörpers kam.

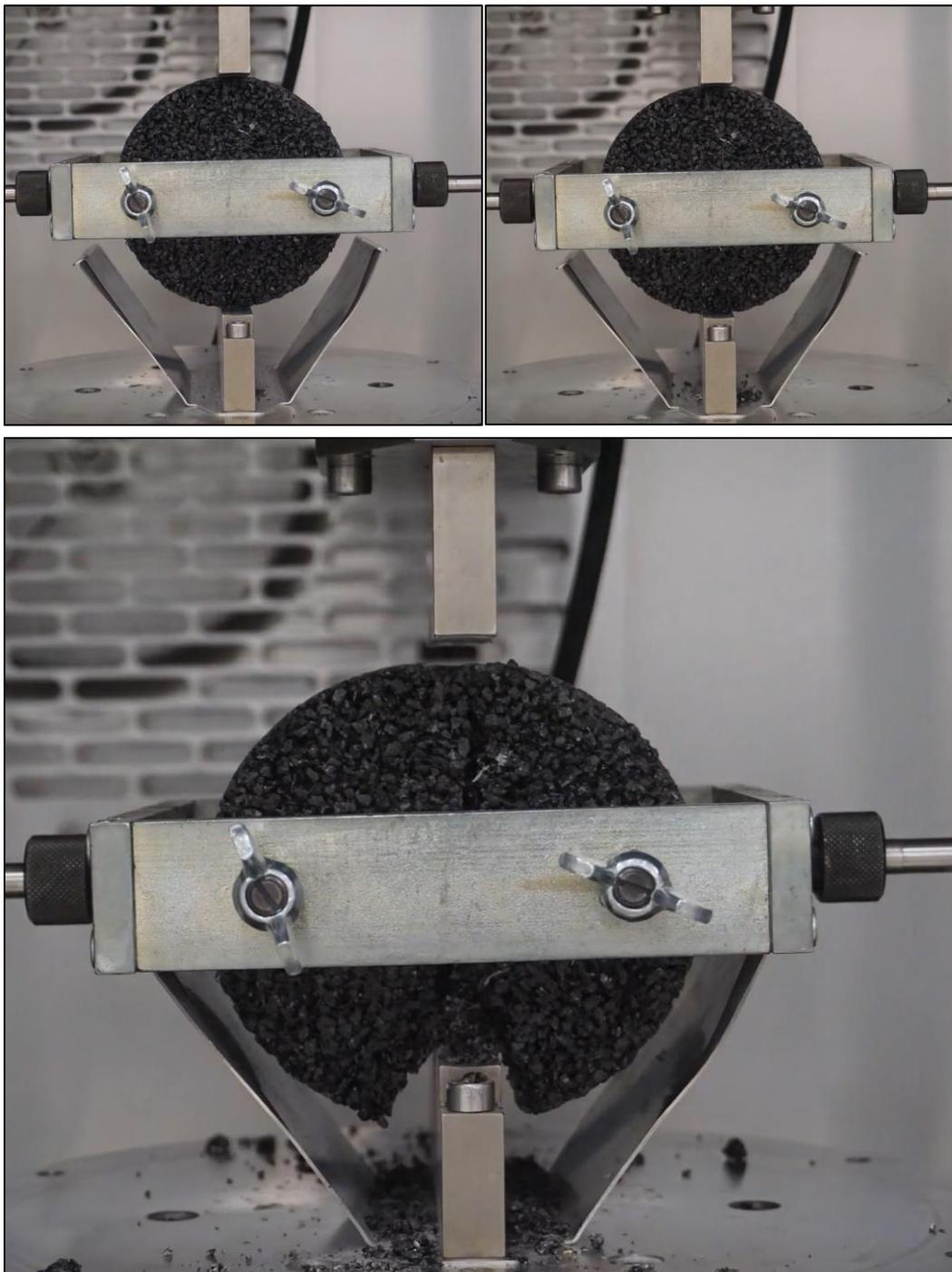


Abb. 5.11: Ermüdungsverhalten des Baustoffgemisches KB2 [Bromberg, 2022]

Die **Abb. 5.12** zeigt die Ergebnisse der Versuche zur Bestimmung der Steifigkeitsmoduln des Baustoffgemisches KB2. Die Moduln waren für die Temperaturen zwischen 0°C und 20°C vergleichbar und wiesen keine signifikanten Schwankungen auf. Sie sind aber tendenziell etwas geringer als die Steifigkeitsmoduln des Baustoffgemisches KB1.

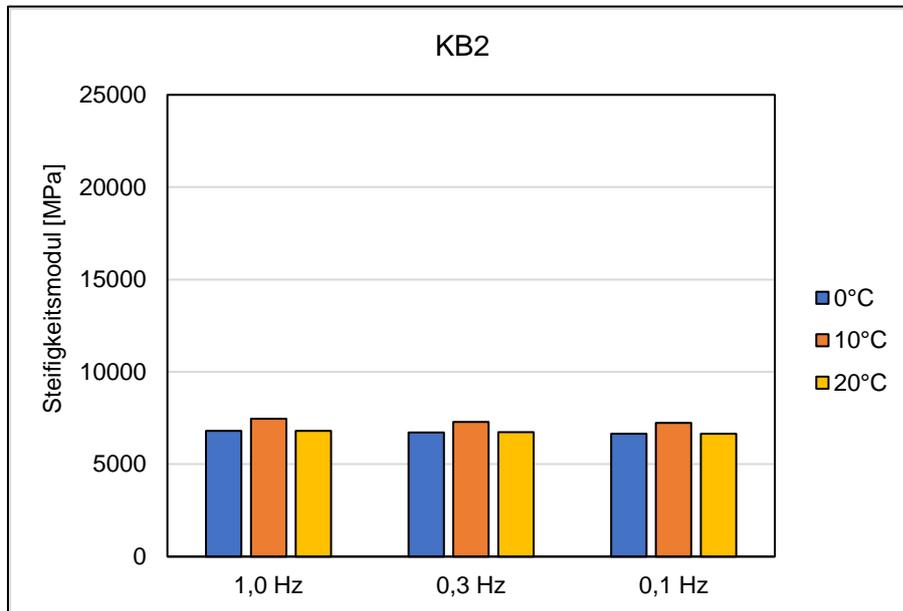


Abb. 5.12: Ergebnisse der Versuche zum Steifigkeitsmodul des Baustoffgemisches KB2

Kunstharzgebundenes Baustoffgemisch KB3

Die Auswertung der Ergebnisse zum Ermüdungsverhalten des Baustoffgemisches KB3 zeigte einen Messwert, der nicht zur Grundgesamtheit passte, vgl. **Abb. 5.13** oben. Dieser Messwert wurde in einer weiteren ermittelten Ermüdungsfunktion als ausreißerverdächtig ausgeklammert, vgl. **Abb. 5.13** unten. Eine tabellarische Übersicht der Ergebnisse sowie die einzelnen Prüfprotokolle sind der **Anlage 2** zu entnehmen.

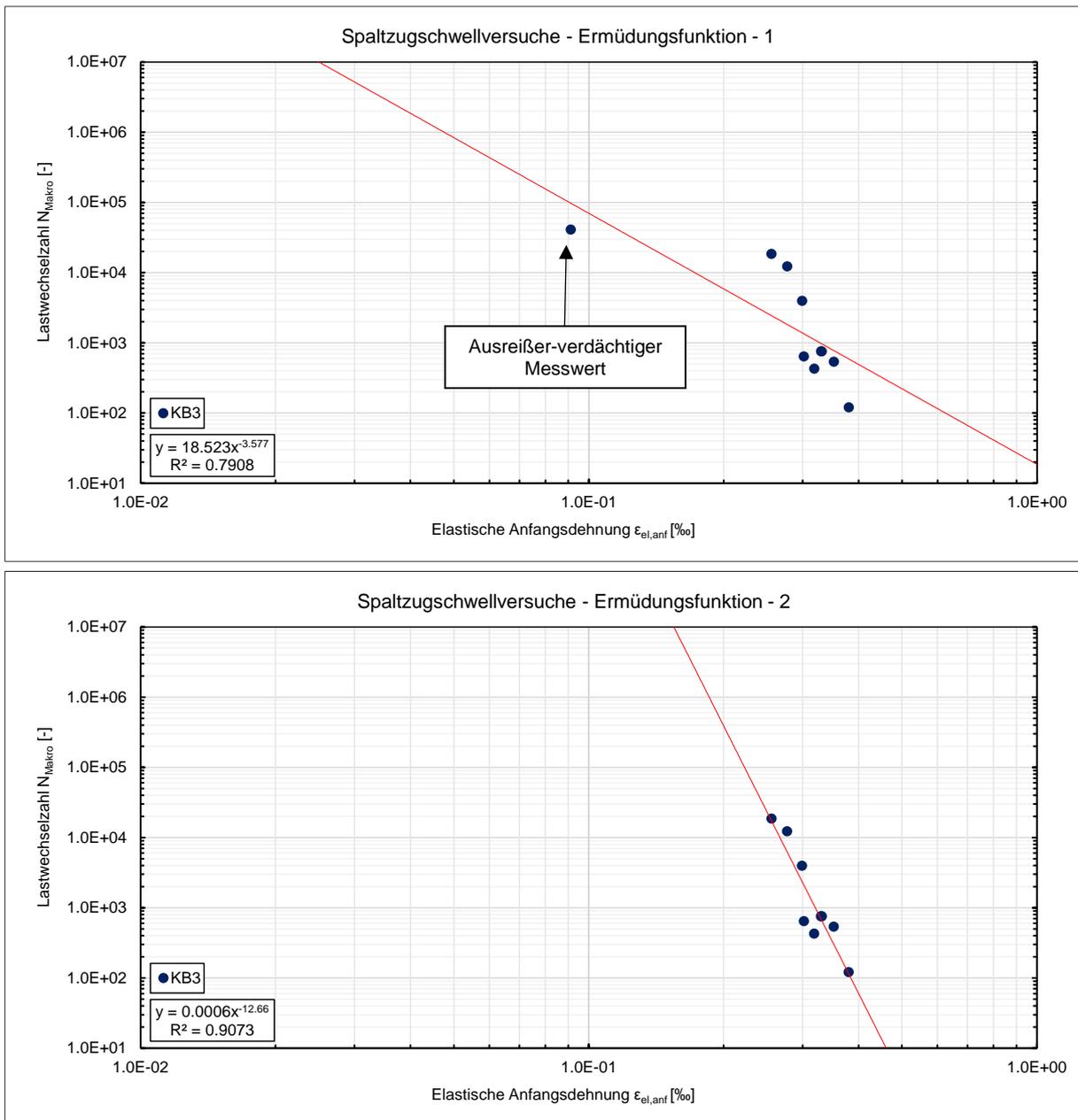


Abb. 5.13: Ermüdungsfunktion für das Baustoffgemisch KB3 inkl. Ausreißer-verdächtigem Messwert (oben) und KB3 exkl. Ausreißer-verdächtigem Messwert (unten)

Abb. 5.14 zeigt exemplarisch 3 Bilder aus dem Versuchsablauf. Der Startzeitpunkt des Ermüdungsversuchs ist oben links dargestellt. Oben rechts ist eine Abbildung kurz vor dem Bruch

des Probekörpers und unten ist der Probekörper zum Versuchsende nach Ermüdung des Materials zu sehen. Auch hier war infolge der dynamischen Lasteintragung nahezu keine horizontale Verformung vor dem abrupten Bruch des Probekörpers zu erkennen.



Abb. 5.14: Ermüdungsverhalten des Baustoffgemisches KB3 [Bromberg, 2022]

Abb. 5.15 zeigt die Ergebnisse der Bestimmung der Steifigkeitsmoduln des Baustoffgemisches KB3. Die Steifigkeitsmoduln waren bei 0°C und 20 °C vergleichbar, während sie bei 10 °C eine Abnahme aufweisen.

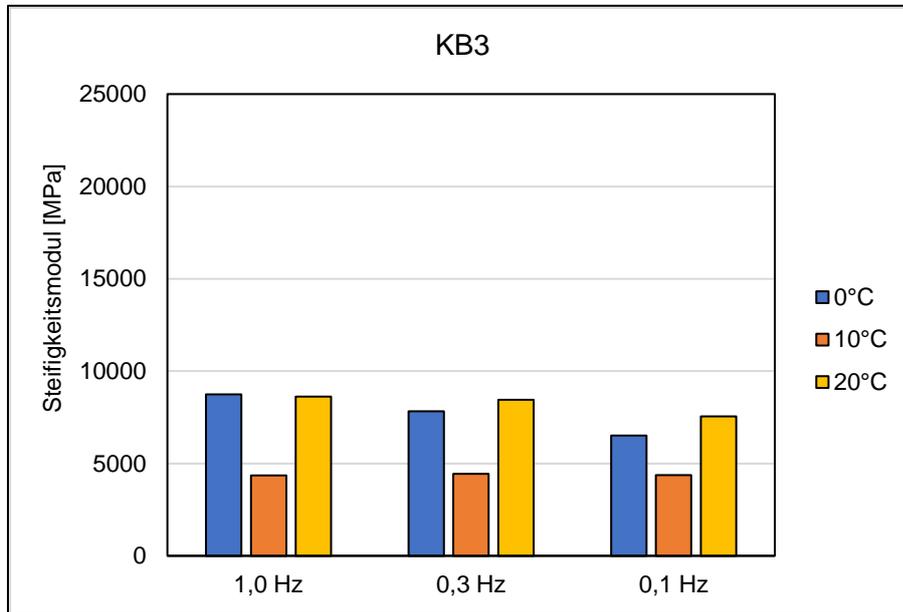


Abb. 5.15: Ergebnisse der Versuche zum Steifigkeitsmodul des Baustoffgemisches KB3

5.1.3 Fazit

Die unterschiedlichen Baustoffgemische mit unterschiedlichen Bindemitteln und Gesteinskörnungen wiesen unterschiedliche Eigenschaften auf. Die Baustoffe BB1 und BB2 verhielten sich viskoelastisch (Datenreihen: Punkt blau, Dreieck rot). In den Versuchen wurde dieses Verhalten durch eine horizontale Verformung des Probekörpers deutlich. Die kunstharzgebundenen Baustoffe (Datenreihen Viereck gelb, Raute grün, Kreuz blau) weisen einen Quasi-Dauerfestigkeitsbereich auf, vgl. **Kap. 4.1, Abb. 4.5**. Daher kommt es bis zum Auftreten der Belastungsgrenze zu nahezu keinen Erscheinungen der Materialermüdung oder anderen Ausfallerscheinungen. Bei einer bestimmten Anzahl von Lastwechseln, oder bei Belastungen oberhalb der Belastungsgrenze kommt es zu deutlichen Ermüdungserscheinungen und Schädigungen bzw. zum abrupten Bruch. Im Vergleich fällt auf, dass die bitumengebundenen Baustoffe einen flachen Anstieg und die kunstharzgebundenen Baustoffe einen steilen Anstieg der Ermüdungsfunktion aufweisen. Aufgrund der Lage der Schnittpunkte der Ermüdungsfunktionen der bitumen- und kunstharzgebundenen Baustoffe ist zu vermuten, dass bitumengebundene Baustoffe bei Belastungen, die große Verformungen hervorrufen eine geeigneteres Ermüdungsverhalten aufweisen. Bei Belastungen, die kleinere Verformungen auslösen ist auch das Ermüdungsverhalten der kunstharzgebundenen Baustoffe geeignet, vgl. **Abb. 5.16**.

Um eine Aussage über die Streuung der einzelnen Messwerte treffen zu können, wurden die Standardabweichungen für die linearisierten Ermüdungsfunktionen der Baustoffgemische verglichen, vgl. **Abb. 5.17**. Die Ermüdungsfunktionen beschreiben den Zusammenhang zwischen

der Anzahl der Lastwechsel und dem Ermüdungsgrad eines Baustoffgemisches unter einer bestimmten Spannung. Die Standardabweichungen geben an, wie stark die Messwerte um den Mittelwert der Ermüdungsfunktionen schwanken. Ein hoher Wert bedeutet eine hohe Streuung und eine geringere Zuverlässigkeit der Messergebnisse. Ein niedriger Wert bedeutet eine geringe Streuung und eine hohe Zuverlässigkeit der Messergebnisse. Festzuhalten ist, dass die kunstharzgebundenen Baustoffe, eine deutlich größere Varianz aufweisen als die bitumengebundenen Baustoffe.

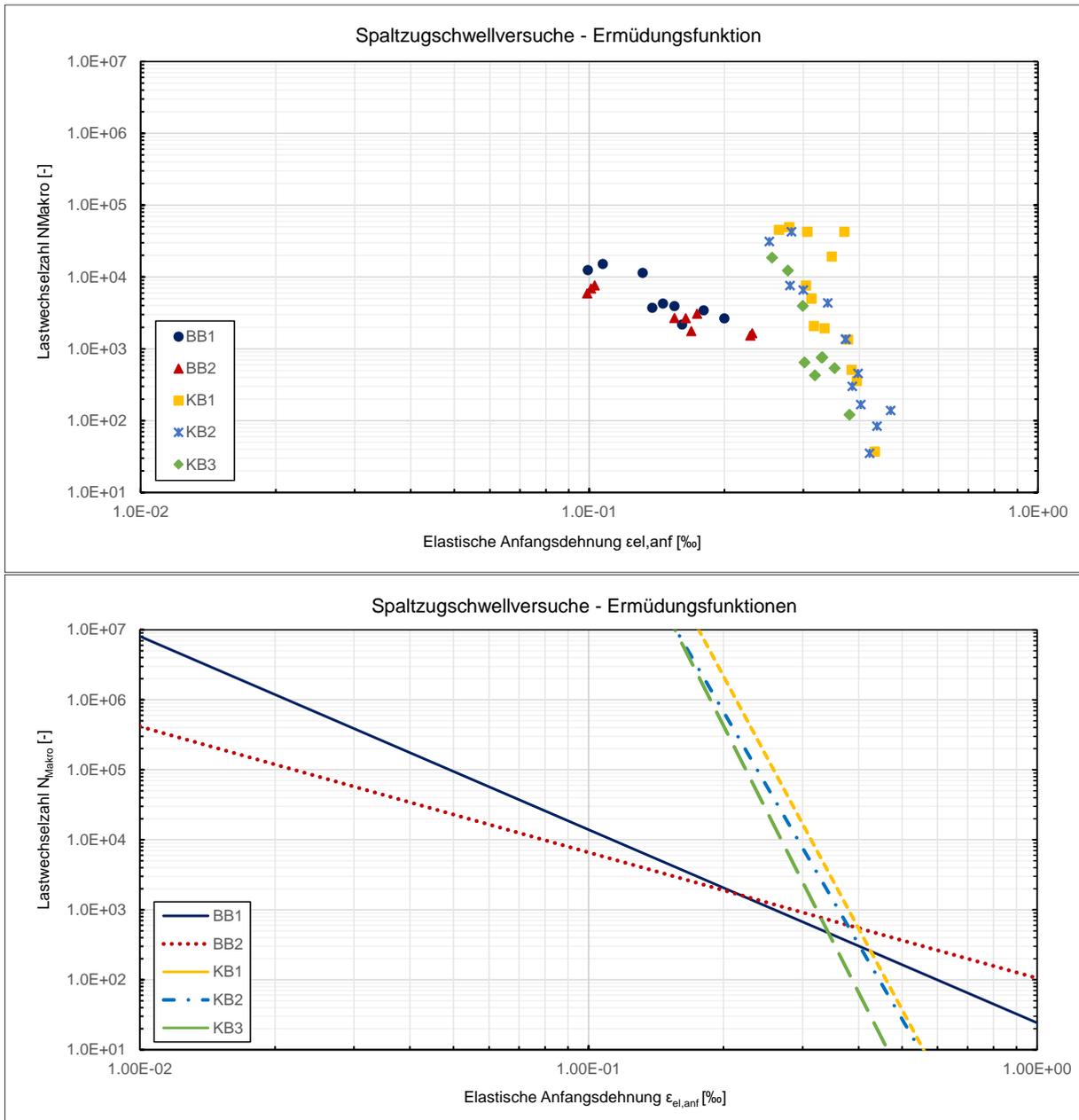


Abb. 5.16: Ermüdungsfunktionen der gebundenen Baustoffgemische (ohne Belastung), Messwerte der Baustoffgemische (oben), Ermüdungsfunktionen der Baustoffgemische (unten)

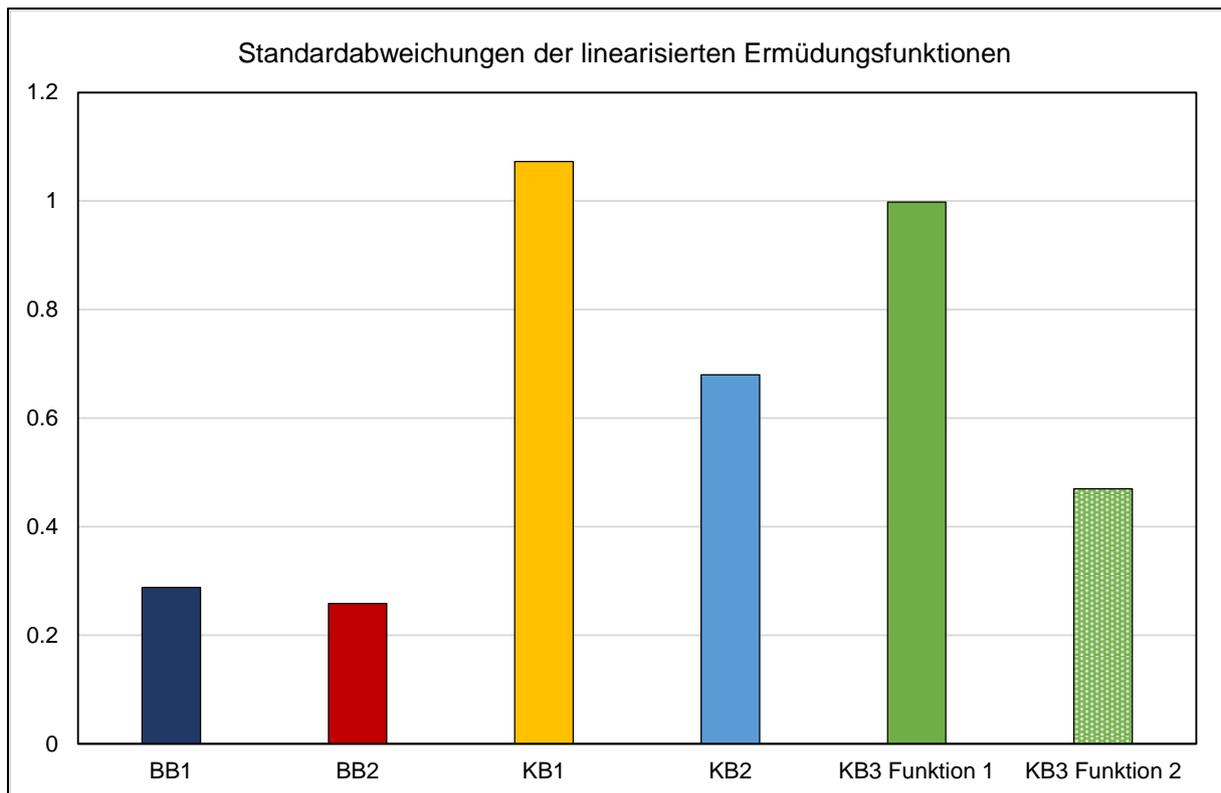


Abb. 5.17: Varianz der Ermüdungsfunktionen der gebundenen Baustoffgemische (ohne Belastung)

Die Auswertungen der Steifigkeitsmoduln der bitumengebundenen Baustoffe zeigten, dass sie (erwartungsgemäß) temperaturabhängig sind. Bei den kunstharzgebundenen Materialien waren die Steifigkeitsmoduln für die drei untersuchten Temperaturen vergleichbar und wiesen keine signifikanten Schwankungen auf. Anzumerken ist, dass beim Material KB3 in einem Temperaturbereich von 10°C eine Abnahme (im Vergleich zu den Ergebnissen für 0°C und 20°C) des Steifigkeitsmoduls zu verzeichnen war. **Abb. 5.18** zeigt die Ergebnisse der Versuche zu den Steifigkeitsmodulen der Baustoffgemische für die drei untersuchten Temperaturbereiche.

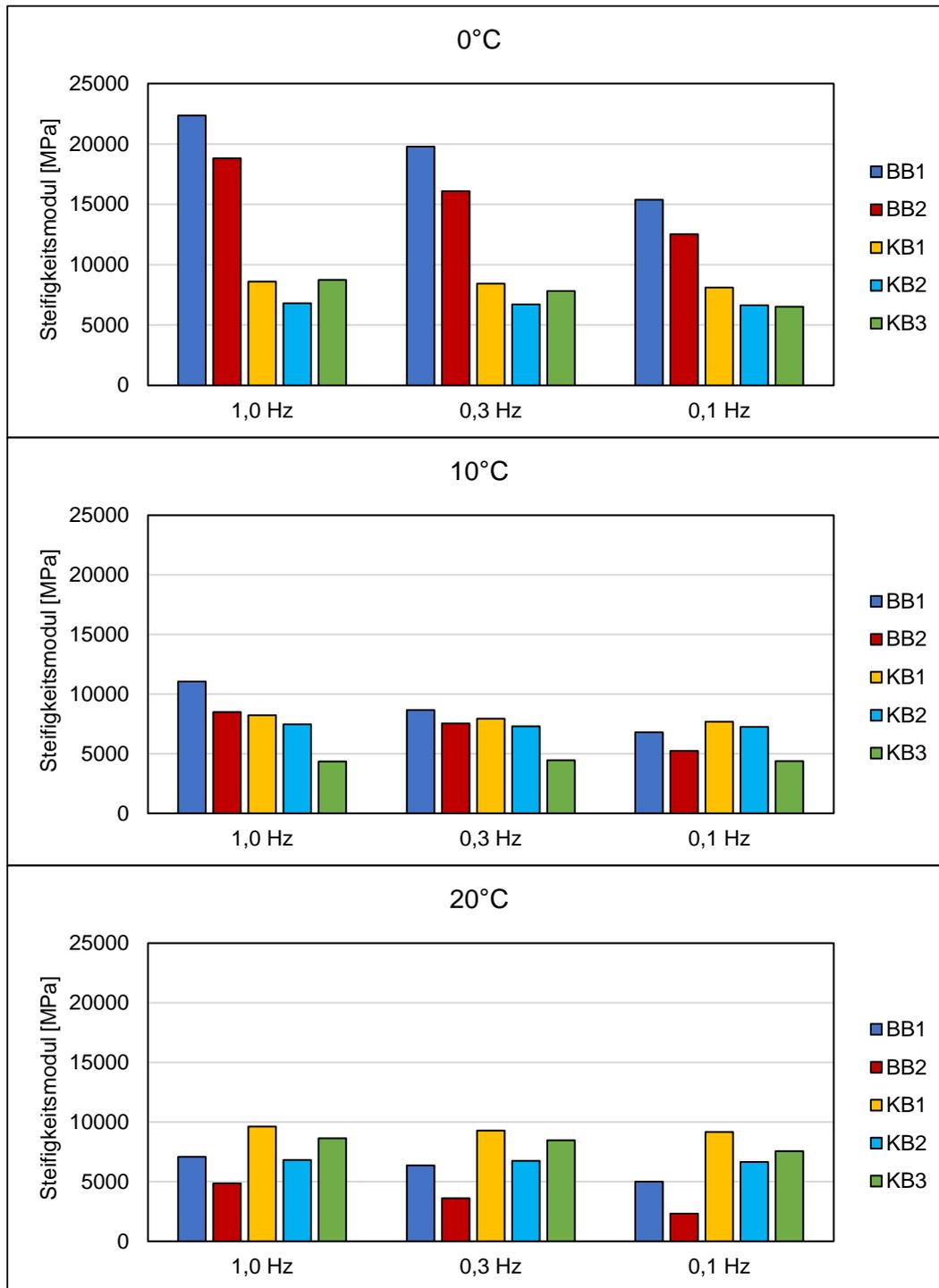


Abb. 5.18: Ergebnisse der Versuche zu den Steifigkeitsmodulen der Baustoffgemische

5.2 Untersuchungen zur thermischen Belastung und UV-Beständigkeit der gebundenen Baustoffgemische

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Spaltzugschwellversuche dargestellt, die das Ermüdungsverhalten von Baustoffgemischen mit Bitumen- und Kunstharzbindung nach thermischer Belastung und nach thermischer Belastung mit anschließender UV-Bestrahlung untersuchen. Die Versuche wurden für jeweils eine ermittelte Oberspannung durchgeführt. Die Auswertung erfolgte sowohl in Tabellenform als auch grafisch. Die Ergebnisse der unbelasteten Probekörper wurden ebenfalls in den Darstellungen aufgeführt, um einen Vergleich zu ermöglichen.

Die grafische Auswertung erfolgte mit Hilfe von Box-Whisker-Plots. Ein Box-Plot ist eine grafische Darstellung der Datenverteilung anhand von fünf Kennzahlen: Minimum, unteres Quartil, Median, oberes Quartil und Maximum. Die Box zeigt den Bereich an, in dem die mittleren 50 % der Daten liegen, und der Median wird durch einen Strich innerhalb der Box markiert. Die Whisker sind vertikale Linien, die sich von der Box aus erstrecken und die Variabilität außerhalb des Quartilsbereichs anzeigen. Ein Kreuz in der Box gibt den Mittelwert der Daten an. Datenpunkte, die über oder unter den Whiskern liegen, werden als Ausreißer angesehen und meist durch Punkte dargestellt.

Die detaillierten Prüfprotokolle und tabellarischen Ergebnisübersichten sind den **Anlagen 3** und **4** beigefügt.

5.2.1 Bitumengebundene Baustoffgemische

Bitumengebundenes Baustoffgemisch BB1

Für den Vergleich der Ergebnisse nach thermischer Belastung wurden die Lastwechselzahlen für eine Oberlast von 0,6 MPa gegenübergestellt. Basierend auf den Untersuchungsergebnissen lässt sich sagen, dass die Ermüdungslastwechselzahl nach thermischer Alterung zwar geringfügig abnimmt, der Unterschied aber aufgrund des geringen Stichprobenumfangs als nicht signifikant einzustufen ist. Zu erkennen ist allerdings, dass durch die thermische Alterung die Variabilität der Versuchsergebnisse deutlich größer wird. Dies wird in **Abb. 5.19** dargestellt.

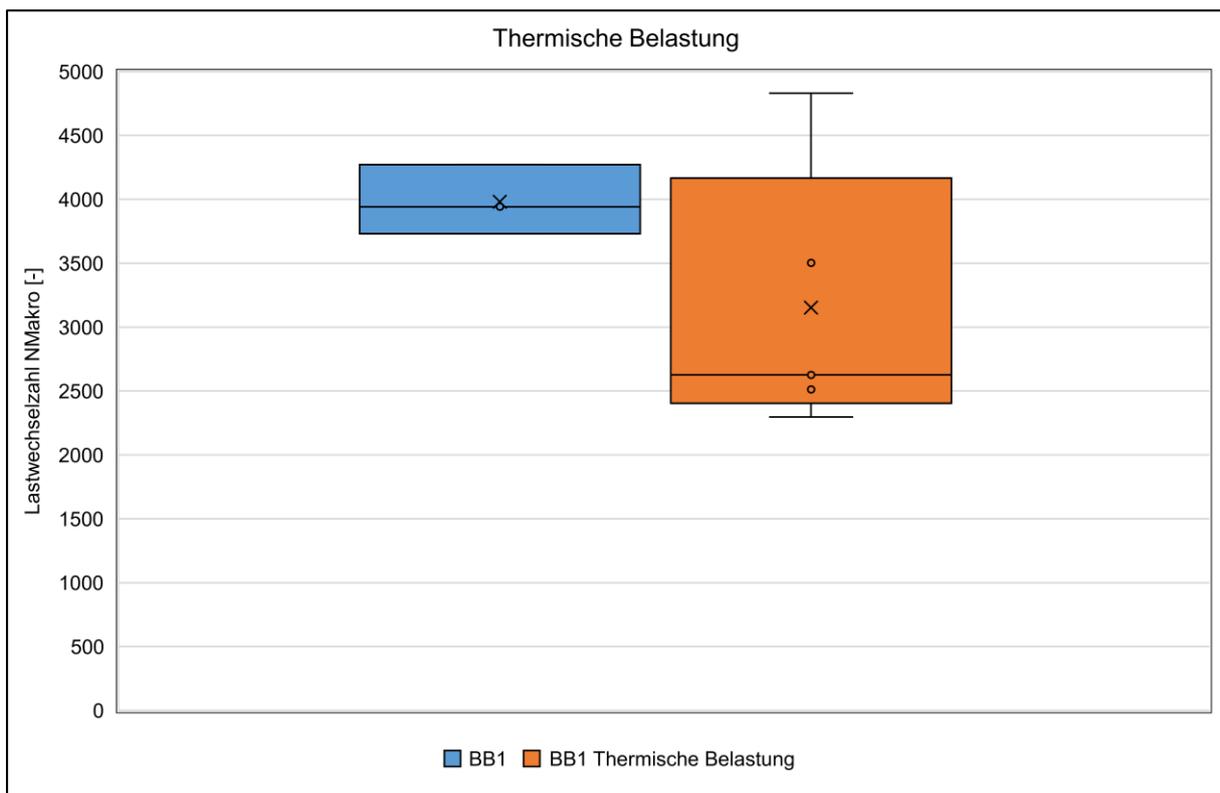


Abb. 5.19: Ergebnisse Baustoffgemisch BB1 mit und ohne thermische Belastung

Um die Ergebnisse nach thermischer und UV-Belastung zu vergleichen, wurde die Anzahl der Lastwechsel der gleichen Laststufe von 0,5 MPa miteinander verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass der durch das Experiment erzeugte Alterungszustand des Baustoffs keinen signifikanten Einfluss auf den Ermüdungszustand hat. Dies wird durch die **Abb. 5.20** verdeutlicht.

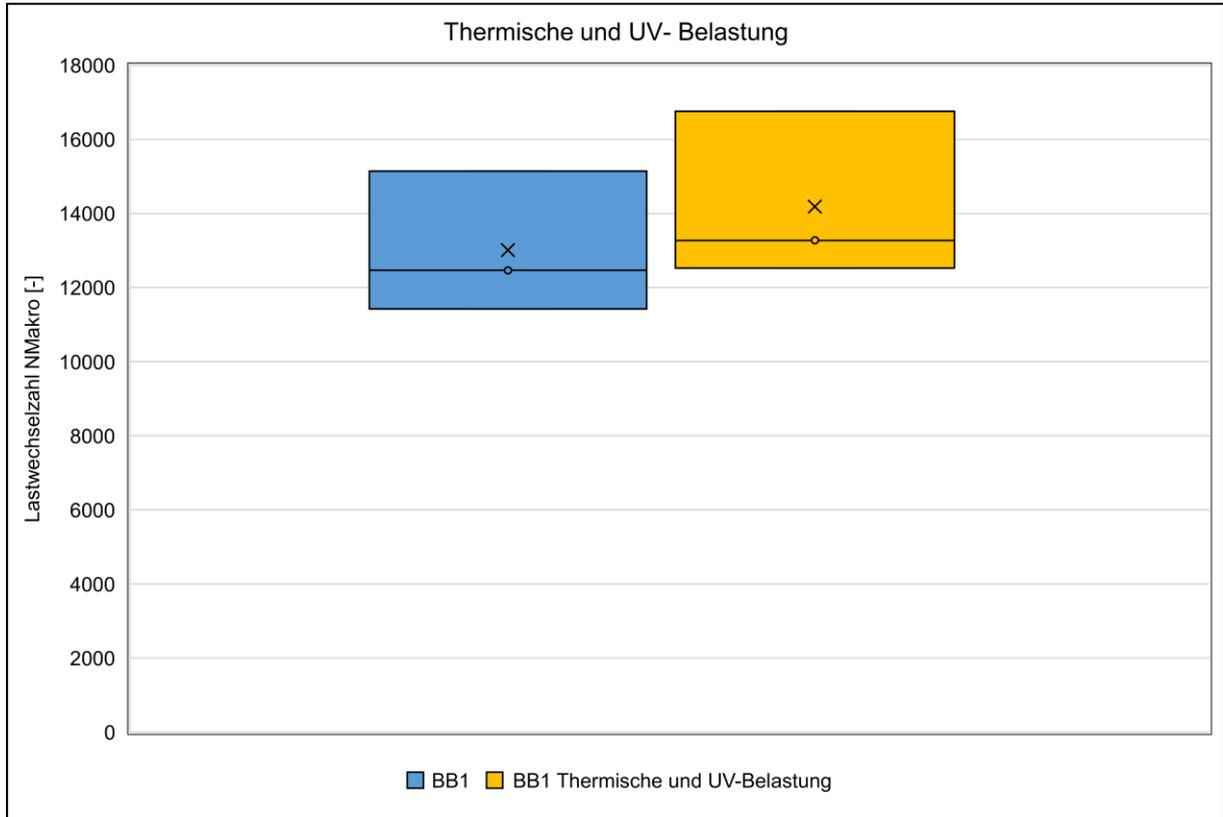


Abb. 5.20: Ergebnisse Baustoffgemisches BB1 mit und ohne thermische Belastung + UV-Bestrahlung

Bitumengebundenes Baustoffgemisch BB2

Die Anzahl der Lastwechsel bei einer konstanten Laststufe von 0,4 MPa diene als Vergleichskriterium für die Ergebnisse. Wie **Abb. 5.21** zeigt, beeinflusst der Alterungszustand des Baustoffes, der im Versuch erzeugt wurde, seinen Ermüdungszustand. Die thermisch und thermisch und UV-belasteten PK weisen geringere Lastwechselzahlen auf als die unbelasteten PK.

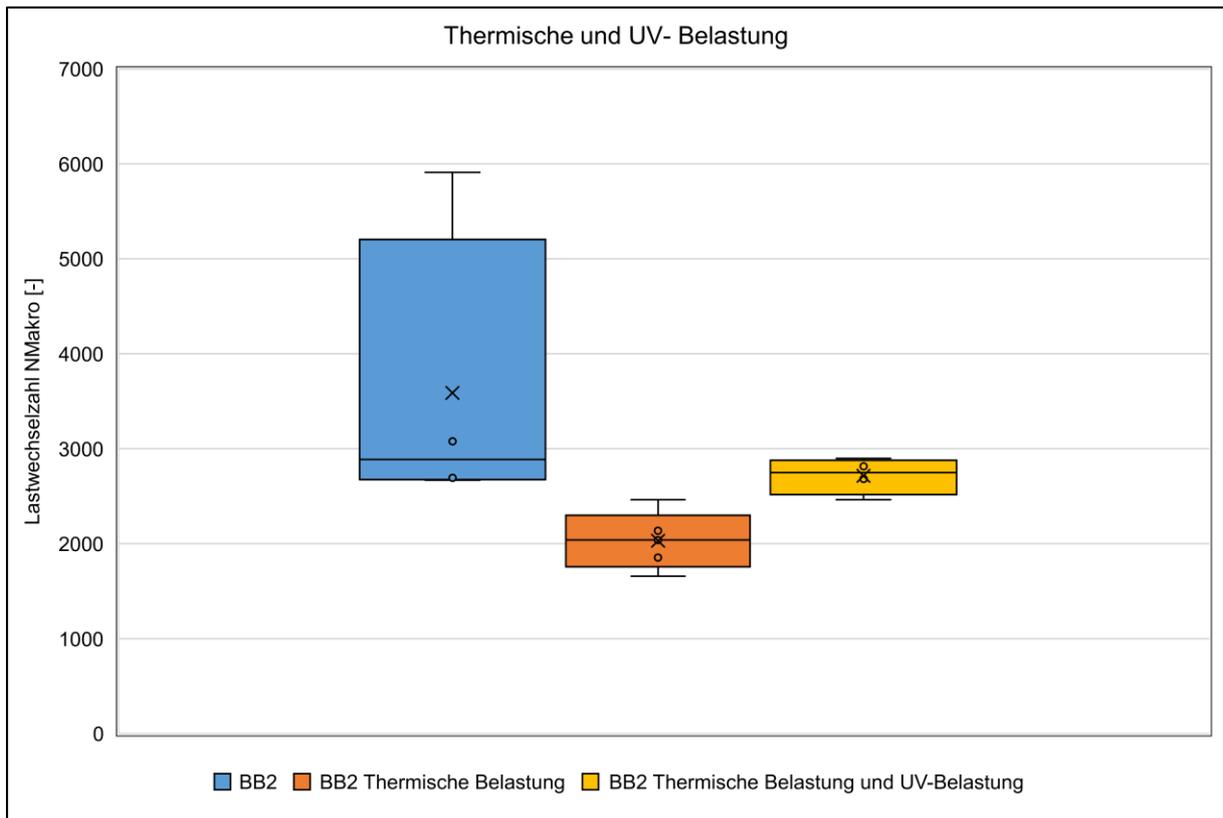


Abb. 5.21: Ergebnisse Baustoffgemisch BB2 mit und ohne thermische Belastung und thermische + UV-Bestrahlung

5.2.2 Kunstharzgebundene Baustoffgemische

Die Ergebnisse des Versuchs zeigen, dass der künstliche Laboralterungsprozess bei den kunstharzgebundenen Baustoffgemischen einen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten hat. Wie in **Abb. 5.22** bis **Abb. 5.24** zu sehen ist, sind die Mittelwerte der Ermüdungslastwechselzahlen der gealterten Probekörper niedriger als die der ungealterten Probekörper. Dies deutet darauf hin, dass die Alterung die Widerstandsfähigkeit des Baustoffes gegenüber zyklischen Belastungen verringert. Ganz deutlich und vor allem positiv wirkt sich der realisierte Alterungsprozess bei den untersuchten Proben auf die Variabilität der Versuchsergebnisse aus. Diese wurden deutlich kleiner. Zu erkennen ist auch, dass die zusätzlich zur thermischen Belastung aufgebrauchte UV-Bestrahlung zu keinen weiteren signifikanten Veränderungen der Versuchsergebnisse führte.

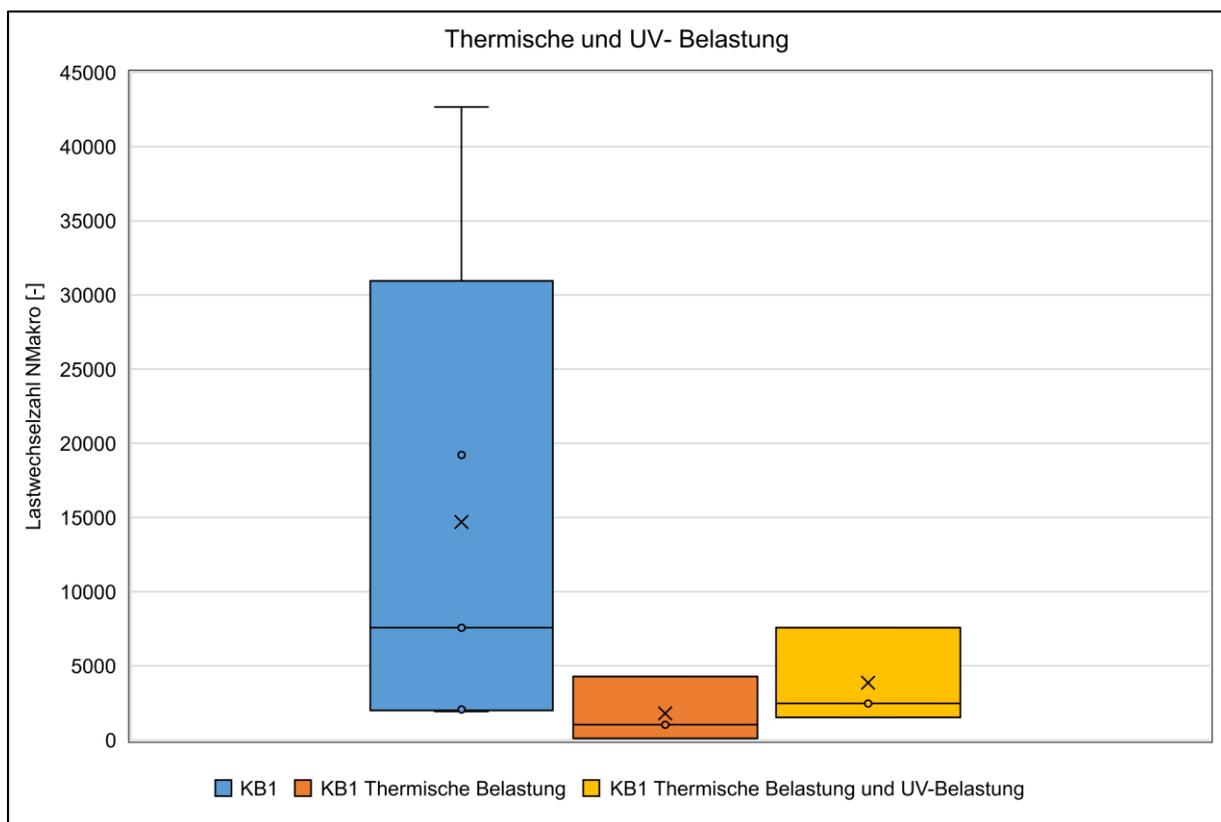


Abb. 5.22: Ergebnisse Baustoffgemisch KB1 mit und ohne thermische Belastung und thermische + UV-Bestrahlung

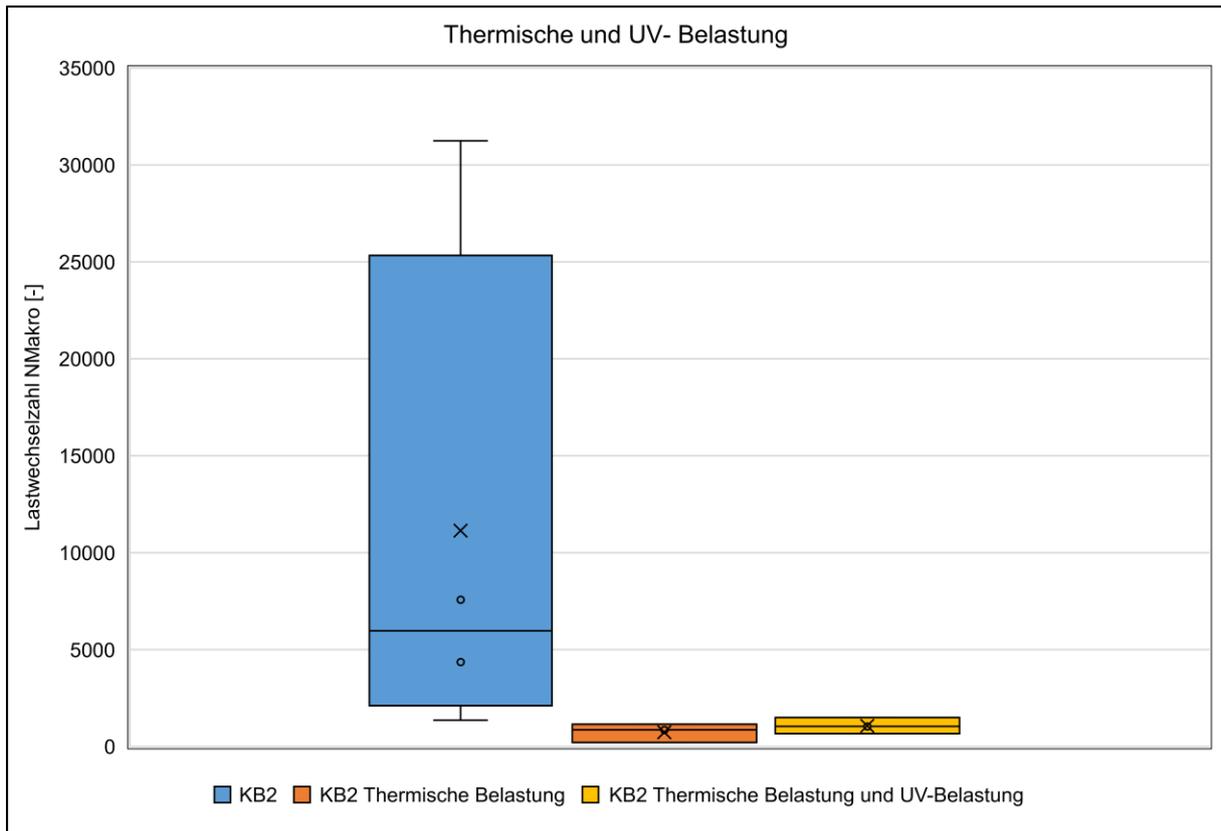


Abb. 5.23: Ergebnisse Baustoffgemisch KB2 mit und ohne thermische Belastung und thermische + UV-Bestrahlung

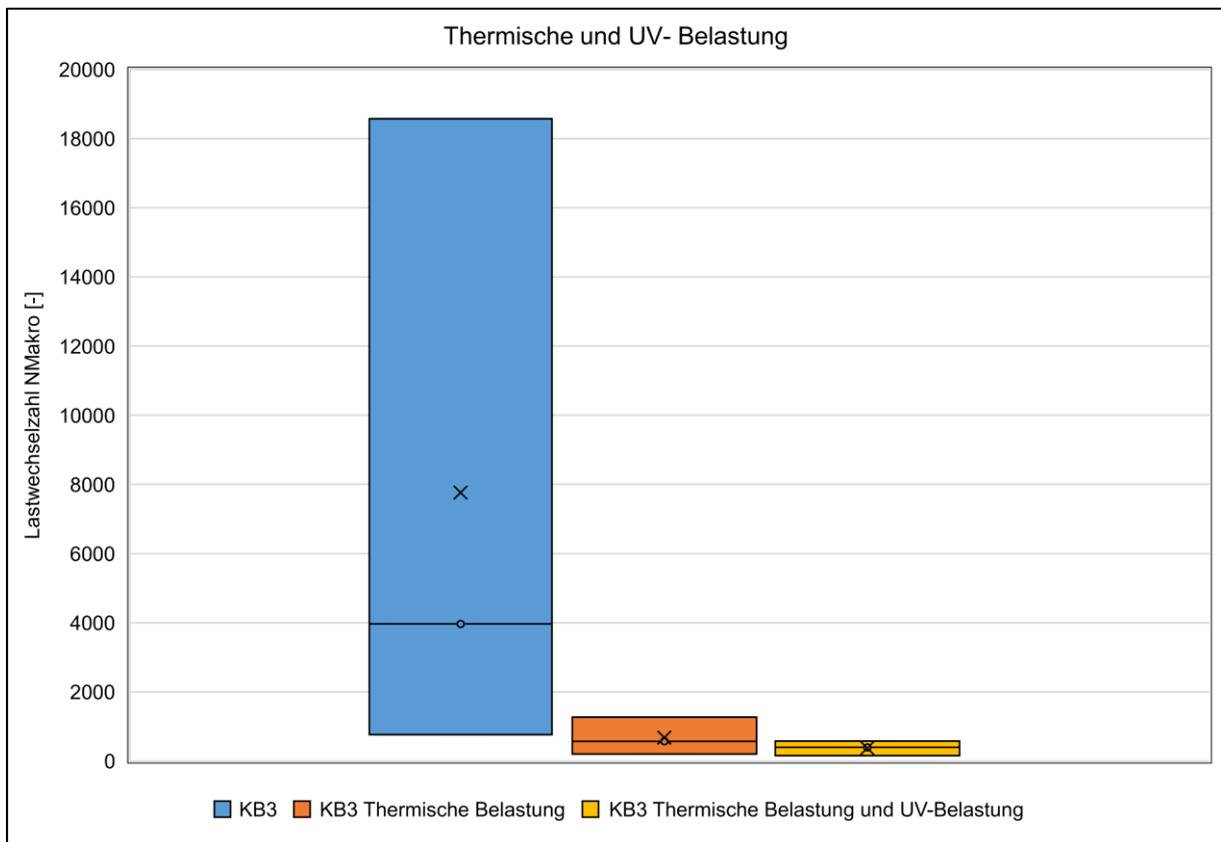


Abb. 5.24: Ergebnisse Baustoffgemisch KB3 mit und ohne thermische Belastung und thermische Belastung + UV-Bestrahlung

Die Ergebnisse zeigen, dass der im Versuch erzeugte Alterungsprozess durch thermische Belastung und die thermische Belastung in Kombination mit UV-Bestrahlung einen Einfluss auf den Ermüdungszustand der Baustoffgemische hat, vgl. **Abb. 5.25**. Die Auswirkungen sind bei gleichen im Rahmen des FuE-Projektes angewendeten Randbedingungen des Alterungsprozesses bei den kunstharzgebundenen Baustoffgemischen stärker ausgeprägt als bei den Bitumengebeundenen.

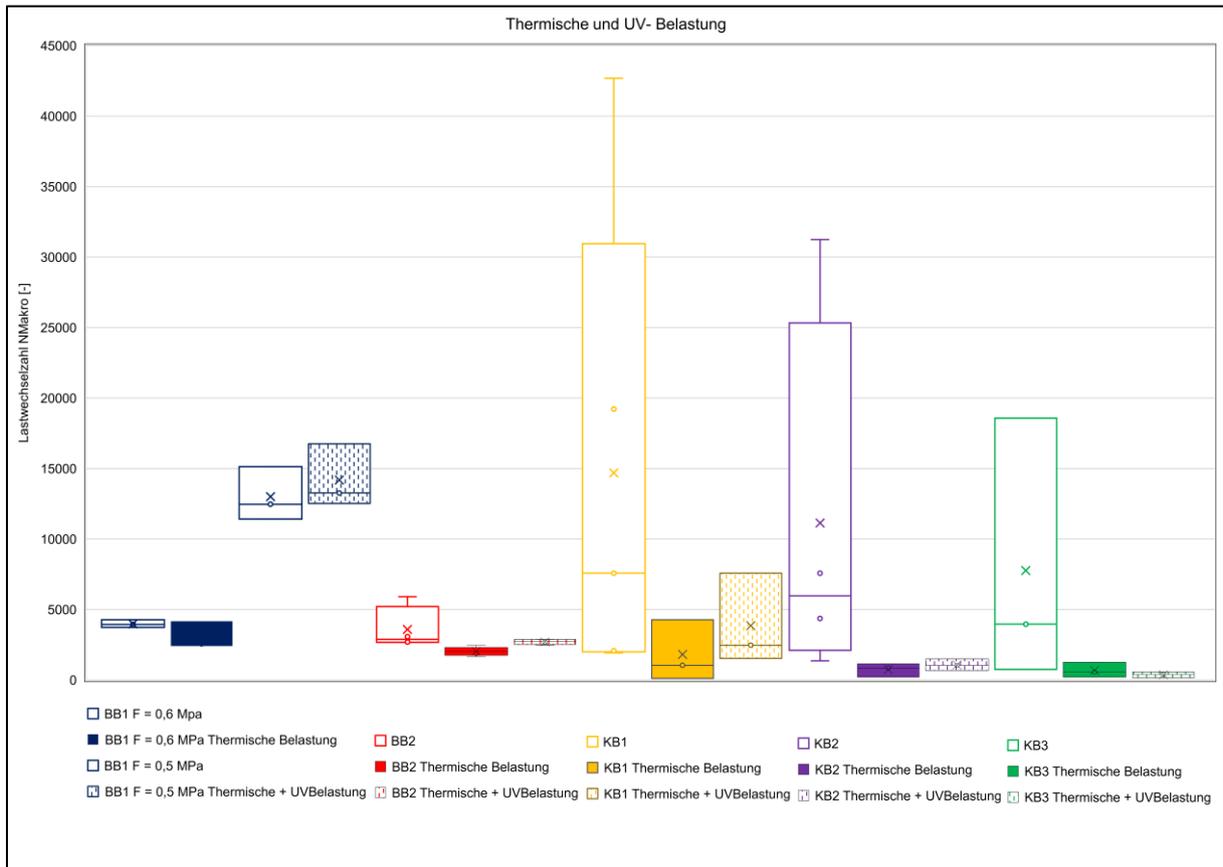


Abb. 5.25: Ergebnisse mit und ohne thermische Belastung und thermische Belastung + UV-Bestrahlung

5.3 Frost-Tau-Wechselversuche zur Analyse des Verwitterungswiderstandes der gebundenen Baustoffgemische

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Spaltzugschwellversuche zum Ermüdungsverhalten der bitumen- und kunstharzgebundenen Baustoffgemische nach *Frost-Tau-Wechsel--Belastung* aufgeführt. Die Versuche wurden für jeweils eine Oberspannung, die mit Hilfe eines Vorversuchs ermittelt wurde, durchgeführt. Um die Ergebnisse der unbelasteten Probekörper mit denen der belasteten zu vergleichen, wurden sie ebenfalls in den grafischen Darstellungen berücksichtigt. Die Datenverteilung wurde mit Box-Whisker-Plots visualisiert, die fünf Kennzahlen Minimum, unteres Quartil, Median, oberes Quartil und Maximum) sowie den Mittelwert und die Ausreißer anzeigen. Die Box umfasst die mittleren 50 % der Daten und der Median wird durch einen Strich innerhalb der Box markiert. Die Whisker zeigen die Variabilität außerhalb des Quartilsbereichs an. Ein Kreuz in der Box gibt den Mittelwert der Daten an. Datenpunkte, die über oder unter den Whiskern liegen, werden als Ausreißer angesehen und meist durch Punkte dargestellt. Die detaillierten Prüfprotokolle und tabellarischen Ergebnisübersichten sind der **Anlage 5** beigefügt.

Für die Frost-Tau-Wechselversuche wurden die Probekörper über 24 h bei 110 °C bis zur Massekonstanz getrocknet und abgewogen. Nach der Versuchsdurchführung wurden die Probekörper erneut getrocknet und gewogen. Die **Tab. 5.21** und **Tab. 5.2** zeigt eine Übersicht der Massen der Probekörper.

Tab. 5.1: Übersicht der gewogenen bitumengebundenen Probekörper

Probekörper-Nr.	BB1			BB2		
	Masse ¹ [g]	Masse ² [g]	Δm^3 [g]	Masse ¹ [g]	Masse ² [g]	Δm^3 [g]
1	751,7	751,5	-0,2	743,8	743,5	-0,3
2	752,7	752,6	-0,1	723,6	723,1	-0,5
3	709,7	709,4	-0,3	724,3	724,3	0,0
4	735,6	735,3	-0,3	722,2	722,0	-0,2

1 Masse vor Frost-Tau-Wechselversuch
2 Masse nach Frost-Tau-Wechselversuch
3 Masse nach Versuchsdurchführung abzgl. Masse vor Versuchsdurchführung

Tab. 5.2: Übersicht der gewogenen kunstharzgebundenen Probekörper

Probekörper-Nr.	KB1			KB2			KB3		
	Masse ¹ [g]	Masse ² [g]	Δm^3 [g]	Masse ¹ [g]	Masse ² [g]	Δm^3 [g]	Masse ¹ [g]	Masse ² [g]	Δm^3 [g]
1	548,9	548,3	-0,6	559,4	558,9	-0,5	453,3	452,9	-0,4
2	515,5	514,9	-0,6	529,2	528,3	-0,9	468,1	467,2	-0,9
3	533,8	533,2	-0,6	504,9	504,3	-0,6	469,7	469,3	-0,4
4				542,7	541,7	-1,0	464,6	462,6	-2,0

1 Masse vor Frost-Tau-Wechselversuch
2 Masse nach Frost-Tau-Wechselversuch
3 Masse nach Versuchsdurchführung abzgl. Masse vor Versuchsdurchführung

5.3.1 Bitumengebundene Baustoffgemische

Die Ergebnisse der Versuche zum Ermüdungsverhalten des bitumengebundenen Baustoffgemisches BB1 nach der Frost-Tau-Wechsel-Belastung sind **Abb. 5.26** und **Abb. 5.27** zu entnehmen. Es ist festzustellen, dass eine Belastung durch Frost-Tau-Wechsel einen Einfluss auf die Eigenschaften des Materials hat. Die durch Frost-Tau-Wechsel beanspruchten Probekörper weisen bei gleichen Belastungssituationen im Ermüdungsversuch eine geringere Ermüdungslastwechselzahl auf. Die Veränderung des Ermüdungsverhaltens ist bei dem Baustoffgemisch BB1 ausgeprägter als bei BB2.

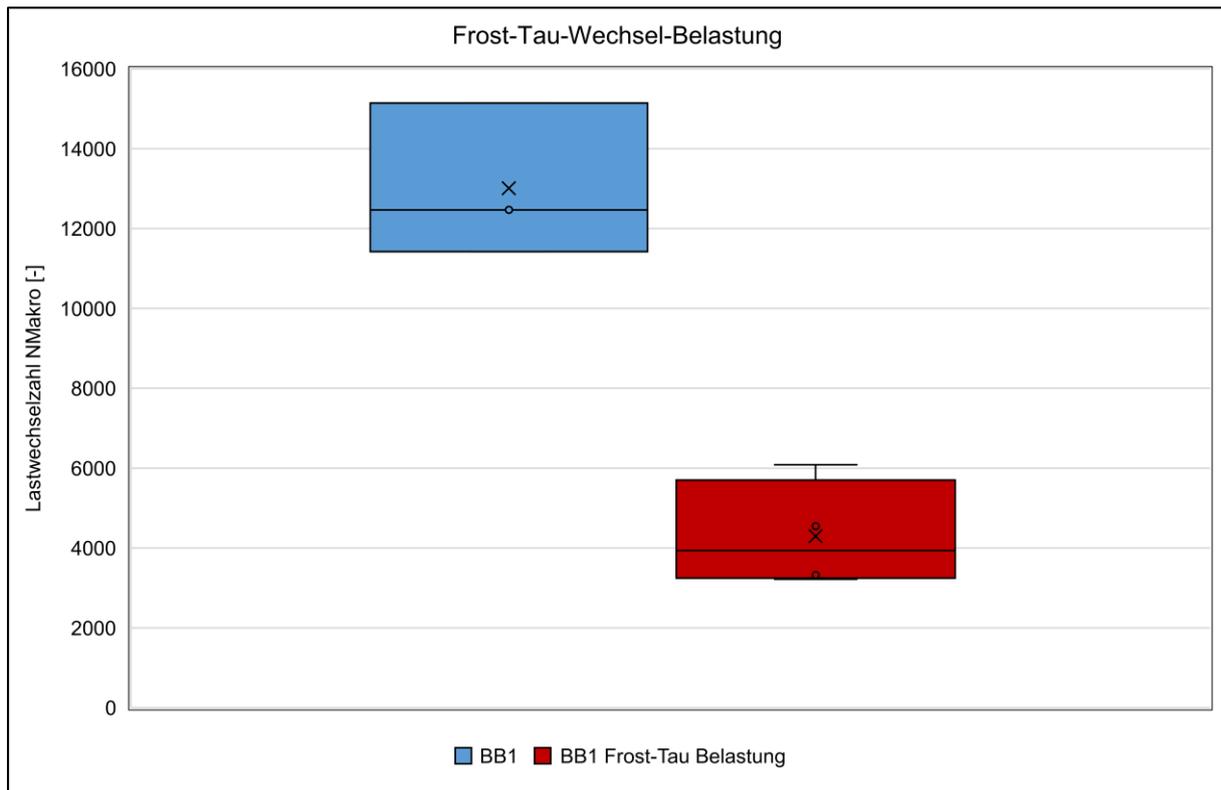


Abb. 5.26: Ergebnisse Baustoffgemisches BB1 mit und ohne Frost-Tau-Belastung

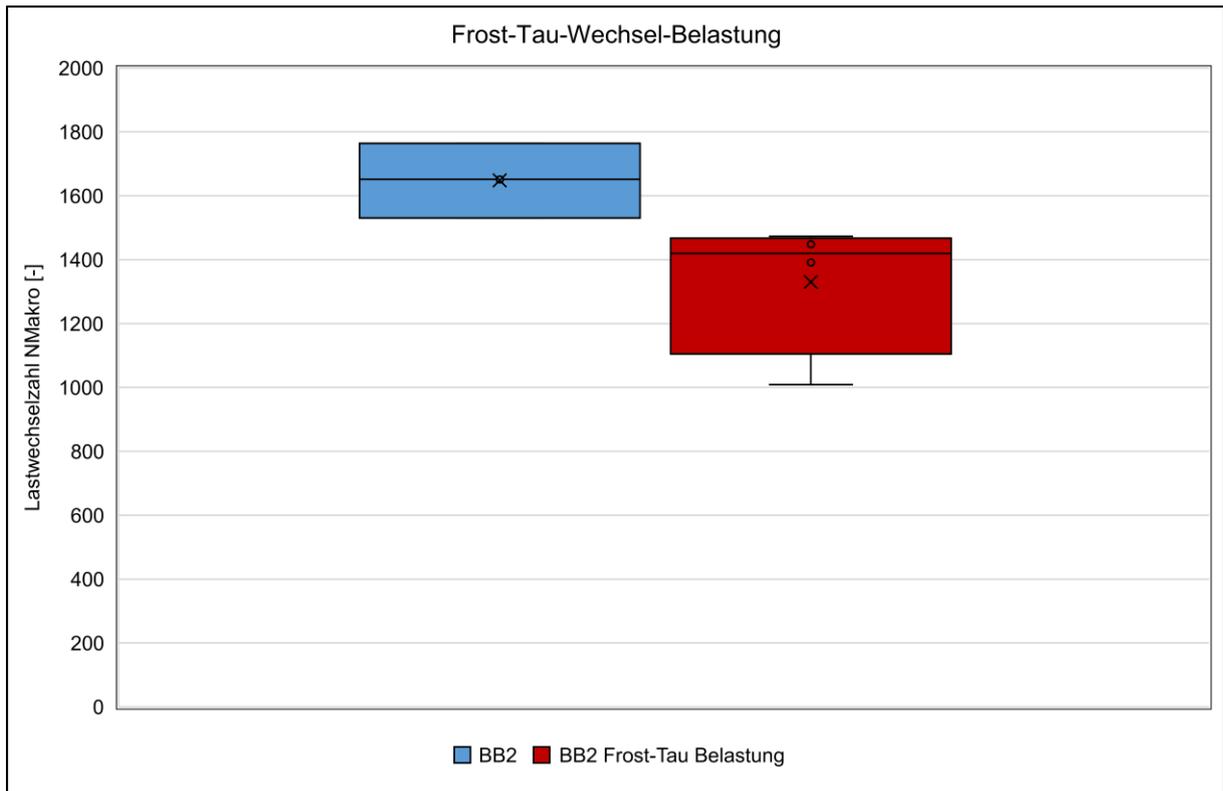


Abb. 5.27: Ergebnisse Baustoffgemisches BB2 mit und ohne Frost-Tau-Belastung

5.3.2 Kunstharzgebundene Baustoffgemische

Die Ergebnisse der Versuche zum Ermüdungsverhalten des kunstharzgebundenen Baustoffgemisches KB1 nach der Frost-Tau-Wechsel-Belastung sind den **Abb. 5.28** bis **Abb. 5.30** zu entnehmen. Dabei konnte kein einheitlicher Einfluss der Frost-Tau-Wechsel-Belastung auf das Ermüdungsverhalten der kunstharzgebundenen Baustoffgemische festgestellt werden. Während sich bei dem Baustoffgemisch KB1 weder der Mittelwert der Ermüdungslastwechselzahlen noch die Variabilität durch die Frost-Tau-Wechsel-Belastung verändern, ist der Unterschied bei den Gemischen KB2 und KB3 als signifikant einzustufen.

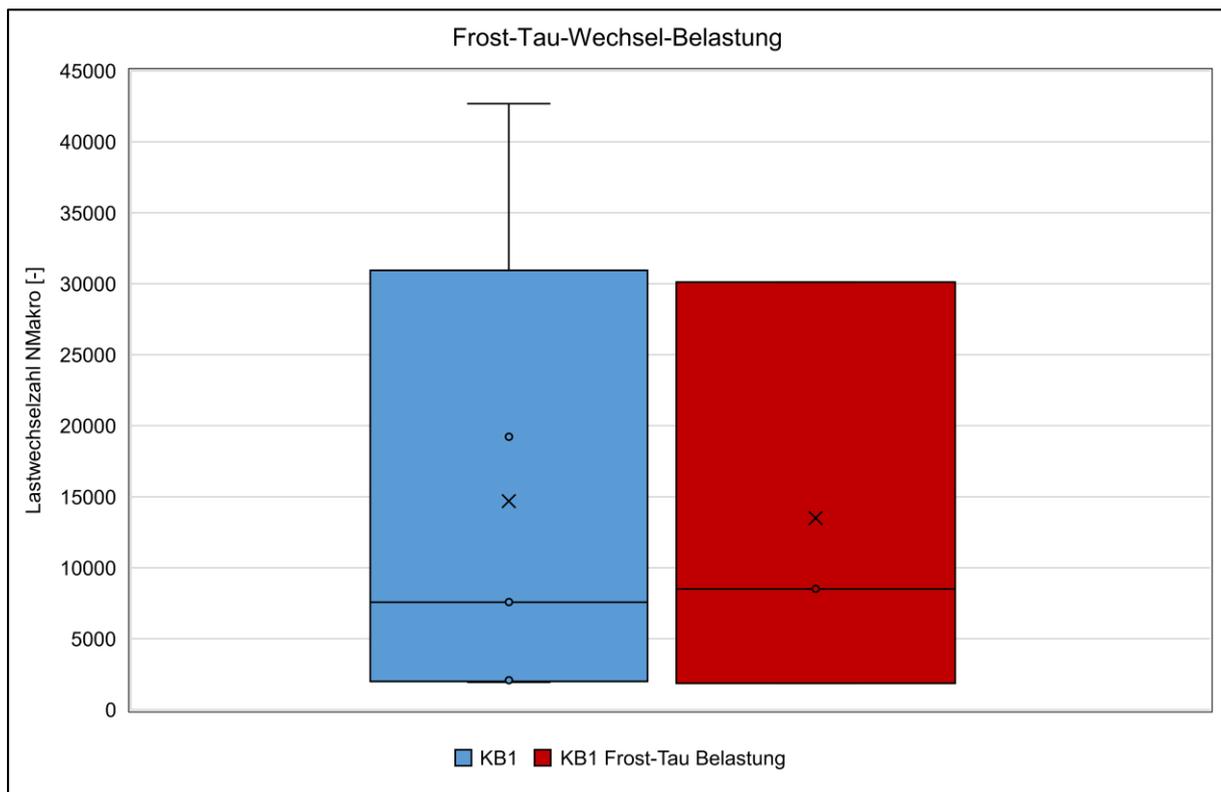


Abb. 5.28: Ergebnisse Baustoffgemisches KB1 mit und ohne Frost-Tau-Belastung

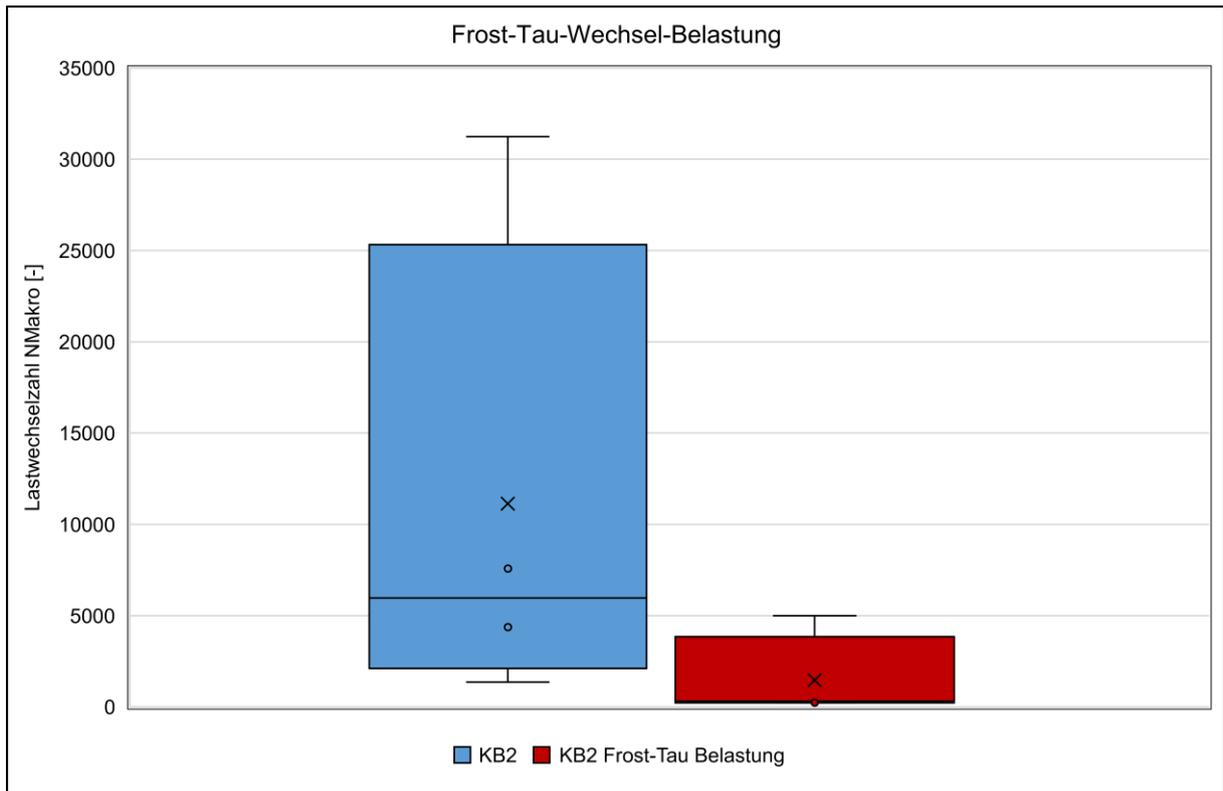


Abb. 5.29: Ergebnisse Baustoffgemisches KB2 mit und ohne Frost-Tau-Belastung

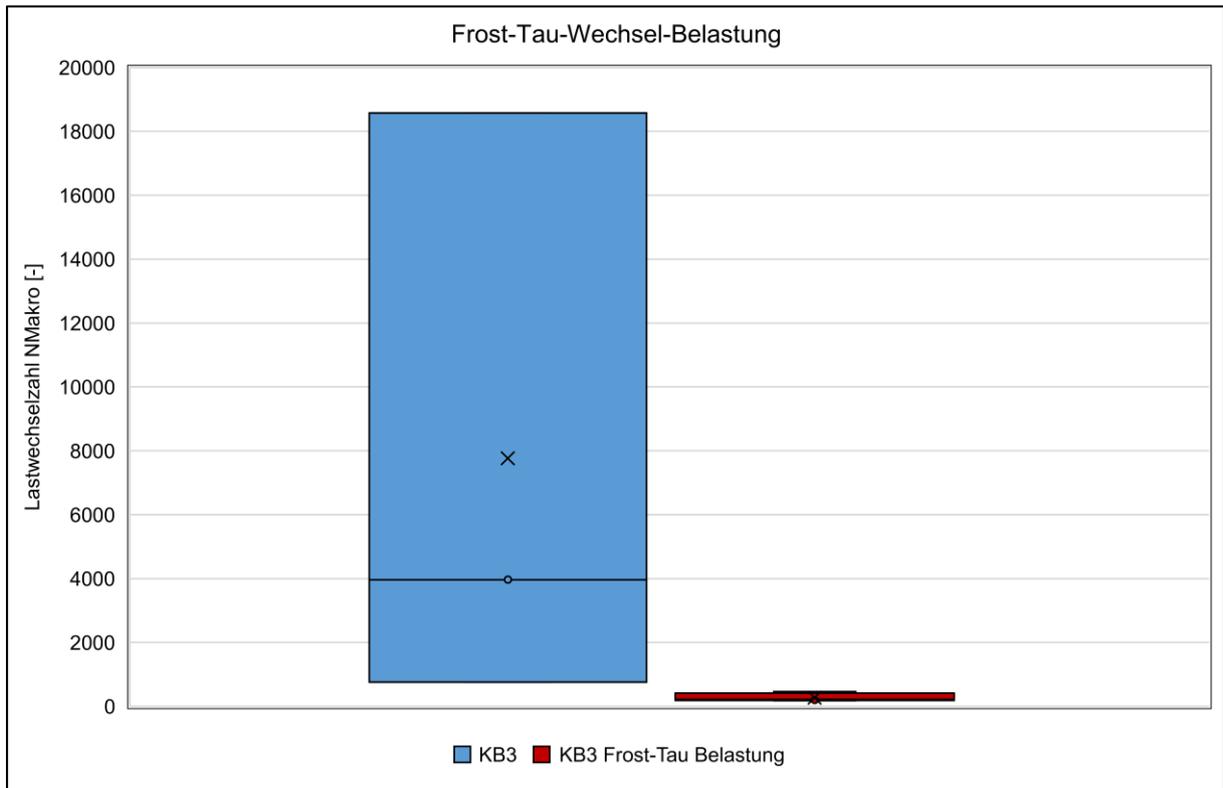


Abb. 5.30: Ergebnisse Baustoffgemisches KB3 mit und ohne Frost-Tau-Belastung

Zusammenfassend wurde festgestellt, dass bei den Baustoffgemischen BB1, BB2, KB2 und KB3 ein Einfluss auf das Ermüdungsverhalten durch die Belastung durch Frost-Tau-Wechsel zu erkennen war. Die Ermüdungslastwechselzahl nahm bei gleicher Laststufe ab, dies kann auf eine Strukturschädigung des Bindemittels zurückzuführen sein, die durch das Eindringen von Wasser in die Poren der Baustoffgemische und dessen anschließendes Gefrieren entsteht.

Das Baustoffgemisch KB1 zeigte, dass die Frost-Tau-Wechselbelastung keinen signifikanten Einfluss auf das Ermüdungszustand des Baustoffes hat.

Die **Abb. 5.31** zeigt die Ergebnisse in einem Diagramm.

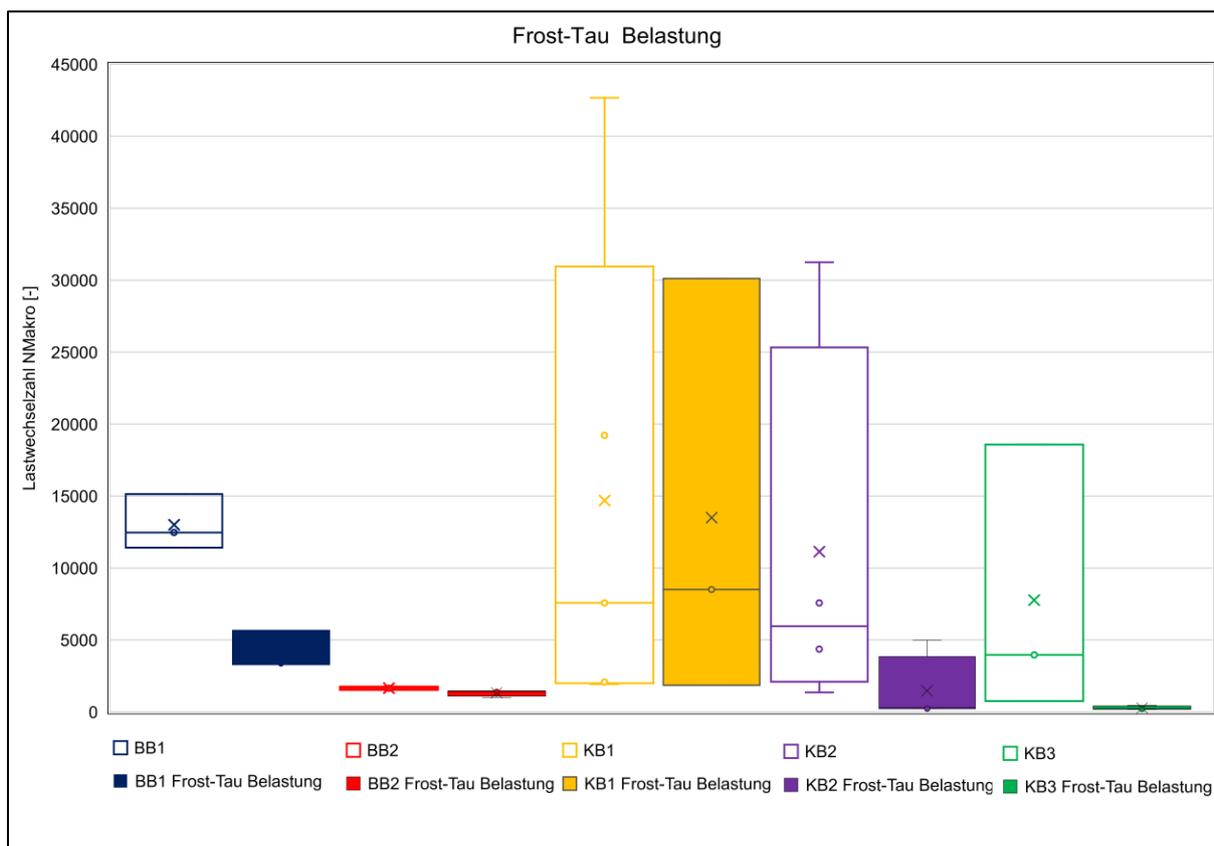


Abb. 5.31: Ergebnisse mit und ohne Frost-Tau-Belastung

5.4 Stempeleindringversuche zur Beschreibung des Verformungsverhaltens der gebundenen und ungebundenen Baustoffgemische

Nachfolgend werden die Ergebnisse der adaptierten Stempeleindringversuche aufgeführt. Die Versuche dienen der Beurteilung der Materialien bezüglich des Widerstandes gegenüber bleibenden Verformungen. Dabei wurden die bitumen-, kunstharzgebundenen und ungebundene Baustoffgemische untersucht. Die Versuche wurden bei zwei unterschiedlichen Prüftemperaturen durchgeführt, bei 20°C und 50°C. Die Ergebnisse der Versuche wurden in Diagrammen dargestellt, welche eine visuelle Auswertung ermöglichen. Die Diagramme zeigen in Balken die Krafteinwirkung in N, die bis zum Erreichen einer definierten Verformung von 1 mm aufgebracht wurde. Außerdem ist der Mittelwert \pm der Standardabweichung dargestellt. Die Standardabweichung ist ein Maß für die Streuung von Daten um ihren Mittelwert. Sie gibt an, wie stark die einzelnen Messwerte streuen. Je größer die Standardabweichung ist, desto größer ist die Variabilität der Daten.

Die Prüfprotokolle sind im **Anlage 6** aufgeführt und bieten eine detaillierte Zusammenfassung der durchgeführten Stempeleindringversuche.

5.4.1 Bitumengebundene Baustoffgemische

Die Auswertungen der Ergebnisse für das Baustoffgemisch BB1 und BB2 zeigten – wie zu erwarten – den signifikanten Einfluss der Temperatur auf das Verformungsverhalten der Baustoffgemische. So konnte bei höherer Prüftemperatur eine Stempeleindringtiefe von 1 mm bereits bei einer geringeren Kraftaufbringung erzielt werden im Vergleich zur niedrigeren Prüftemperatur, vgl. **Abb. 5.32** und **Abb. 5.33**. Darüber hinaus zeigte sich, dass BB2 einen durchaus deutlich geringeren Widerstand gegenüber bleibenden Verformungen aufweist als BB1.

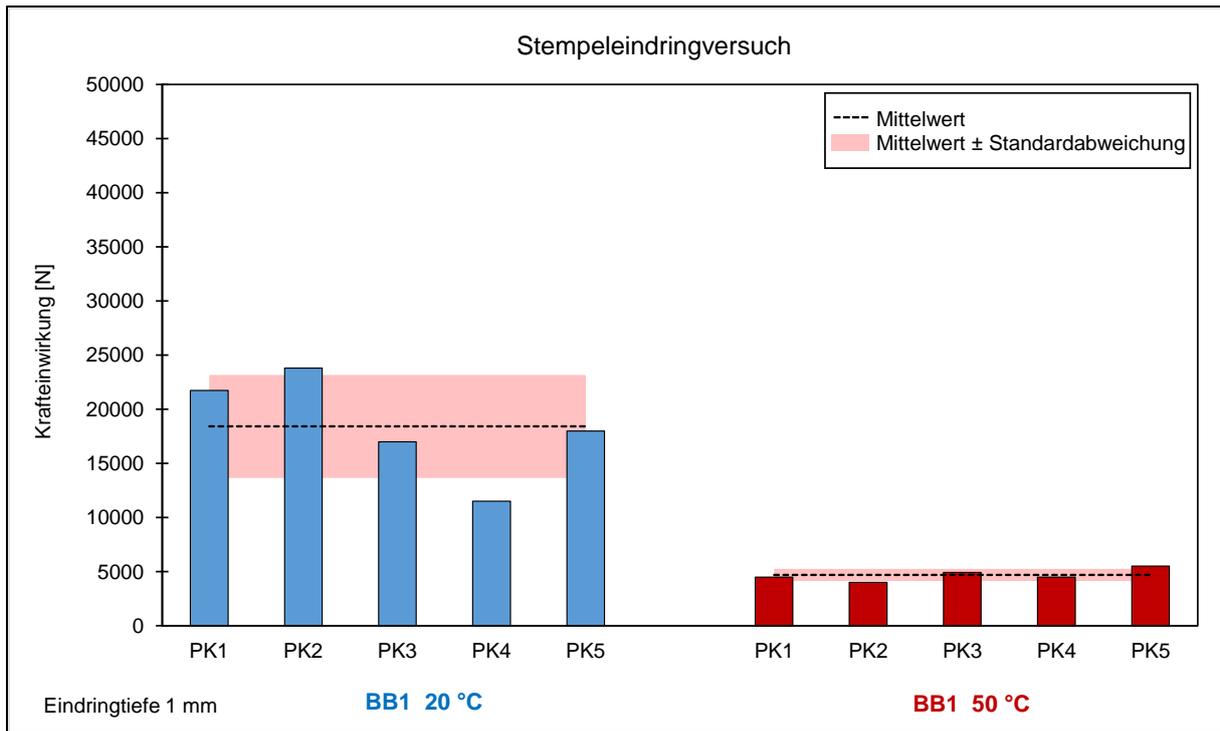


Abb. 5.32: Ergebnisse Baustoffgemisch BB1 bei 20°C und 50°C

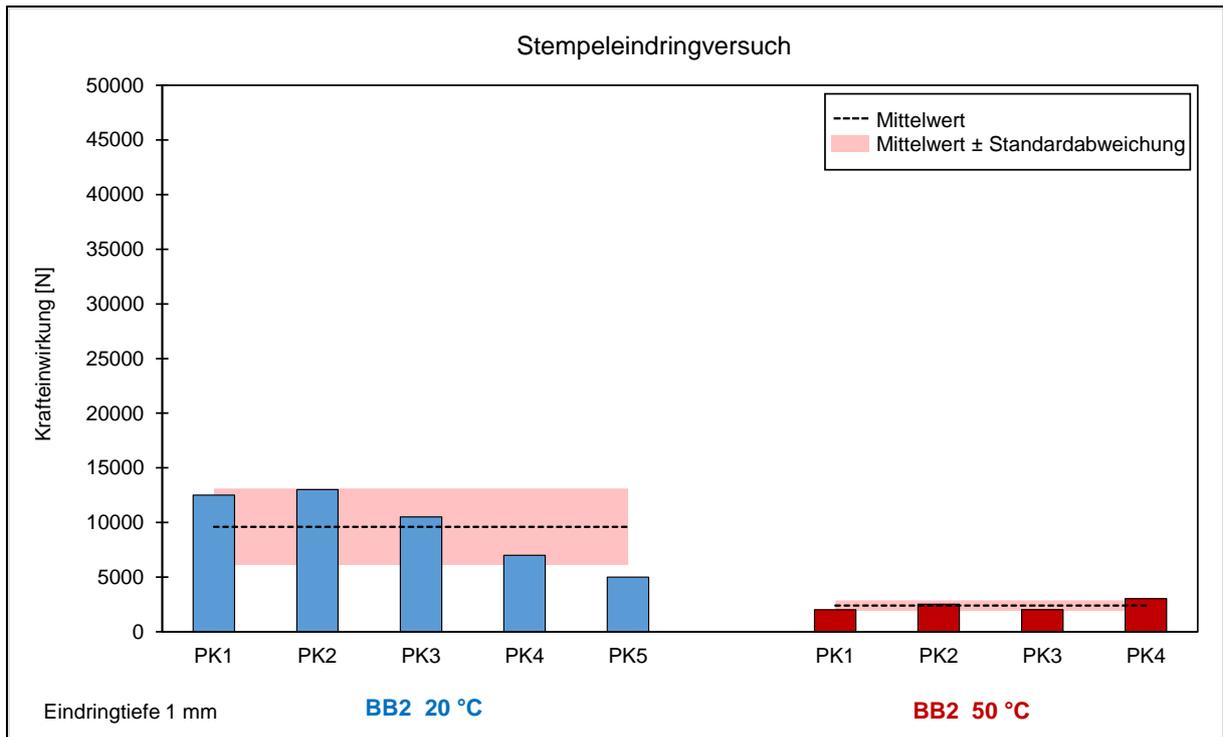


Abb. 5.33: Ergebnisse Baustoffgemisch BB2 bei 20°C und 50°C

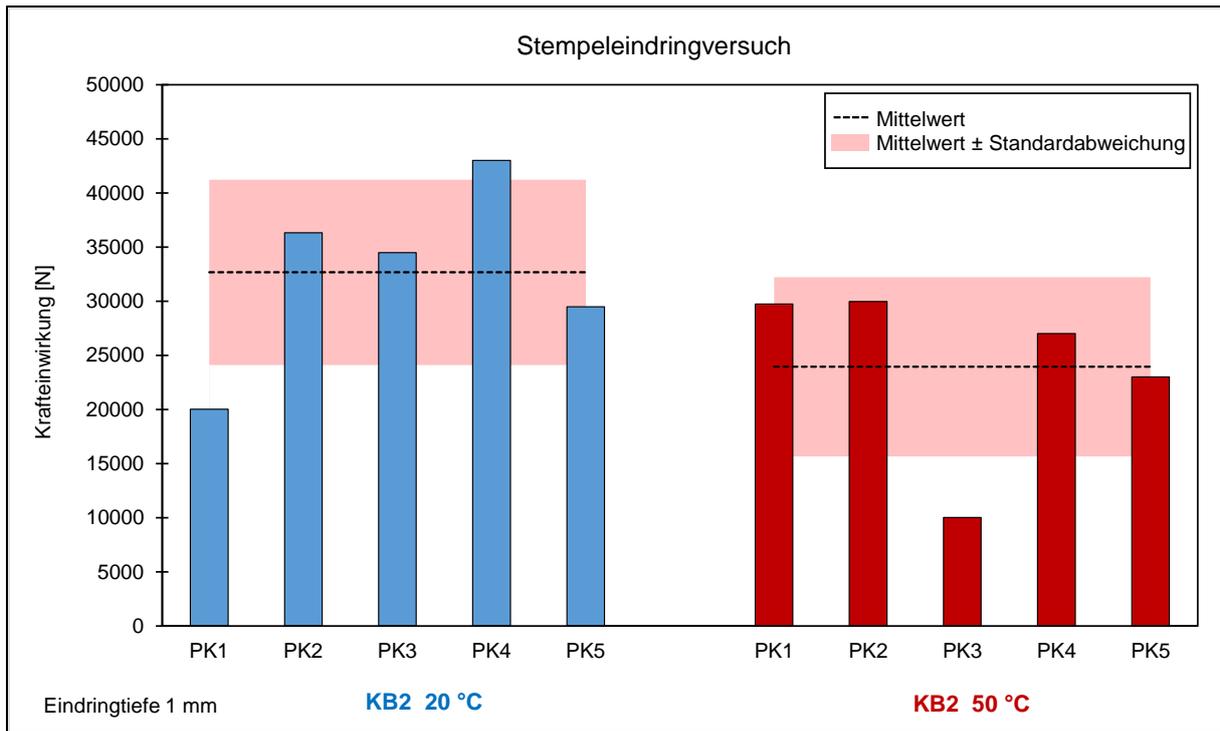


Abb. 5.35: Ergebnisse Baustoffgemisch KB2 bei 20°C und 50°C

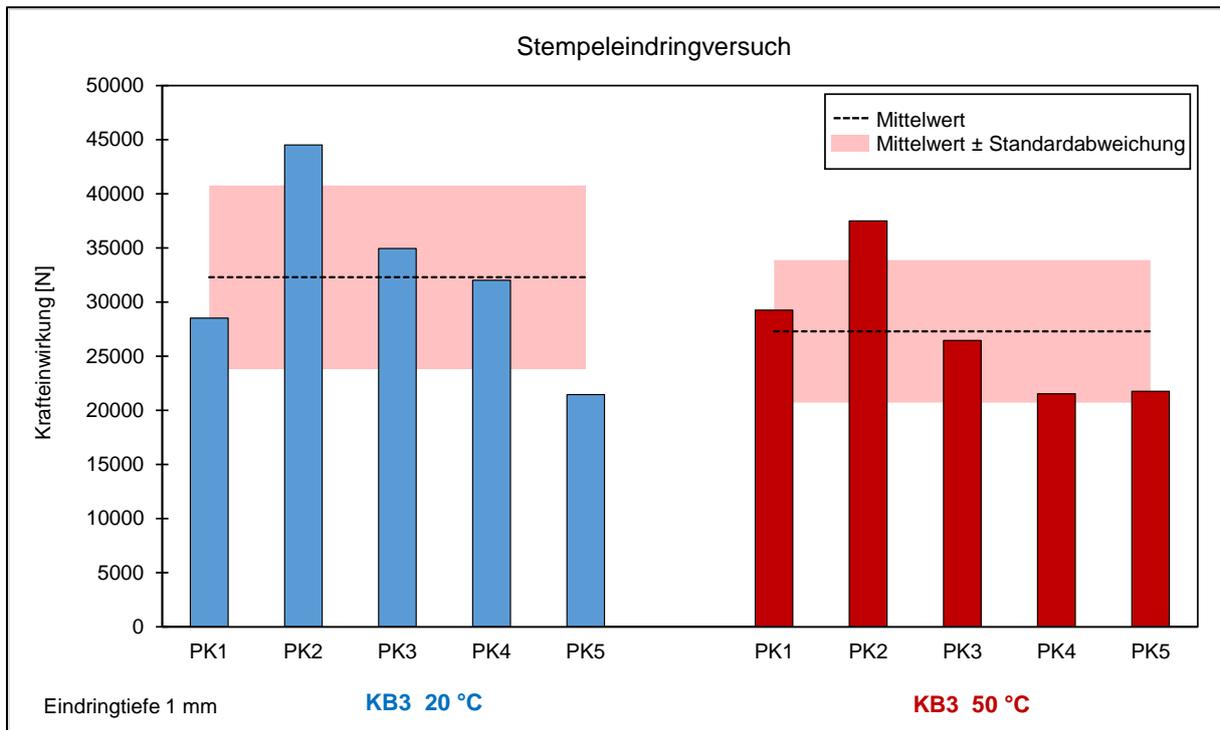


Abb. 5.36: Ergebnisse Baustoffgemisch KB3 bei 20°C und 50°C

5.4.3 Ungebundene Baustoffgemische

Die Untersuchungen zu den ungebundenen Baustoffgemischen UB1 und UB2 zeigten, dass die Temperatur, wie zu erwarten, keinen Einfluss auf den Widerstand gegenüber bleibenden Verformungen des Materials hat. Wie aus den Ergebnissen hervorgeht, ist die Kraftaufbringung bei beiden untersuchten Temperaturen ähnlich, vgl. **Abb. 5.37** und **Abb. 5.38**.

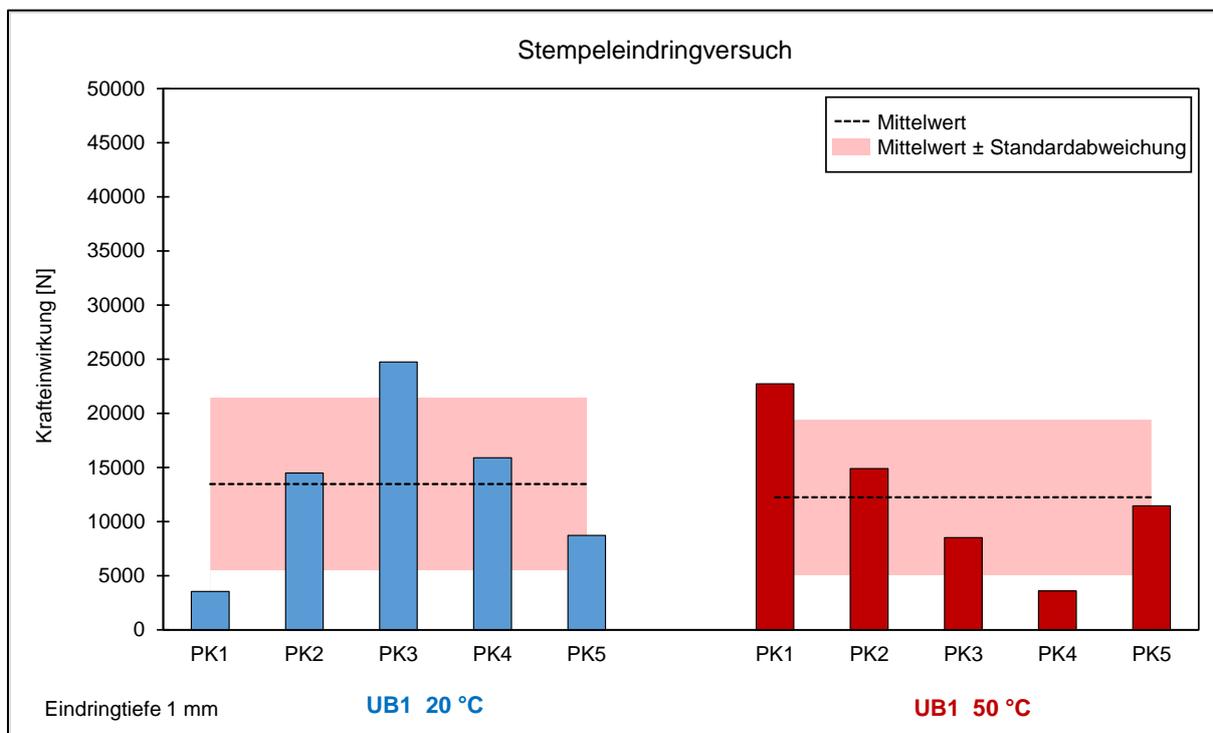


Abb. 5.37: Ergebnisse Baustoffgemisch UB1 bei 20°C und 50°C

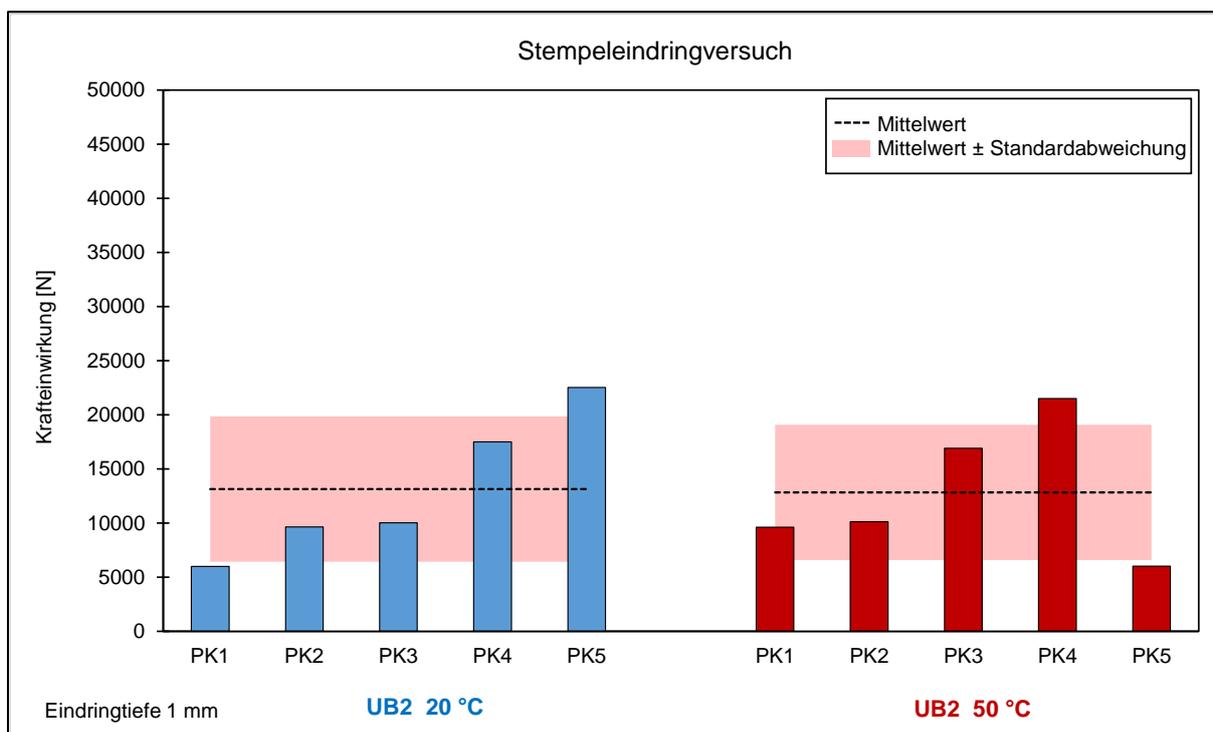


Abb. 5.38: Ergebnisse Baustoffgemisch UB2 bei 20°C und 50°C

Anmerkung: Die Resultate der Stempeleindringversuche offenbaren eine deutliche Inhomogenität in Bezug auf die ungebundenen Materialien. Die Ergebnisse sind durch eine erhebliche Varianz gekennzeichnet, was auf eine erhebliche Schwankungsbreite hindeutet.

Ergänzende Untersuchungen mit Wassergehalt

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurde zudem der Einfluss von verschiedenen Wassergehalten auf das ungebundene Baustoffgemisch UB1 untersucht. Hierfür wurden verschiedene Probekörper in Metallformen eingebracht und anschließend verdichtet, um eine definierte Menge an Wasser in die Proben einzubringen. Die untersuchten Probekörper wurden in drei Gruppen eingeteilt: eine Gruppe ohne Wassergehalt, eine Gruppe mit einem Wassergehalt von 10 Masseprozent und eine Gruppe mit einem Wassergehalt von 30 Masseprozent. Die **Abb. 5.39** zeigt Probekörper vor der Lastaufbringung ohne Wassergehalt und mit einem Wassergehalt von 30 Masseprozent (oben) und nach der Lastaufbringung zum Versuchsende (unten).



Abb. 5.39: UB1 ohne Wassergehalt und mit Wassergehalt 30 Masse% unbeprobt (oben), nach Stempeleindringversuch (unten) [Bromberg, 2022]

In Voruntersuchungen wurde festgestellt, dass die Eindringtiefe von 1 mm bei Proben mit Wassergehalt als Versuchsrandbedingung ungeeignet war, da der Widerstand der ungebundenen Baustoffgemische gegenüber bleibenden Verformungen stark mit zunehmendem Wassergehalt des Baustoffgemisches abnimmt. Diese Eindringtiefe wurde schon unmittelbar nach der Lastaufbringung erreicht. Um dennoch gut vergleichbare Prüfergebnisse zu erhalten, wurde die Eindringtiefe schrittweise erhöht. Dabei wurden verschiedene Eindringtiefen untersucht und schließlich eine Eindringtiefe von 10 mm ausgewertet und verglichen. Diese Tiefe erwies sich als ausreichend, um eine zuverlässige Aussage über die Qualität des Materials zu treffen und die Auswirkungen des Wassergehalts auf die Materialfestigkeit zu beurteilen. Die Untersuchungsergebnisse zeigen den signifikanten Einfluss des Wassergehalts des Baustoffgemisches auf dessen Verformungswiderstand.

Mit zunehmendem Wassergehalt nahm der Widerstand des Baustoffgemisches gegen bleibende Verformungen deutlich ab, vgl. **Abb. 5.40**. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass ein zu hoher Wassergehalt, wie er auch bei Hochwasserereignissen und / oder Starkregenereignissen auftreten kann, zu einer deutlichen Verschlechterung des Verformungswiderstandes des Materials und somit zu einer Reduktion der Dauerhaftigkeit der daraus hergestellten Konstruktion führt. Zudem wurde der Mittelwert und die Standardabweichung mit in die Datenreihen eingetragen. Zu erkennen ist, dass die Ergebnisse der Versuchsreihen mit Wassergehalt eine etwas geringe Streuung aufweisen.

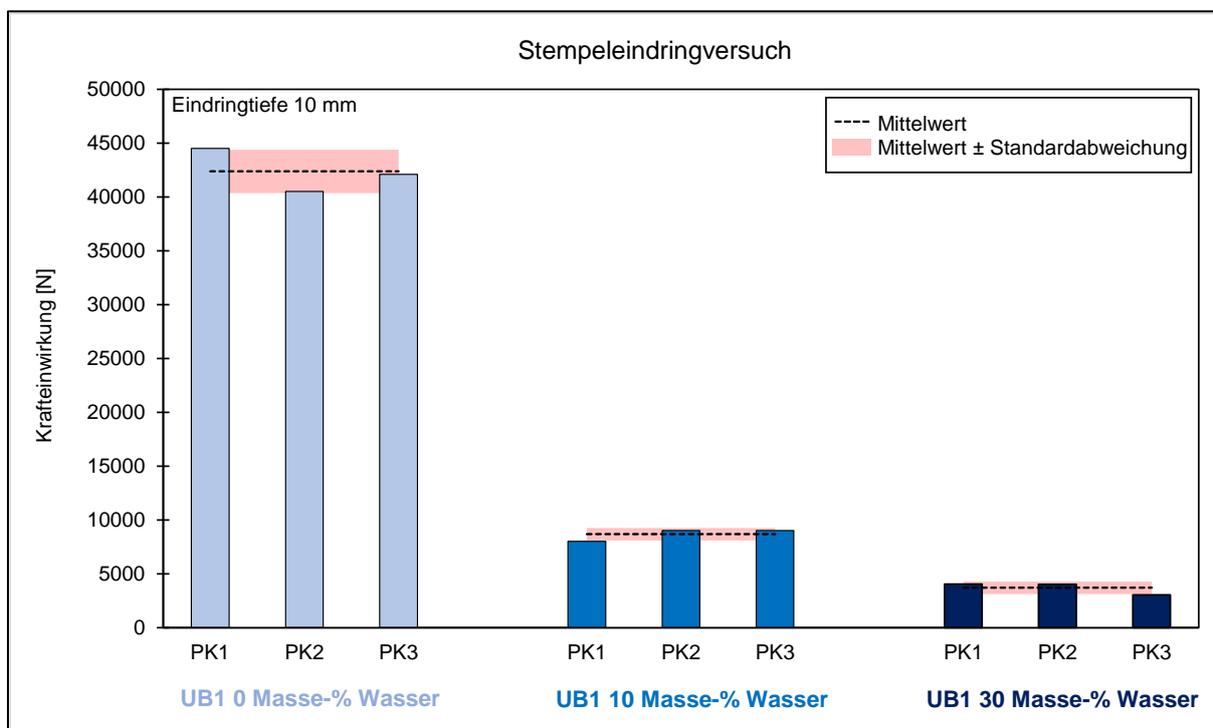


Abb. 5.40: Ergebnisse Baustoffgemisch UB1 mit unterschiedlichen Wassergehalten

Die Ergebnisse der Stempel Eindringversuche zeigten, dass die Temperatur einen Einfluss auf den Widerstand gegen bleibende Verformungen der untersuchten bitumengebundenen und kunstharzgebundenen Baustoffgemische hat. Die Variabilität der Versuchsergebnisse ist bei den untersuchten kunstharzgebundenen und ungebundenen Baustoffgemischen am größten. Der Box-Whisker-Plot in **Abb. 5.41** veranschaulicht die Unterschiede zwischen den verschiedenen Materialien und Temperaturen.

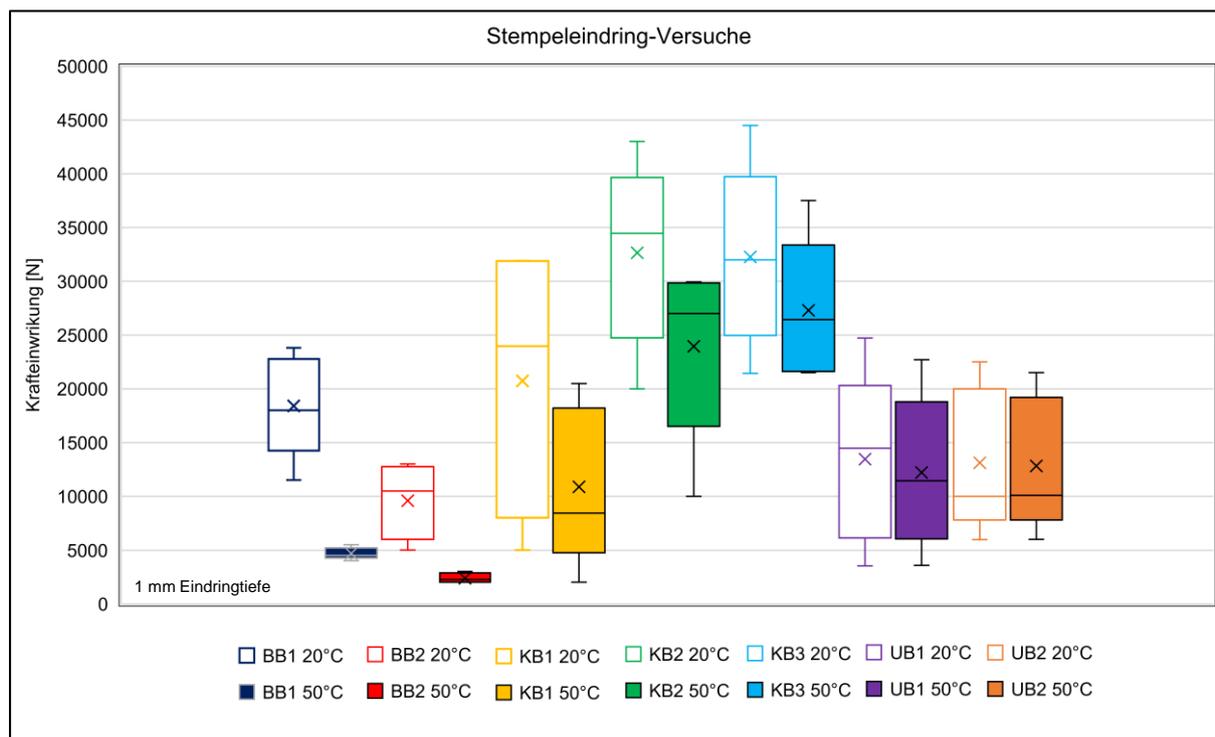


Abb. 5.41: Ergebnisse der Stempel Eindringversuche der Baustoffgemische ohne Wassergehalte

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurde zudem der Einfluss von verschiedenen Wassergehalten auf das ungebundene Baustoffgemisch UB1 untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigten, dass der Wassergehalt des Baustoffgemisches einen signifikanten Einfluss auf dessen Verformungsverhalten hat. Dies wurde durch einen Vergleich der Proben mit und ohne Wassergehalt deutlich. Bei Proben mit einem Wassergehalt von 10 Masseprozent nahm der Verformungswiderstand des Baustoffgemisches bereits deutlich ab.

5.5 Erosionswiderstand gegenüber strömendem Wasser

Für die Einschätzung des Widerstandsverhaltens gegen strömendes Wasser wurde die Höhe der Probekörper an jeweils drei Messpunkten über die Zeit erfasst. Die Messpunkte befanden sich mittig des Probekörpers längs in Fließrichtung an den folgenden Bereichen, vgl. **Abb. 5.39** (links):

- *Messpunkt 1*: rd. 2 cm vom linken Rand des Probekörpers entfernt
- *Messpunkt 2*: mittig des Probekörpers
- *Messpunkt 3*: rd. 2 cm vom rechten Rand des Probekörpers entfernt.

Die **Abb. 5.42** (rechts) zeigt einen überströmten Probekörper in der Versuchsrinne. Die gemessenen Veränderungen Δh (Erosion) am Probekörper wurden als Differenz der Probekörperhöhe zum Ablesezeitpunkt abzüglich der Probekörperhöhe am Anfangszeitpunkt (Probekörper trocken) ermittelt:

$$\Delta h = h_t (\text{Probekörperhöhe zum Ablesezeitpunkt}) - h_0 (\text{Probekörperhöhe Anfangszeitpunkt}) \quad \text{Gl. 5}$$

Negative Werte zeigten dabei Erosionserscheinungen an, da ein Abtrag von Material durch die Strömung erfolgte.

Eine tabellarische Übersicht der Messwerte ist der **Anlage 7** zu entnehmen.

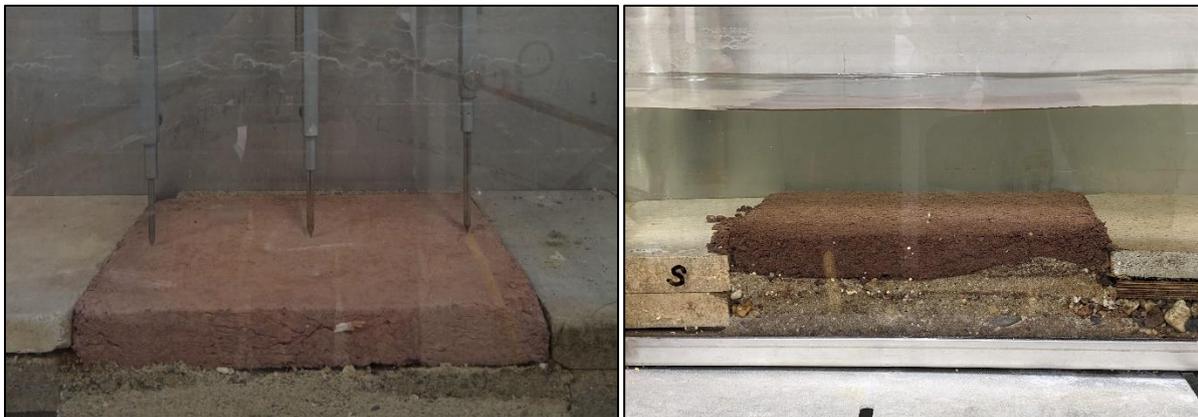


Abb. 5.42: Messpunkte am Probekörper, eingebauter PK (rechts) [Bromberg, 2022]

5.5.1 Gebundene Baustoffgemische BB1, BB2, KB1, KB2, KB3

Die Versuche zur Einschätzung des Widerstandsverhaltens gegen strömendes Wasser für die gebundenen Baustoffgemische BB1, BB2, KB1, KB2 und KB3 ergaben, dass über die gesamte Versuchsdauer von 120 Stunden keine Veränderung der Probekörperhöhen festzustellen war. Alle gebundenen Baustoffgemische blieben stabil, es traten keine Erosionserscheinungen auf. Nach Versuchsende wurden keine ausgespülten Bestandteile in der Rinne vorgefunden. Dies zeigt, dass die Baustoffgemische gegenüber strömendem Wasser widerstandsfähig sind und keine signifikante Auswaschung von Material auftritt. Die **Tab. 5.3** zeigt zusammenfassend die Ergebnisse für die bitumen- und kunstharzgebundene Baustoffgemische bei einer Fließgeschwindigkeit von $v = 0,6 \text{ m/s}$ zum Versuchsende $t = 120 \text{ h}$.

Tab. 5.3: Ergebnisse der Versuche zum Erosionswiderstand für bitumen- und kunstharzgebundene Baustoffgemische bei $v = 0,6 \text{ m/s}$

	t	v	PK 1			PK 2			PK 3		
			Messpunkt 1	Messpunkt 2	Messpunkt 3	Messpunkt 1	Messpunkt 2	Messpunkt 3	Messpunkt 1	Messpunkt 2	Messpunkt 3
			Δh								
	[h]	m/s	[cm]								
BB1	120	0,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BB2	120	0,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
KB1	120	0,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
KB2	120	0,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
KB3	120	0,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

5.5.2 Ungebundenes Baustoffgemisch UB1

In den folgenden Tabellen sind die Messergebnisse über eine Dauer von je $t = 120$ h aufgelistet. Dabei zeigt **Abb. 5.43** die Messergebnisse für eine Fließgeschwindigkeit von $v = 0,3$ m/s, **Abb. 5.44** die Messergebnisse für $v = 0,4$ m/s und **Abb. 5.45** die Messergebnisse für $v = 0,6$ m/s.

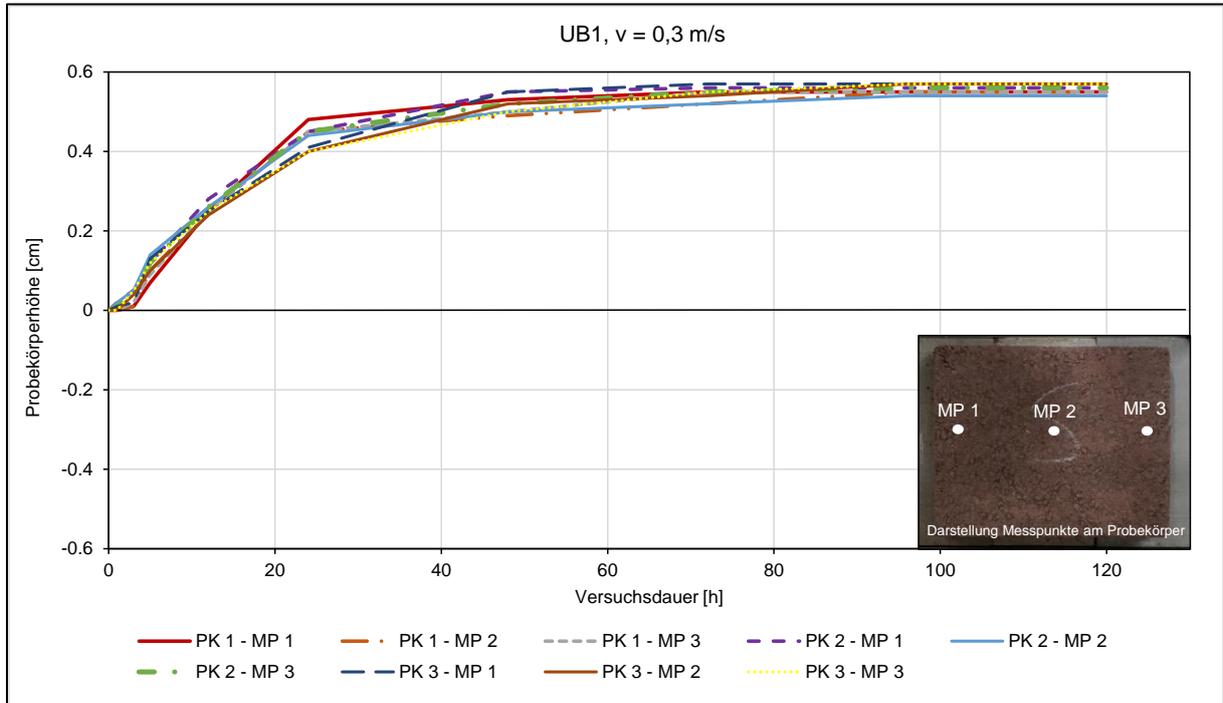


Abb. 5.43: Ergebnisse der Versuche zum Erosionswiderstand für UB1 bei $v = 0,3$ m/s

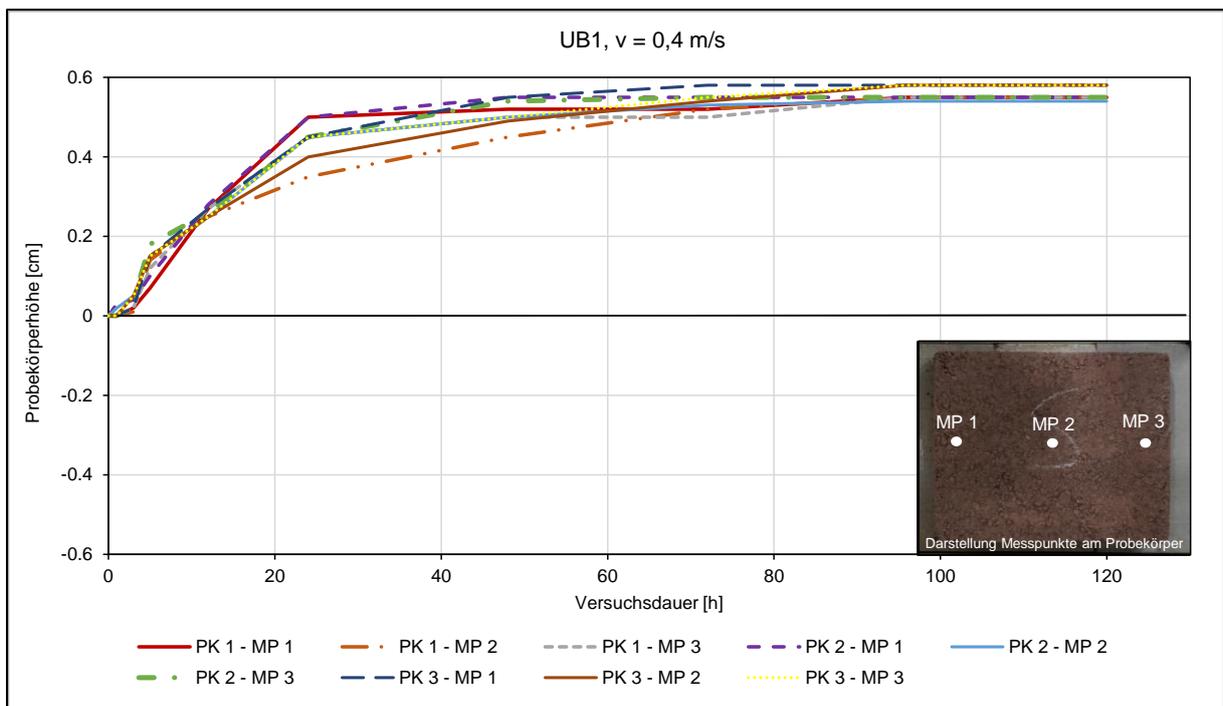


Abb. 5.44: Ergebnisse der Versuche zum Erosionswiderstand für UB1 bei $v = 0,4$ m/s

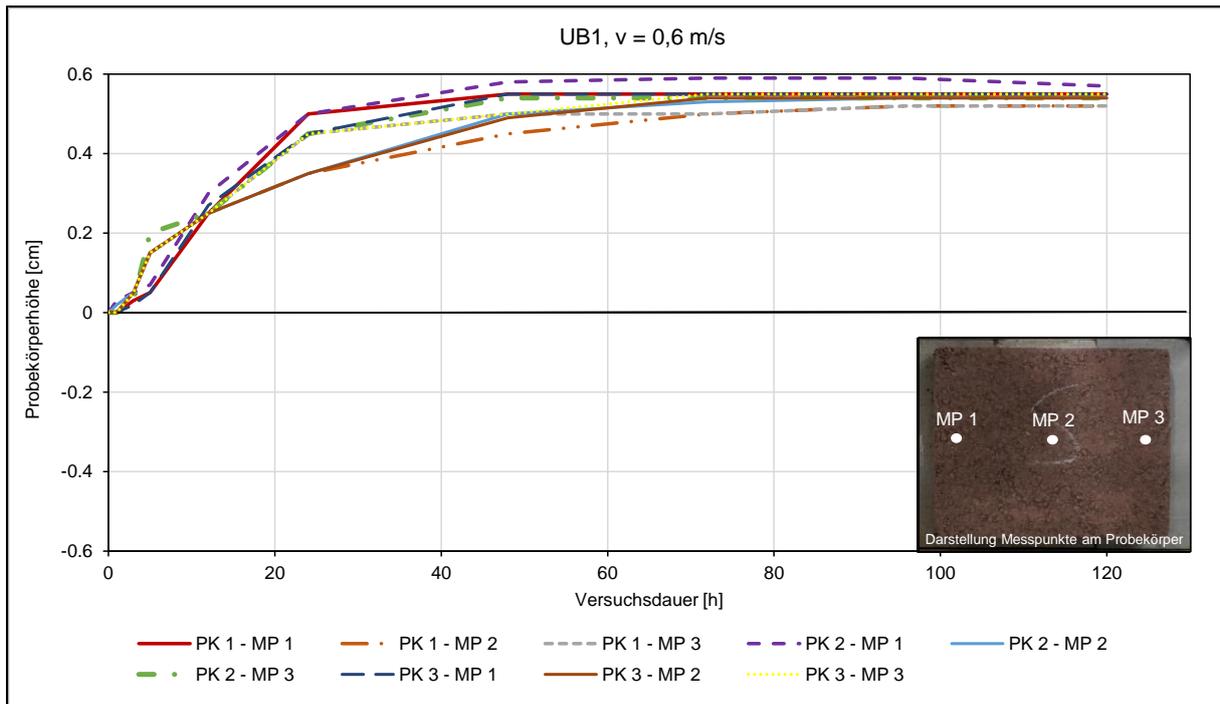


Abb. 5.45: Ergebnisse der Versuche zum Erosionswiderstand für UB1 bei $v = 0,6 \text{ m/s}$

Zu erkennen ist, dass beim Material UB1 mit pflanzlich-mineralischen Binder für alle Fließgeschwindigkeiten eine Erhöhung der Probekörperoberkante zu verzeichnen war. Die Höhe nahm bis Versuchsende durchschnittlich um $\Delta h = rd. 0,5 \text{ cm}$ über die gesamte Länge des Probekörpers zu. Dieses Materialverhalten kann mit dem pflanzlich-mineralischen Binder in Verbindung gebracht werden. Es ist zu vermuten, dass dieser Binder bei Kontakt mit Wasser quillt und sich deshalb das Volumen der PK nach dem Kontakt mit Wasser vergrößerte. Erosion war lediglich an besonders strömungsexponierten Bereichen, wie bspw. an den Rändern oder an den Ecken des PK, zu verzeichnen. Die Probekörpermitte blieb dagegen stabil. Es war keine Erosion in größerem Umfang festzustellen. Nach Versuchsende wurden jedoch Feinbestandteile aus den Probekörpern an der Rinnensohle vorgefunden, sodass davon auszugehen ist, dass Feinbestandteile aus dem Probekörper heraus transportiert wurden, vgl. **Abb. 5.46**.



Abb. 5.46: Erodirtes Material nach Versuchsende UB1 [Bromberg, 2022]

Abb. 5.47 zeigt exemplarisch Draufsichten im Versuchsablauf mit einer Fließgeschwindigkeit von $v = 0,6 \text{ m/s}$ zu den Zeitpunkten $t = 0 \text{ h}$, $t = 24 \text{ h}$, $t = 48 \text{ h}$, $t = 72 \text{ h}$, $t = 96 \text{ h}$ und $t = 120 \text{ h}$. Auch hier ist zu erkennen, dass das Material UB1 nicht flächig erodiert wurde, sondern lediglich lokale Auswaschungen aufwies.

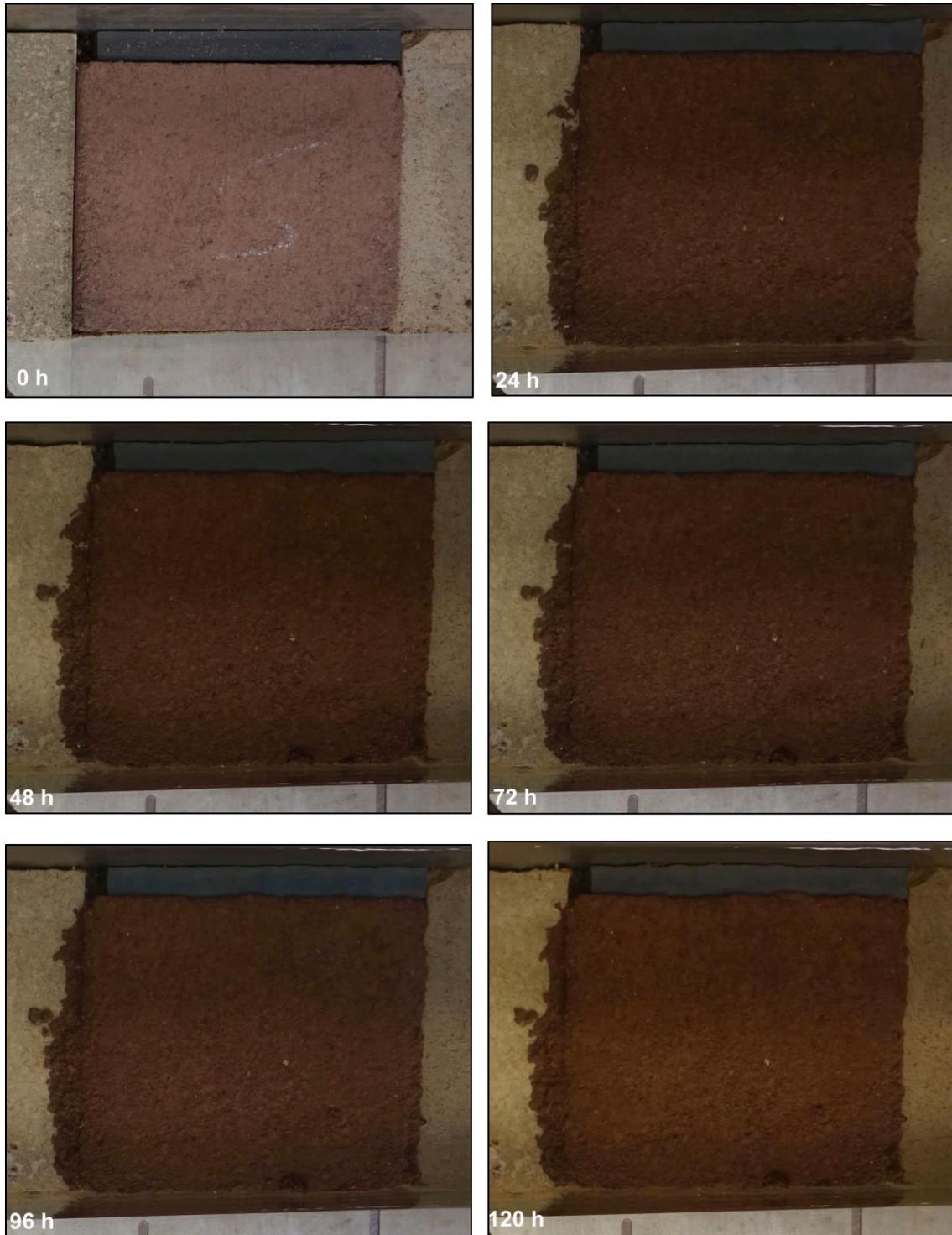


Abb. 5.47: Versuchs zum Erosionswiderstand für das Material UB1 [Bromberg, 2022]

Die Auswertung zeigte, dass insbesondere die groben Kornbestandteile des Materials UB1 nicht durch die Strömung abtransportiert wurden. Um abzuschätzen bei welchen Fließgeschwindigkeiten sich das Kornmaterial von UB1 bewegt, wurde das sog. Hjulström-Diagramm verwendet. Das Diagramm besteht aus zwei Achsen: der horizontalen Achse, die die Geschwindigkeit des Wasserflusses darstellt, und der vertikalen Achse, die die Größe der Sedimentpartikel angibt. Die Kurve, die das Diagramm teilt, zeigt den kritischen Punkt, an dem das Wasser die Fähigkeit hat, Sedimente zu transportieren. Wenn die Fließgeschwindigkeit des Wassers unterhalb der Kurve liegt, ist die Transportkapazität des Wassers zu gering, um die Sedimente zu bewegen. Wenn die Fließgeschwindigkeit jedoch über der Schwelle liegt, kann das Wasser die Sedimente aufnehmen und transportieren. Daher ist es mit Hilfe des Diagramms möglich zu ermitteln, welche Fließgeschwindigkeit erforderlich ist, damit mineralische Kornbestandteile von einer Strömung bewegt werden.

UB1 wies die Körnung 0/8 und somit ein Größtkorn von rd. 8 - 10 mm Durchmesser auf. Nach dem Hjulström-Diagramm werden Kornbestandteile in dieser Größenordnung erst bei Fließgeschwindigkeiten $v \geq$ rd. 0,8 m/s bis 1,0 m/s infolge eines Strömungsangriffs bewegt. **Abb. 5.48** zeigt ein entsprechendes Hjulström-Diagramm. Die darin eingezeichnete rote Markierung kennzeichnet den Bereich für das Material UB1.

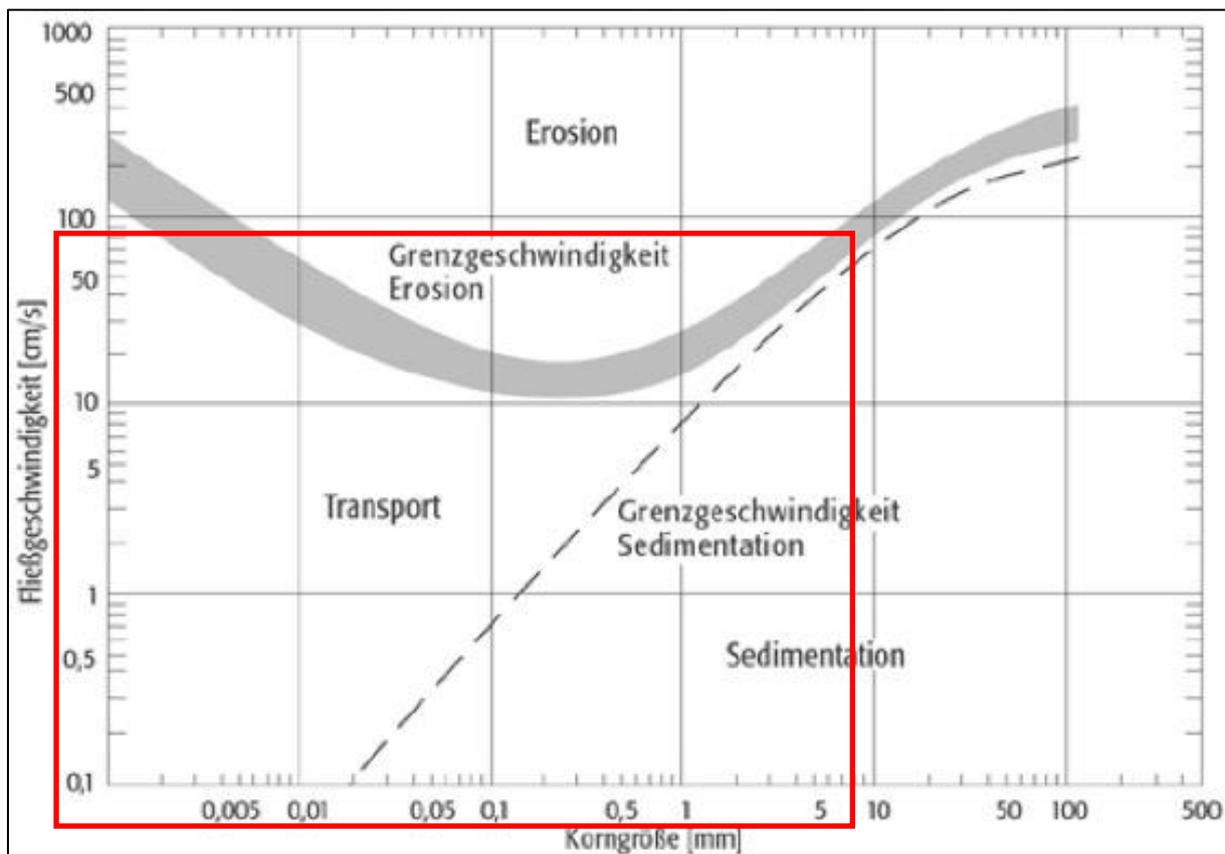


Abb. 5.48: Hjulström Diagramm, [Quelle: Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2021, verändert]

5.5.3 Ungebundenes Baustoffgemisch UB2

In den folgenden Tabellen sind die Messergebnisse über eine Dauer von je $t = 120$ h aufgelistet. Dabei zeigt **Abb. 5.49** die Messergebnisse für eine Fließgeschwindigkeit von $v = 0,3$ m/s, **Abb. 5.50** die Messergebnisse für $v = 0,4$ m/s und **Abb. 5.51** für $v = 0,6$ m/s.

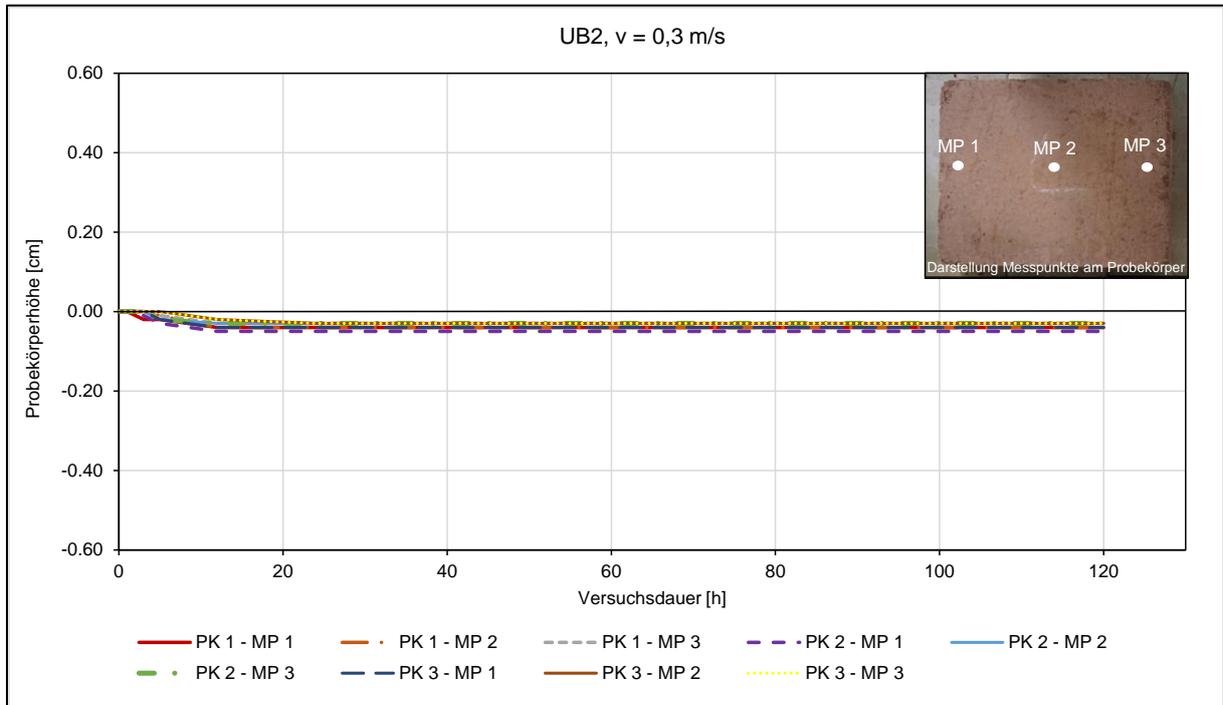


Abb. 5.49: Ergebnisse der Versuche zum Erosionswiderstand für UB2 bei $v = 0,3$ m/s

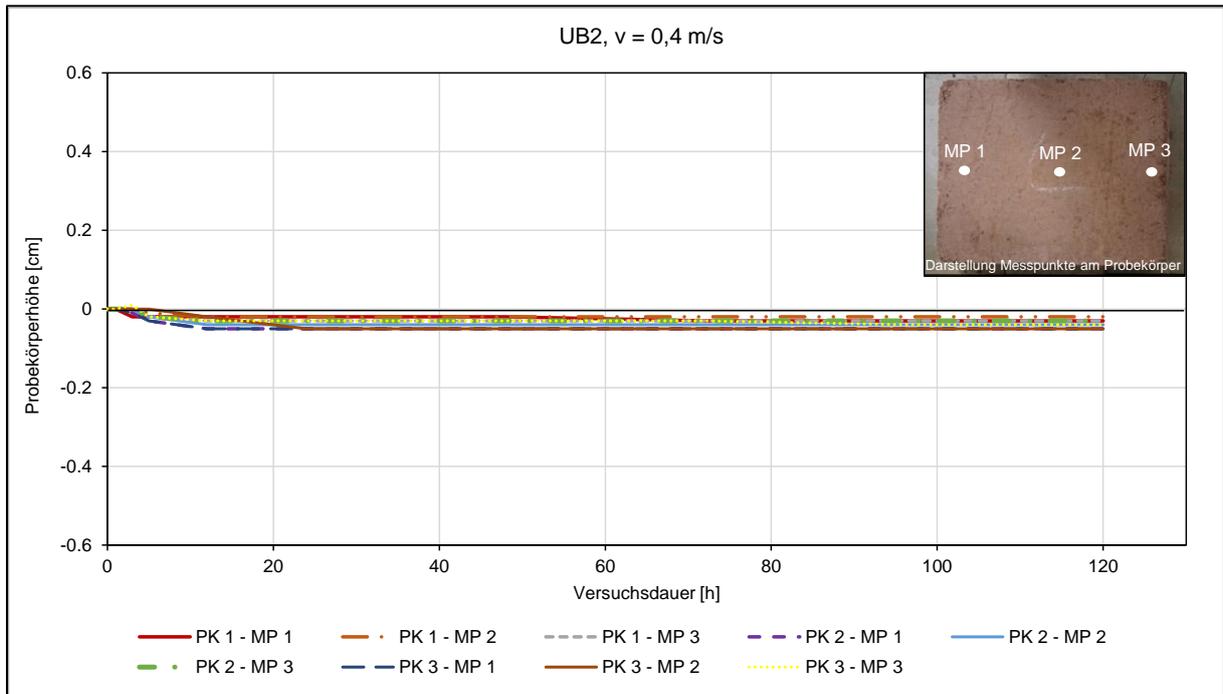


Abb. 5.50: Ergebnisse der Versuche zum Erosionswiderstand für UB2 bei $v = 0,4$ m/s

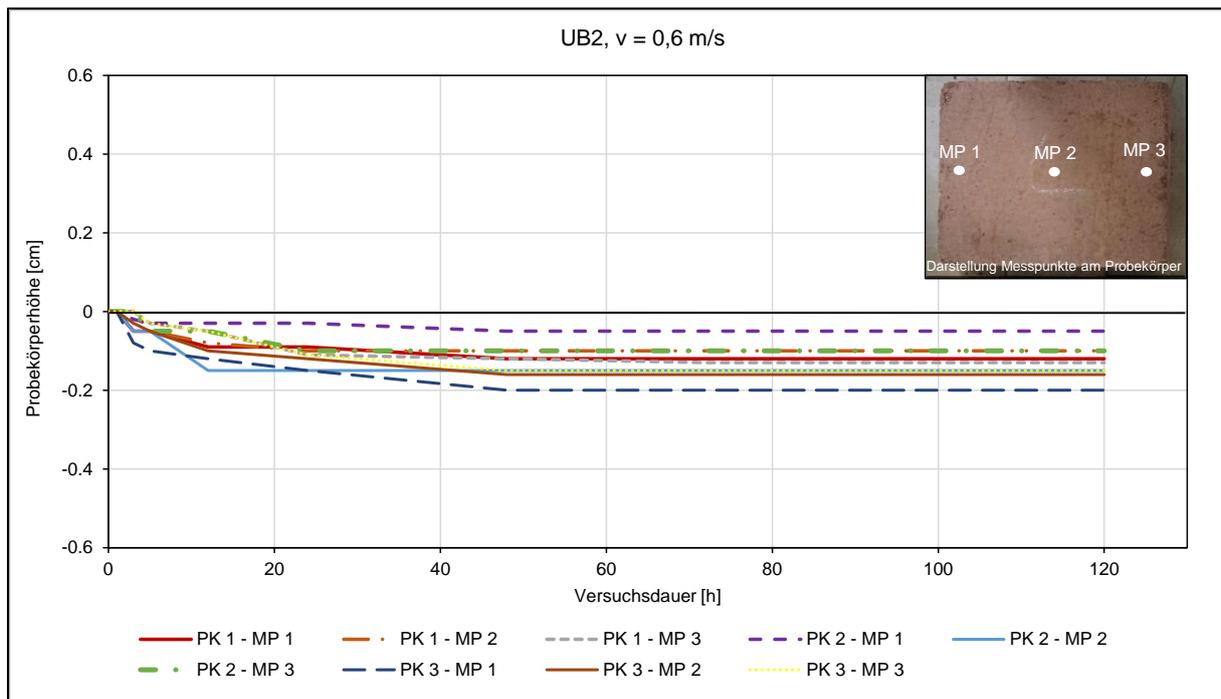


Abb. 5.51: Ergebnisse der Versuche zum Erosionswiderstand für UB1 bei $v = 0,6 \text{ m/s}$

Zu erkennen ist, dass beim Material UB2 für alle Fließgeschwindigkeiten eine geringe Abnahme der Probekörperoberkante zu verzeichnen war. Die Höhe nahm bis Versuchsende maximal um $\Delta h_{\max} = \text{rd. } 0,2 \text{ cm}$ ab. Leichte Erosion war auch an besonders strömungsexponierten Bereichen, wie bspw. an den Rändern oder an den Ecken der PK, zu verzeichnen. Die Probekörpermitte blieb auch für UB2 stabil. Es war keine Erosion in größerem Umfang festzustellen. Nach Versuchsende wurden auch hier Feinbestandteile aus dem Probekörper an der Rinnensohle vorgefunden, sodass davon auszugehen ist, dass Feinbestandteile aus dem Probekörper heraus transportiert wurden, vgl. **Abb. 5.52**.



Abb. 5.52: Erodirtes Material nach Versuchsende [Bromberg, 2022]

Abb. 5.53 zeigt exemplarische Draufsichten im Versuchsablauf mit einer Fließgeschwindigkeit von $v = 0,6 \text{ m/s}$ zu den Zeitpunkten $t = 0 \text{ h}$, $t = 24 \text{ h}$, $t = 48 \text{ h}$, $t = 72 \text{ h}$, $t = 96 \text{ h}$, $t = 120 \text{ h}$. Auch hier ist zu erkennen, dass das Material UB2 nicht flächig durch die Strömung erodiert wurde.

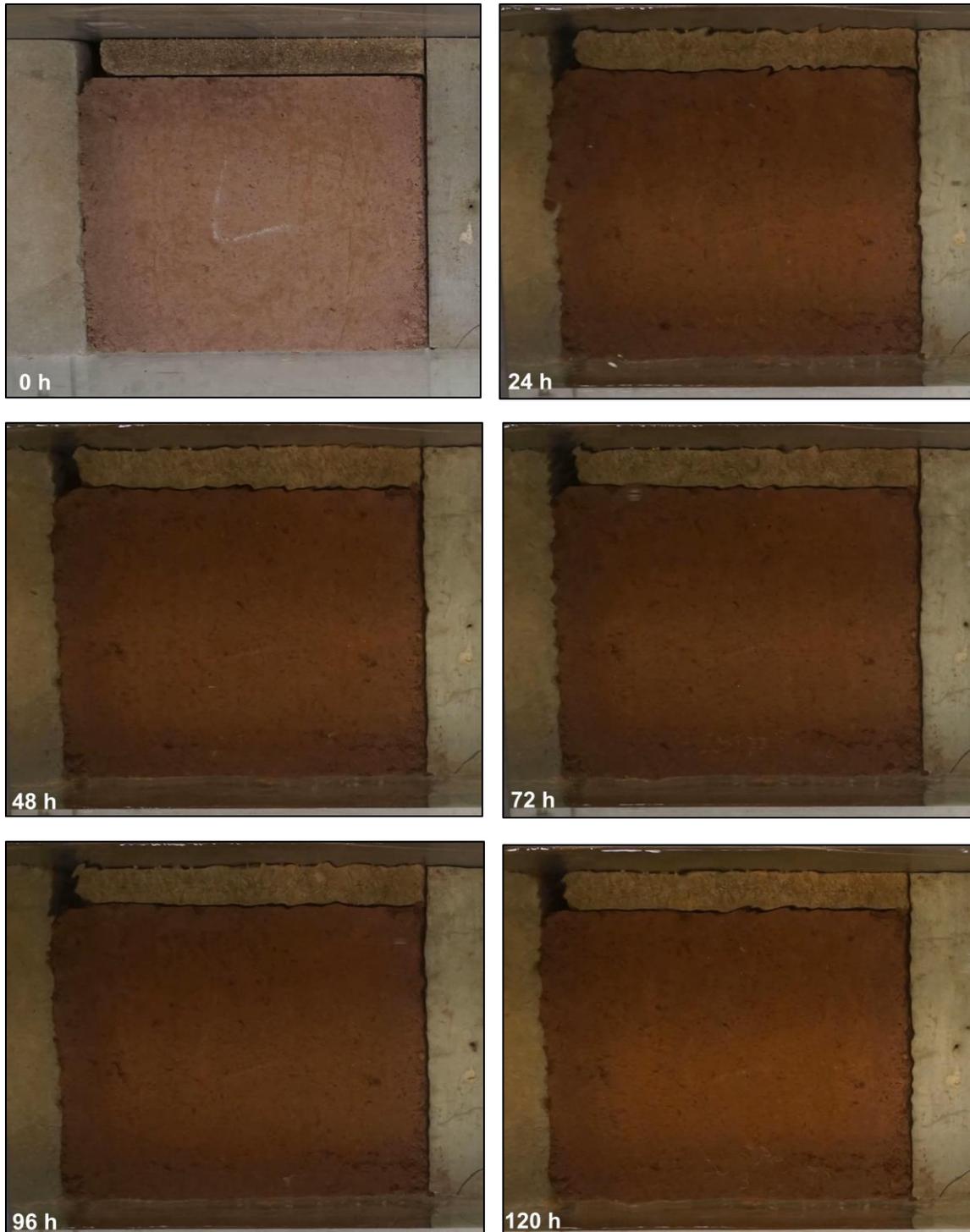


Abb. 5.53: Versuchs zum Erosionswiderstand für das Material UB2 [Bromberg, 2022]

Auch hier ist auf die Korngrößenzusammensetzung des Materials UB2 hinzuweisen. Größere Sande und Kiese werden erst ab deutlich höheren Fließgeschwindigkeiten erodiert, vgl. **Kap. 5.5.2**.

5.5.4 Ergänzende Untersuchungen zum Erosionswiderstand

Des Weiteren wurden exemplarisch Extremversuche mit starkem Strömungsangriff und beschädigter Probekörperoberfläche durchgeführt.

Fließgeschwindigkeit $v = 1,0 \text{ m/s}$

Für die Versuche wurden die unbefestigt eingebauten Probekörper zunächst über 24 Stunden mit Wasser überstaut und anschließend über eine Dauer von $t = 6 \text{ h}$ einer turbulenten Strömung mit einer Fließgeschwindigkeit von $v = 1,0 \text{ m/s}$ ausgesetzt, um eine außergewöhnlich hohe Belastung zu erzeugen. Die **Abb. 5.54** zeigt exemplarisch Aufnahmen der Probekörper zum Versuchsende. Oben ist eine Front- und Draufsicht eines Probekörpers des Baustoffgemische UB1 und unten des Baustoffgemische UB2 zu sehen. Bei einer Fließgeschwindigkeit von $v = 1,0 \text{ m/s}$ geraten feine und grobe Kornfraktionen des Materials UB1 als auch UB2 in Bewegung, vgl. **Kap. 5.5.2** (Hjulström-Diagramm). Es ist eine starke Erosion an der vorderen Kante der Probekörper zu erkennen. In diesem Bereich greift die Strömung besonders stark an und das Material wird abtransportiert. Dies ist an den Einzelkörnern auf der Probekörperoberfläche zu erkennen.



Abb. 5.54: Extremversuche mit starkem Strömungsangriff, UB1 oben, UB2 unten [Bromberg, 2022]

Beschädigte Probekörperoberfläche

Für die Versuche wurden die Oberflächen der Probekörper des Materials UB1 und UB2 oberflächlich beschädigt, um eine Alterung der Wegedecke nachzubilden. Hierfür wurden sowohl punktförmige als auch linienförmige Vorschädigung eingebracht. Zunächst wurden die Probekörper über 24 Stunden mit Wasser überstaut und anschließend über eine Dauer von $t = 48$ h einer Fließgeschwindigkeit von $v = 0,6$ m/s ausgesetzt. Die **Abb. 5.55** zeigt die Probekörper nach Versuchsende. Zu erkennen ist, dass in den Bereichen der Beschädigungen vor allem die feinen Materialien ausgespült wurden. Größere Einzelkörner wurden freigespült, befinden sich aber z.T. noch innerhalb der beschädigten Stellen. Vereinzelt wurden gröbere Einzelkörner ausgetragen.

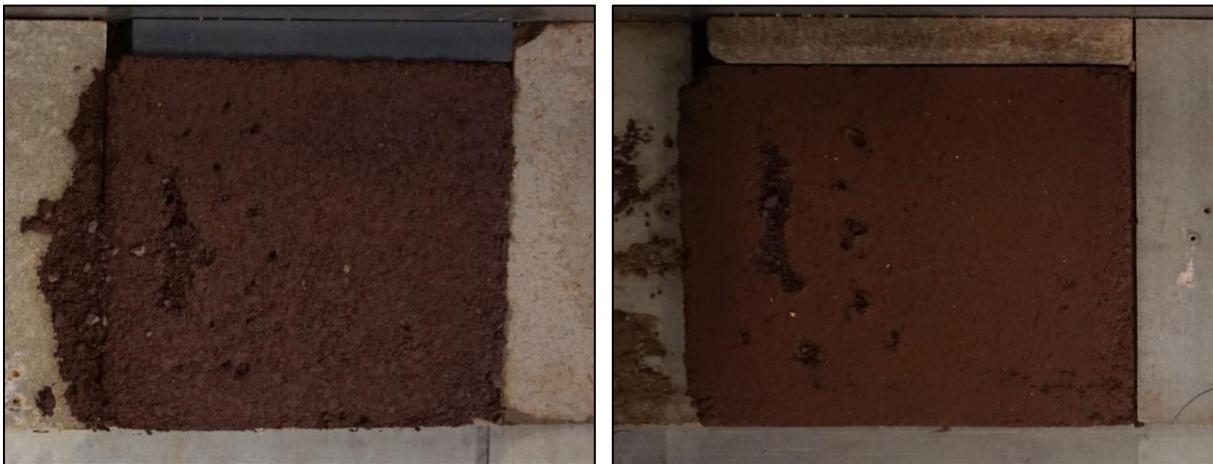


Abb. 5.55: Versuche mit beschädigter Probekörperoberfläche nach Versuchsende, UB1 links, UB2 rechts [Bromberg, 2022]

5.5.5 Fazit

Die Untersuchungen zeigten, dass bei allen gebundenen Baustoffgemischen keine Erosion durch die im Versuch erzeugte Strömung mit einer Fließgeschwindigkeit von $v_{\max} = 0,6$ m/s auftrat. Für das ungebundene Baustoffgemisch UB1 wurde eine Erhöhung der Probekörperoberkanten um durchschnittlich 0,5 cm über die gesamte Länge der Probekörper nach Versuchsende festgestellt. Es wird vermutet, dass der pflanzlich-mineralische Binder bei Kontakt mit Wasser quillt und sich deshalb das Volumen der PK vergrößerte. An den strömungsexponierten Bereichen wie den Rändern oder Ecken gab es leichte Erosionen, während die Probekörpermitten stabil blieben. Beim Material UB2 wurde eine geringe Abnahme der Probekörperoberkanten um maximal 0,2 cm festgestellt, aber auch hier blieben die Probekörpermitten stabil. Nach Versuchsende für die Versuche mit den ungebundenen Baustoffgemischen UB1 und UB2 wurden Feinbestandteile aus den Probekörpern an der Rinnensohle vorgefunden, sodass davon auszugehen ist, dass Feinbestandteile aus den Probekörpern heraus transportiert wurden. UB1 und UB2 weisen eine von 0/8 und somit ein Größtkorn von rd. 8 - 10 mm Durchmesser auf. Mit Hilfe des Hjulström-Diagramms wurde die Plausibilität der Ergebnisse verifiziert. Es wurde festgestellt, dass Kornbestandteile in dieser Größenordnung erst bei Fließgeschwindigkeiten von etwa 0,8 m/s bis 1,0 m/s aufgrund des Angriffs der Strömung bewegt werden. Fließgeschwindigkeiten $v > 0,6$ m/s treten auf den Vorländern der Elbe bei Hochwasser i.d.R. nicht auf, da die Fließgeschwindigkeiten durch vorherrschende Rauheiten (Bewuchs, Bebauung) verringert werden. Bei Extremversuchen mit starkem Strömungsangriff und beschädigter Probekörperoberflächen trat starke Erosion an der vorderen Kante der Probekörper auf, während in den beschädigten Bereichen vor allem feine Materialien ausgespült wurden. Größere Einzelkörner wurden vereinzelt ausgetragen.

5.6 Widerstand gegen steigenden Grundwasserstand

Für die Einschätzung des Widerstandsverhaltens gegen Hochwassersituationen mit langsam ansteigendem Grundwasserstand wurde die Höhe der Probekörper an jeweils drei Messpunkten über die Zeit erfasst. Die Messpunkte befanden sich mittig des Probekörpers längs in Fließrichtung an folgenden Bereichen, vgl. **Abb. 5.56**:

- Messpunkt 1: rd. 2 cm vom linken Rand des Probekörpers entfernt
- Messpunkt 2: mittig des Probekörpers
- Messpunkt 3: rd. 2 cm vom rechten Rand des Probekörpers entfernt.

Die gemessenen Höhen wurden als Differenz aufgetragen, daher Probekörperhöhe zum Ablesezeitpunkt abzgl. Probekörperhöhe am Anfangszeitpunkt (Probekörper trocken):

$$\Delta h = h_t (\text{Probekörperhöhe zum Ablesezeitpunkt}) - h_0 (\text{Probekörperhöhe Anfangszeitpunkt}) \quad \text{Gl. 6}$$

Negative Werte weisen dabei auf eine Erosionserscheinungen, daher eine Abtragung bzw. Absackung des Materials hin.

Eine tabellarische Übersicht der Messwerte ist der **Anlage 8** zu entnehmen.



Abb. 5.56: Lage der Messpunkte [Bromberg, 2022]

5.6.1 Gebundene Baustoffgemische BB1, BB2, KB1, KB2, KB3

Die Versuche zur Einschätzung des Widerstands gegen steigenden Grundwasserstand für die gebundenen Baustoffgemische BB1, BB2, KB1, KB2 und KB3 ergaben, dass über die gesamte Versuchsdauer von 120 Stunden keine Veränderung der Probekörperhöhen festzustellen war. Es traten keine Absackungen oder ähnliche Veränderungen der Probekörpergeometrie auf. Alle gebundenen Baustoffgemische blieben stabil. Dies zeigt, dass die Baustoffgemische gegenüber ansteigendem Grundwasserstand widerstandsfähig sind und keine signifikanten Erosionserscheinungen auftreten. Die **Tab. 5.4** zeigt zusammenfassend die Ergebnisse für die bitumen- und kunstharzgebundene Baustoffgemische zum Versuchsende $t = 120$ h.

Tab. 5.4: Ergebnisse der Versuche zum Widerstand gegen steigenden Grundwasserstand für bitumen- und kunstharzgebundene Baustoffgemische zum Versuchsende

	t	Was- serstand h	PK 1			PK 2			PK 3		
			Mess- punkt 1 Δh	Mess- punkt 2 Δh	Mess- punkt 3 Δh	Mess- punkt 1 Δh	Mess- punkt 2 Δh	Mess- punkt 3 Δh	Mess- punkt 1 Δh	Mess- punkt 2 Δh	Mess- punkt 3 Δh
	[h]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
BB1	120	0,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BB2	120	0,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
KB1	120	0,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
KB2	120	0,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
KB3	120	0,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

5.6.2 Ungebundenes Baustoffgemisch UB1

In der folgenden Tabelle sind die Messergebnisse über eine Dauer von je $t = 120$ h aufgelistet. Dabei zeigt die **Abb. 5.57** die Messergebnisse ausgehend von einem Wasserstand von $h = 0$ cm bis $h = 5$ cm ab Probekörperunterkante. Bei einer Wassertiefe von $h = 5$ cm war der Probekörper mit 1 cm Wasserstand überstaut.

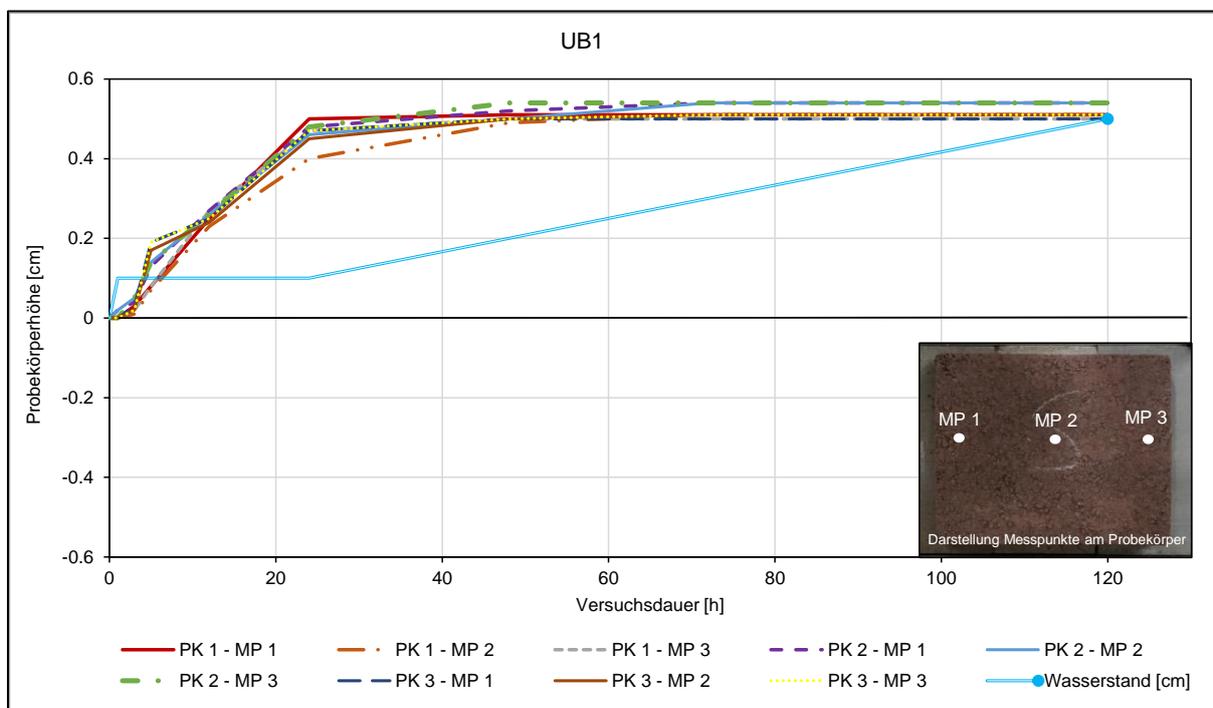


Abb. 5.57: Ergebnisse der Versuche zum Widerstand gegen steigenden Grundwasserstand für UB1

Deutlich wird, dass das Material UB1 mit pflanzlich-mineralischem Binder bei ansteigendem Wasserstand keine Verringerung der Probekörperhöhe aufwies. Die Höhe des Probekörpers nahm durchschnittlich um 0,5 cm zu. Dieses Verhalten wurde bereits im **Kap. 5.5.2** beschrieben. Die Probekörper wiesen: eine Lagestabilität auf, lediglich an den unbefestigt eingebauten Ecken des Probekörpers kam es zu Materialverlusten. Die Probekörperkanten und Probekörpermitte blieben stabil. **Abb. 5.58** zeigt exemplarisch Draufsichten im Versuchsablauf zu den Zeitpunkten $t = 0$ h mit Wasserstand $h = 0$ cm, $t = 24$ h mit Wasserstand $h = 1$ cm, $t = 48$ h mit Wasserstand $h = 2$ cm, $t = 72$ h mit Wasserstand $h = 3$ cm, $t = 96$ h mit Wasserstand $h = 4$ cm, $t = 120$ h mit Wasserstand $h = 5$ cm. Auch hier war zu erkennen, dass das Material UB1 keine Absackungen in Probekörpermitte aufwies.

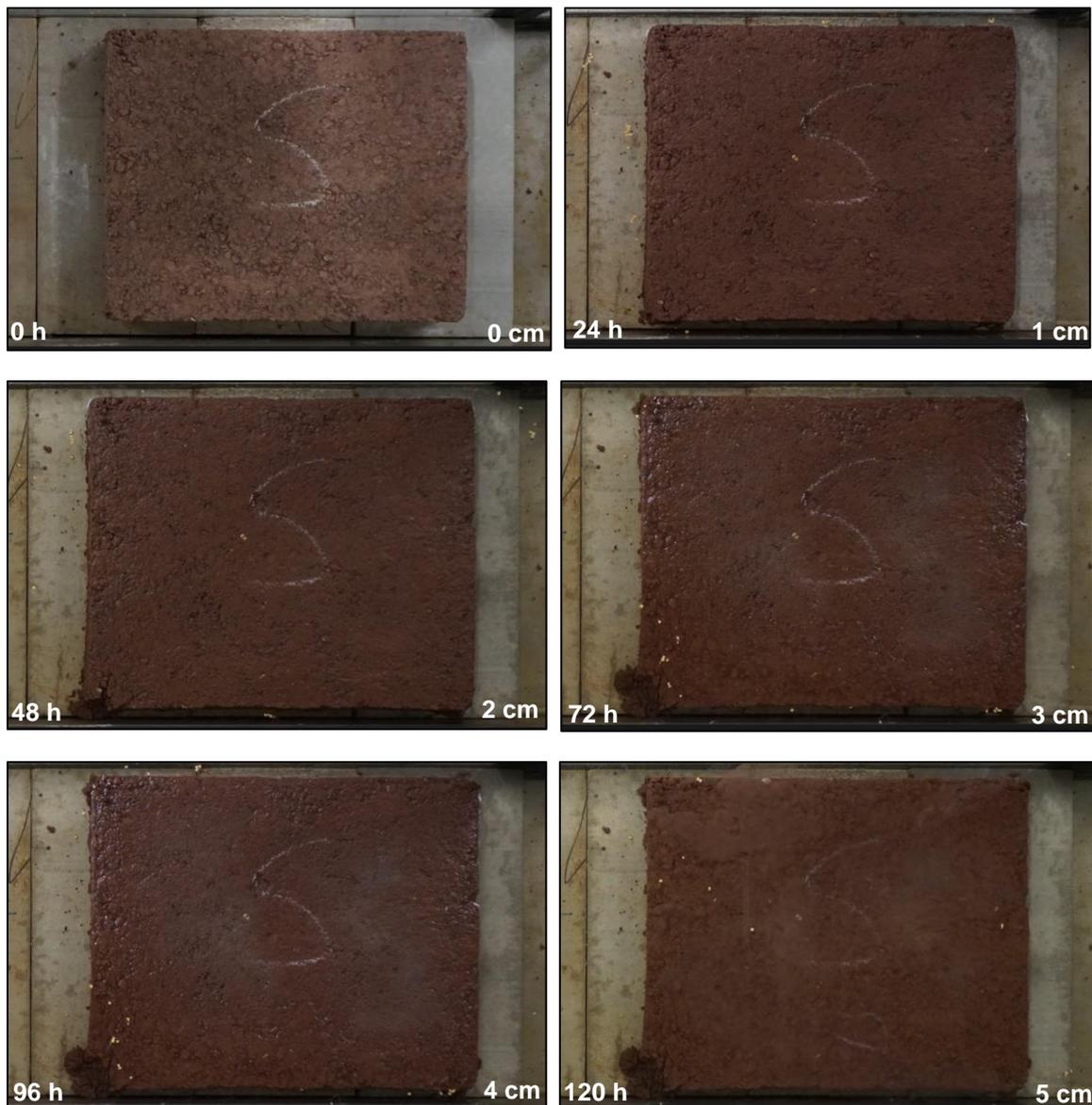


Abb. 5.58: Versuchs zum Widerstand gegen ansteigendes Grundwasser für das Material UB1 [Bromberg, 2022]

Die Volumenvergrößerung der Probekörper, wie in **Kap. 5.5.2** beschrieben, wurde auch in horizontaler Richtung festgestellt. **Abb. 5.59** (oben) zeigt einen direkten Vergleich von Bild 1 bei $t = 0$ h und Bild 5 bei $t = 96$ h. Messungen ergaben eine horizontale Ausdehnung von durchschnittlich rd. 0,5 cm bis rd. 2,0 cm.

In **Abb. 5.59** (unten) wurde die Abmaße des Probekörpers zum Versuchsstart (weißes Viereck) mit den Abmaßen des Probekörpers zu Versuchsende überlagert.

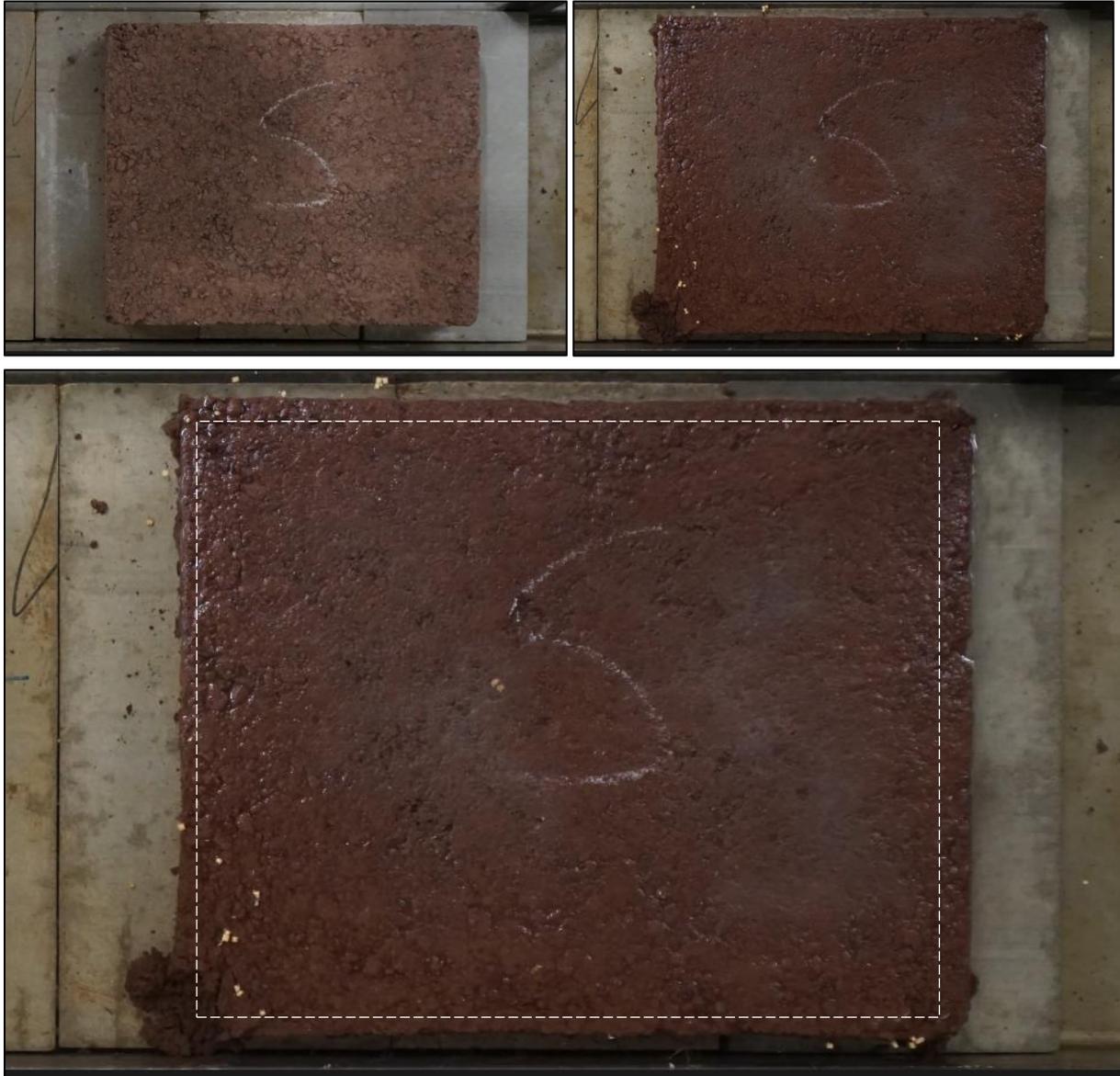


Abb. 5.59: Horizontale Ausdehnung Probekörper UB1 [Bromberg, 2022]

5.6.3 Ungebundenes Baustoffgemisch UB2

In der folgenden Tabelle sind die Messergebnisse über eine Dauer von je $t = 120$ h aufgelistet. Dabei zeigt die **Abb. 5.60** die Messergebnisse ausgehend von einem Wasserstand von $h = 0$ cm bis $h = 5$ cm ab Probekörperunterkante. Bei einer Wassertiefe von $h = 5$ cm war der Probekörper mit 1 cm Wasserstand überstaut.

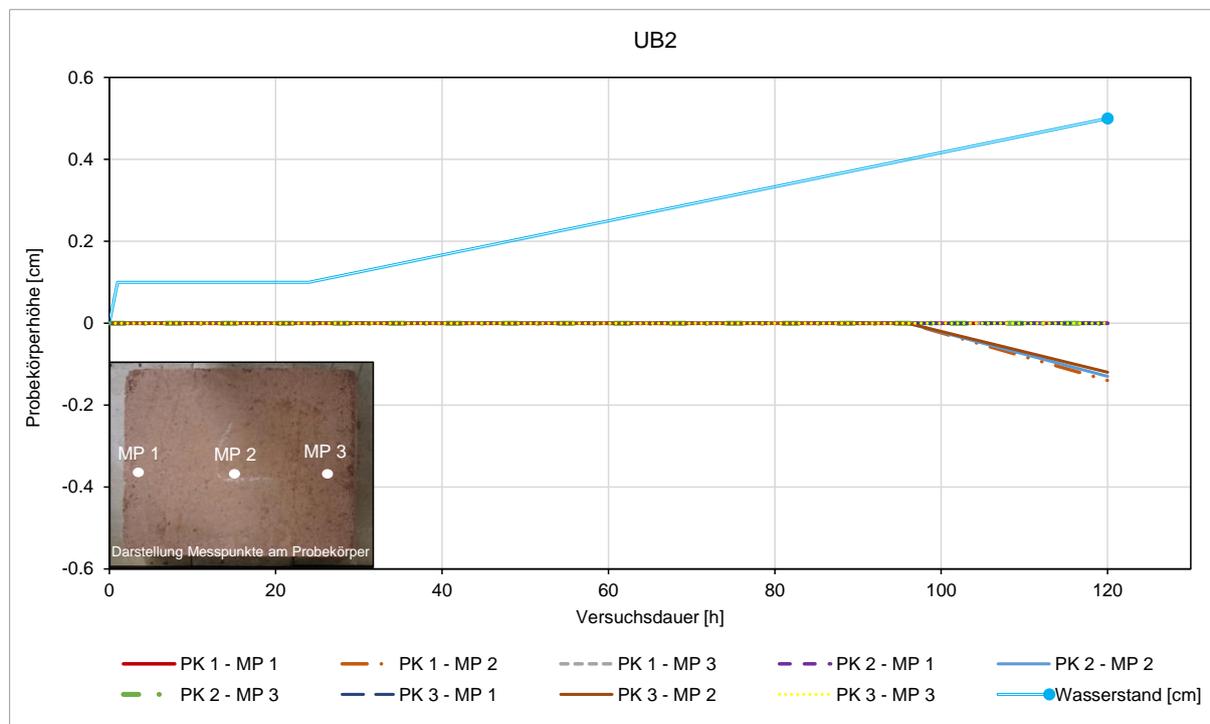


Abb. 5.60: Ergebnisse der Versuche zum Widerstand gegen steigenden Grundwasserstand für UB2

Deutlich wird, dass das Material UB2 bei ansteigendem Wasserstand an den Rändern des Probekörpers geringfügige Verringerung der Probekörperhöhe aufwies. Die Höhe des Probekörpers nahm maximal um rd. 0,2 cm ab. An den unbefestigt eingebauten Rändern und Ecken des Probekörpers kam es zu deutlichen Materialverlusten durch Absackung infolge des steigenden Wasserstandes.

Die Probekörpermitten blieben stabil. Es war keine Volumenvergrößerung des Probekörpers messbar. **Abb. 5.61** zeigt exemplarisch Draufsichten im Versuchsablauf zu den Zeitpunkten $t = 0$ h mit Wasserstand $h = 0$ cm, $t = 24$ h mit Wasserstand $h = 1$ cm, $t = 48$ h mit Wasserstand $h = 2$ cm, $t = 72$ h mit Wasserstand $h = 3$ cm, $t = 96$ h mit Wasserstand $h = 4$ cm, $t = 120$ h mit Wasserstand $h = 5$ cm.

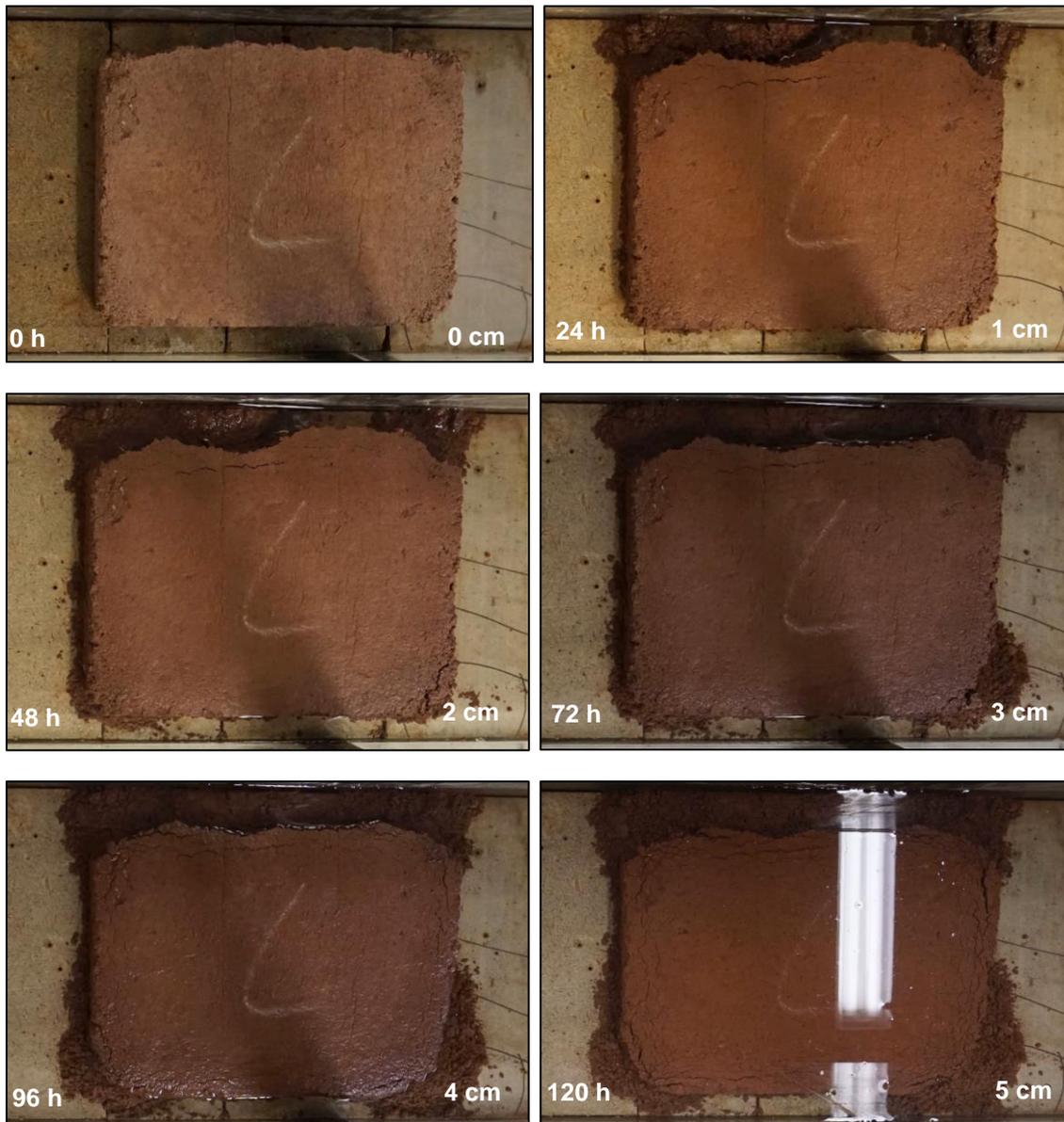


Abb. 5.61: Versuch zum Widerstand gegen ansteigendes Grundwasser für das Material UB2

5.6.4 Fazit

Die Ergebnisse zeigen, dass bei den Versuchen zur Einschätzung des Widerstands gegen steigenden Grundwasserstand für die gebundenen Baustoffgemische BB1, BB2, KB1, KB2 und KB3 keine Veränderungen der Probekörperhöhen festzustellen waren. Es traten keine Absackungen oder ähnliche Veränderungen der Probekörpergeometrie auf. Das Material UB1 mit pflanzlich-mineralischem Binder zeigte eine leichte Zunahme der Probekörperhöhe. Die Probekörper wiesen eine hohe Lagestabilität auf, jedoch traten an den unbefestigt eingebauten Ecken kleinere Materialverluste auf. Beim Material UB2 kam es zu geringfügigen Verringerungen der Probekörperhöhe und deutlichen Materialverlusten an den unbefestigt eingebauten Rändern und Ecken infolge des steigenden Wasserstandes. Im direkten Vergleich der beiden Baustoffe UB1 mit pflanzlich-mineralischem Binder und UB2 ohne Binder fiel auf, dass das Material mit Binder einen höheren Widerstand gegenüber steigendem Grundwasser aufweist. Während UB1 an den Rändern des Probekörpers in Folge der Wassersättigung zerfiel, quoll UB2 auf. Bei näherer Untersuchung wurde eine wahrnehmbare Bindung der Gesteinskörnung festgestellt. Beim Ausbau des Materials haftete das Material UB2 auch nach Wassersättigung zusammen und lies sich in größeren Abschnitten entfernen, während UB1 stark zerfiel. Das pflanzlich-mineralische Bindemittel bewirkte eine verbesserte Stabilität gegenüber Wasser- und Feuchtigkeitseinwirkung.

6. Zusammenfassung

Die Professur für Verkehrswegebau des Fachbereiches Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit der Hochschule Magdeburg-Stendal wurde mit dem Schreiben vom 13. Januar 2020 mit Laboruntersuchungen an Probekörpern im Rahmen des Projekts „Modellhafte Beurteilung der Beständigkeit von Wegebefestigungen unterschiedlicher Ausführung in historischen Parkanlagen im Einfluss vermehrter Extremwetterereignisse und deren Instandsetzung unter Aspekten der Nachhaltigkeit und Umweltrelevanz“ beauftragt. Im Rahmen des Projekts wurden durch die Hochschule Magdeburg-Stendal insgesamt sieben unterschiedliche Baustoffgemische labortechnisch untersucht. Hierzu zählten zwei bitumengebundene, drei kunstharzgebundene sowie zwei ungebundene Baustoffgemische. Es wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Spaltzugschwellversuche zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens und der Steifigkeitsmodule der gebundenen Baustoffgemische
- Untersuchungen zur Temperatur- und UV-Beständigkeit der gebundenen Baustoffgemische
- Frost-Tau-Wechselversuche zur Analyse des Verwitterungswiderstandes der gebundenen Baustoffgemische
- Stempeleindringversuche zur Beschreibung des Verformungsverhaltens der gebundenen und ungebundenen Baustoffgemische
- Erosionswiderstand gegenüber strömendem Wasser der gebundenen und ungebundenen Baustoffgemische
- Widerstand gegenüber steigendem Grundwasserstand der gebundenen und ungebundenen Baustoffgemische

Die Ergebnisse der Versuche zur Bestimmung des Ermüdungsverhaltens zeigen, dass die verschiedenen Baustoffe mit unterschiedlichen Bindemitteln und Gesteinskörnungen sehr unterschiedliches Ermüdungsverhalten aufweisen. Es wurde festgestellt, dass kunstharzgebundene Baustoffe im Gegensatz zu den bitumengebundenen Baustoffen einen ausgeprägten Dauerfestigkeitsbereich besitzen und daher bis zu einer Belastungsgrenze keine bzw. nur sehr geringe Ermüdungserscheinungen aufweisen. Oberhalb dieser Belastungsgrenze kommt es jedoch zu deutlichen Schädigungen und teilweise abruptem Bruchverhalten. Die kunstharzgebundenen Baustoffe zeigen dabei einen steileren Anstieg der Ermüdungsfunktion als die bitumengebundenen Baustoffe. Im höheren Beanspruchungsbereich weisen die bitumengebundenen Baustoffe Vorteile bezüglich des Ermüdungsverhaltens gegenüber den kunstharzgebundenen Baustoffen auf.

Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass die Ermüdungslastwechselzahlen bei den kunstharzgebundenen Baustoffen eine wesentlich größere Streuung aufweisen als bei bitumengebundenen Baustoffgemischen. Damit ist zu erwarten, dass bei kunstharzgebundenen Baustoffgemischen ein punktuell frühzeitigeres Versagen von Teilen der Befestigung eintreten

kann. Um dies zu quantifizieren wären sowohl weitere Untersuchungen wie auch probabilistische Nutzungsdauerberechnungen erforderlich.

Die Untersuchungen zu den Steifigkeitsmodulen ergaben, dass die Steifigkeitsmodule kunstharzgebundener Materialien für die drei untersuchten Temperaturen vergleichbar sind und keine signifikanten Schwankungen aufweisen (mit Ausnahme des KB3).

Die Ergebnisse der Spaltzugschwellversuche nach thermischer Belastung und UV-Bestrahlung zeigten, dass die durch den Versuch hervorgerufene Alterung einen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten der bitumen- und kunstharzgebundenen Baustoffgemische hatte. Lediglich beim Baustoffgemisch BB1 wurde kein signifikanter Einfluss der Alterung beobachtet. Die gealterten Probekörper der Baustoffgemische BB2, KB1, KB2 und KB3 wiesen geringere Lastwechselzahlen bei gleicher Laststufe im Vergleich zu den unbelasteten PK auf. Es sei allerdings darauf hingewiesen, dass für die thermisch und durch UV-Strahlung beanspruchten Probekörper nur ein Belastungsniveau untersucht wurde. Es kann durchaus sein, dass sich bei Betrachtung unterschiedlicher Belastungsniveaus und ganzer Ermüdungsfunktionen ein deutlicherer Einfluss darstellt. Es ist möglich, dass bei der Analyse unterschiedlicher Belastungsstufen und der Betrachtung von Ermüdungskurven ein signifikanter Einfluss erkennbar wird.

Die Ergebnisse der Spaltzugschwellversuche nach Belastung durch Frost-Tau-Wechsel zeigte, dass bei den Baustoffgemischen BB1, BB2, KB2 und KB3 ein Einfluss auf das Ermüdungsverhalten zu erkennen war. Die Ermüdungslastwechselzahl nahm bei gleicher Laststufe ab. Dies kann auf eine Strukturschädigung des Bindemittels zurückzuführen sein, die durch das Eindringen von Wasser in die Poren der Baustoffgemische und dessen anschließendes Gefrieren entsteht. Das Baustoffgemisch KB1 zeigte, dass die Frost-Tau-Wechselbelastung keinen signifikanten Einfluss auf die Ermüdungslastwechselzahlen des Baustoffes hat.

Die Ergebnisse der Stempleindringversuche zeigten, dass die Temperatur Einfluss auf die Verformungsbeständigkeit von bitumen- und kunstharzgebundenen Baustoffen hat. Bei 50°C wurde eine Eindringtiefe von 1 mm bei geringerer Kraftaufbringung erzielt als bei 20°C. Die Untersuchungen zu den ungebundenen Baustoffgemischen zeigten, dass die Temperatur keinen signifikanten Einfluss auf den Widerstand gegenüber bleibenden Verformungen hat. Im Vergleich der Materialien kann festgehalten werden, dass für die kunstharzgebundenen Materialien eine höhere Kraftaufbringung notwendig war, um eine Eindringtiefe von 1mm zu erzielen als bei den bitumen- und ungebundenen Materialien. Zudem wurde der Einfluss von verschiedenen Wassergehalten auf das ungebundene Baustoffgemisch UB1 untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigten, dass der Wassergehalt des Baustoffgemisches einen signifikanten Einfluss auf dessen Eigenschaften hat. Bereits bei Proben mit einem Wassergehalt von 10 Masseprozent nahm die Belastbarkeit des Baustoffgemisches deutlich ab.

Die Untersuchungen zum Erosionswiderstand gegenüber strömendem Wasser zeigten, dass bei allen gebundenen Baustoffgemischen keine Erosion durch die im Versuch erzeugte Strömung auftrat. Für das ungebundene Baustoffgemisch UB1 wurde eine Erhöhung der Probekörperoberkanten um durchschnittlich 0,5 cm nach Versuchsende festgestellt. Es wird vermutet, dass der pflanzlich-mineralische Binder bei Kontakt mit Wasser quillt und sich deshalb das Volumen der Probekörper vergrößerte. An den strömungsexponierten Bereichen, wie den

Rändern oder Ecken, gab es leichte Erosionen, während die Probekörpermitten stabil blieben. Beim Material UB2 wurde eine geringe Abnahme der Probekörperoberkanten um maximal 0,2 cm festgestellt, aber auch hier blieben die Probekörpermitten stabil. Es wurde festgestellt, dass Kornbestandteile in dieser Größenordnung der ungebundenen Baustoffgemische erst bei Fließgeschwindigkeiten von etwa 0,8 m/s bis 1,0 m/s aufgrund des Angriffs der Strömung bewegt werden. Bei Extremversuchen mit starkem Strömungsangriff und beschädigten Probekörperoberflächen trat starke Erosion an der vorderen Kante der Probekörper auf, während in den beschädigten Bereichen vor allem feine Materialien ausgespült wurden. Größere Einzelkörner wurden vereinzelt ausgetragen.

Die Ergebnisse zum Widerstand gegen steigenden Grundwasserstand zeigen, dass für die gebundenen Baustoffgemische keine Veränderungen der Probekörperhöhen festzustellen waren. Es traten keine Absackungen oder ähnliche Veränderungen der Probekörpergeometrien auf. Das Material UB1 mit pflanzlich-mineralischem Binder zeigte eine leichte Zunahme der Probekörperhöhe. Die Probekörper wiesen eine hohe Lagestabilität auf, jedoch kam es an den unbefestigt eingebauten Ecken zu kleineren Materialverlusten. Beim Material UB2 kam zu geringfügigen Verringerungen der Probekörperhöhe und deutlichen Materialverlusten an den unbefestigt eingebauten Rändern und Ecken infolge des steigenden Wasserstandes. In Anbetracht dieser Ergebnisse wird vermutet, dass die hygrischen Belastungen allein nicht zu starken Schädigungen der ungebundenen Baustoffe führen. Diese Schlussfolgerung und die Ergebnisse der Stempelindringversuche legen nahe, dass erst die Kombination von hygrischen Belastungen und Oberlasten die Qualität der ungebundenen Wegedecken stark beeinflussen bzw. Schädigungen durch bspw. das Befahren von wassergesättigten ungebundenen Wegedecken zu erwarten sind.

In Zukunft könnten weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um zu ermitteln, wie Reparaturen bei den verschiedenen Bauweisen von Wegedecken umgesetzt werden können und mit welchem Aufwand dies verbunden ist. Dabei sollten auch wirtschaftliche Aspekte wie die Kosten der Instandhaltung und die Verfügbarkeiten von Materialien berücksichtigt werden. Die Frage nach der ökologischen Nachhaltigkeit der Reparaturmaßnahmen wird eine wichtige Rolle spielen und sollte ebenfalls in Betracht gezogen werden.

7. Quellenverzeichnis

ETTMER, E., BROMBERG, L., ORLIK, S., (2019): „HYDRAULISCHE BERECHNUNGEN FÜR DIE ENTWICKLUNG EINES AUENSTRUKTURPLANS AN DER ELBE IN NIEDERSACHSEN“, FACHZEITSCHRIFT WASSERWIRTSCHAFT 11-2019, 72-76, SPRINGERPROFESSIONALVERLAG WIESBADEN

KERKHOF, B.J., (1925): „ASPHALT- UND TERRSTRASSEN (BITUMINÖSE STRASSENANLAGEN)“, SPRINGER-VERLAG BERLIN HEIDELBERG GMBH

SCHLICHT, P., (2019): „DURCHFÜHRUNG EINER STUDIE ZUR FUNKTIONSFÄHIGKEIT VON WILDWARNGERÄTEN“, HOCHSCHULE MAGDEBURG-STENDAL, MASTERARBEIT

TP ASPHALT-STB, (2018): „TEIL 24 SPALTZUG-SCHWELLVERSUCH – BESTÄNDIGKEIT GEGEN ERMÜDUNG“, TECHNISCHE PRÜFVORSCHRIFT FÜR ASPHALT, FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (FGSV), ARBEITSGRUPPE „ASPHALTBAUEISEN“, FGSV 756/24, FGSV VERLAG KÖLN

TP ASPHALT-STB, (2018): „TEIL 26 SPALTZUG-SCHWELLVERSUCH – BESTIMMUNG DER STEIFIGKEIT“, TECHNISCHE PRÜFVORSCHRIFT FÜR ASPHALT, FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (FGSV), ARBEITSGRUPPE „ASPHALTBAUEISEN“, FGSV 756/24, FGSV VERLAG KÖLN

GONG ET AL., (2022): „REVIEW OF REGULATION TECHNIQUES OF ASPHALT PAVEMENT HIGH TEMPERATURE FOR CLIMATE CHANGE ADAPTATION“, J INFRASTRUCT PRESERV RESIL 3, 9 (2022). [HTTPS://DOI.ORG/10.1186/S43065-022-00054-5](https://doi.org/10.1186/s43065-022-00054-5)

YU ET AL., (2019): „IMPACT OF ULTRAVIOLET RADIATION ON THE AGING PROPERTIES OF SBS-MODIFIED ASPHALT BINDERS“, POLYMERS. 2019; 11(7):1111. [HTTPS://DOI.ORG/10.3390/POLYM11071111](https://doi.org/10.3390/POLYM11071111)

TELTAYEV ET AL., (2019): „EFFECT OF FREEZE-THAW CYCLES ON MECHANICAL CHARACTERISTICS OF BITUMENS AND STONE MASTIC ASPHALTS“, APPLIED SCIENCES, 2019; 9(3):458. [HTTPS://DOI.ORG/10.3390/APP9030458](https://doi.org/10.3390/APP9030458)

DIN EN 1367-1, (2007): „PRÜFVERFAHREN FÜR THERMISCHE EIGENSCHAFTEN UND VERWITTERUNGSBESTÄNDIGKEIT VON GESTEINSKÖRNUNGEN – TEIL 1: BESTIMMUNG DES WIDERSTANDES GEGEN FROST-TAU-WECHSEL MIT ERGÄNZUNGEN ZUR PRÜFUNG VON BAUSTOFFGEMISCHEN“, DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG

Anlagen

Anlage 1: Datenblätter der Baustoffgemische

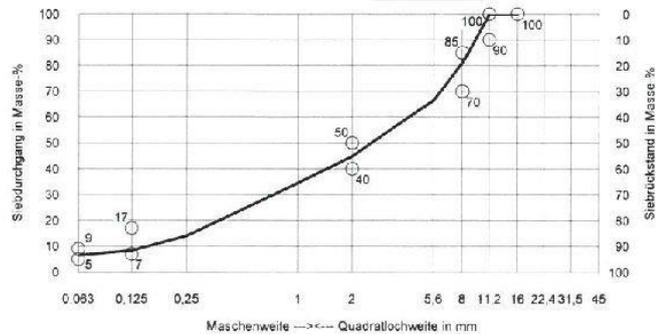
Anlage 1.1: Datenblatt Baustoffgemisch BB1

Kornzusammensetzung des Mineralstoffgemisches für die Vordosierung an der Mischanlage			
Nr.	Masse-%	Bezeichnung	Lieferkörnung
M 1	2,0	Kalkstein	Füller
M 2	12,0	Natursand	feine GK 0/2
M 3	18,0	Rhyolith	feine GK 0/2
M 4	14,0	Grauwacke	grobe GK 2/5
M 5	10,0	Grauwacke	grobe GK 5/8
M 6	19,0	Grauwacke	grobe GK 8/11
Anteil fGK mit Ecs 35 >50%			
Asphaltgranulat			
G 1	25,0	11 RA 0/8 (AC D)	

Mineralstoffanteile	Masse-%	Istwert	Sollwert	
			min	max
Füller	Masse-%	6,4	5,0	9,0
Durchgang 0,125 mm	Masse-%	8,2	7,0	17,0
feine Gesteinskörnung	Masse-%	38,4		
grobe Gesteinskörnung	Masse-%	55,2	50,0	60,0
Großtkorn	Masse-%	19,1	15,0	30,0
Überkorn	Masse-%	0,2		10,0

Kornzusammensetzung des Mineralstoffgemisches			
mm	Rückstand	Durchgang	Masse-%
> 45,00			grobe GK 55,2
45,00			
31,50			
22,40			
16,00		100,0	
11,20	0,2	99,8	
8,00	18,9	80,9	feine GK 38,4
5,60	14,3	66,6	
2,00	21,8	44,8	
1,00	10,2	34,6	
0,25	20,6	14,0	
0,125	5,8	8,2	
0,063	1,8	6,4	Füller
< 0,063	6,4		

Sieblinienbereich für AC 11 D S :



Erstprüfung **337700.6031** vom 15.07.2016

Bindemittel / Zusätze				
AC 11 D S		Mischgut- zusammensetzung	Sollwert	
			min	max
rechnerischer Mindestbindemittelgehalt	Masse-%		6,1	
Gesamt-Bindemittelgehalt	Masse-%	6,1	6,1	
Erweichungspunkt Ring und Kugel (Bitumen aus Granulat)	°C	69,1		
Erweichungspunkt Ring und Kugel (resultierend)	°C	61,1		

Mischguteigenschaften				
Material: AC 11 D S		Mischgut- zusammensetzung	Sollwert	
			min	max
Rohdichte	g/cm³	2,426		
Raumdichte	g/cm³	2,358		
Verdichtungstemperatur der Marshall-Probekörper	°C	145,0		
Hohlraumgehalt (ber.)	Vol.-%	2,8	2,5	3,5
Hohlraumfüllungsgrad	%	83,4		
Rohdichte des Mineralstoffgemisches	g/cm³	2,664		
Affinität zum Gebrauchsbitumen	%	75		

Die eingesetzten Mineralstoffe sind güteüberwacht und entsprechen den Anforderungen der TL Gestein-StB 04.
Diese Mischung erfüllt die Anforderungen nach TL Asphalt-StB 07/13 an AC 11 D S 25/55-55.
Mischguttemperaturen gem. TL Asphalt Pkt 3.1.2 Tab 3

Es gelten die in der ZTV Asphalt für Asphaltmischgut angegebenen Grenzwerte und Toleranzen.
Die Angaben zur Rezeptur, die über die zum Eignungsnachweis nach ZTV Asphalt geforderten Angaben hinausgehen, sind rein informativ und nicht bindend.

Eignungsnachweis im Sinne der ZTV Asphalt-StB 07/13:

Hiermit erklärt der Auftragnehmer,

gegenüber dem Auftraggeber,

für die Baumaßnahme

folgendes:

a) Die Angaben zur Zusammensetzung und im Rahmen der Erstprüfung nach TL Asphalt-StB 07/13 durchgeführten Prüfungen sind der oben aufgeführten Rezeptur für Asphaltmischgut der Erstprüfung **337700.6031** vom **15.07.2016** zu entnehmen.

b) Das Asphaltmischgut ist für den vorgesehenen Verwendungszweck, wie er sich aus den im Bauvertrag festgelegten Anforderungen ergibt, geeignet.

Ort/ Datum

Auftragnehmer (Stempel/Unterschrift)

Asphaltgranulat

Merkmal									Prüfung	Vorinfo
Umweltverträglichkeit	Verwertungsklasse A ja <input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Eigenschaft/Merkmalgröße	Kategorie/Prüfergebnis/Verfahren								Prüfung	Vorinfo
maximale Stückgröße U	5	8	16	22	32	45	56	63	<input checked="" type="checkbox"/>	
Gleichmäßigkeit	Größter Wert		Kleinster Wert		Mittelwert		Spannweite			
Bindemittelgehalt (M.-%)	5,6		4,6		5,1		1,0		<input checked="" type="checkbox"/>	
Erweichungspunkt (°C)	72,6		66,0		69,1		6,6		<input checked="" type="checkbox"/>	
<input checked="" type="checkbox"/> Stück Anteil <0,063mm (M.-%)	17,4		12,7		14,3		4,7		<input checked="" type="checkbox"/>	
oder Anteil 0,063/2mm (M.-%)	41,2		34,0		37,5		7,2		<input checked="" type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/> Korn Anteil >2mm (M.-%)	52,8		41,4		48,2		11,4		<input checked="" type="checkbox"/>	
Rohdichte (g/cm³)	2,426								<input checked="" type="checkbox"/>	
Fremdstoffgehalt FM	FM _{1/0,1} <input checked="" type="checkbox"/>		FM _{5/0,1}		FM _{angegeben}				<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Gesteinskörnungen

Eigenschaft/Merkmalgröße	Kategorie/Prüfergebnis								Prüfung	Vorinfo
Stoffliche Kennzeichnung										
Art der Gesteinskörnungen	Grau, Rhy								<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Art der Zusätze	keine								<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Korngrößenverteilung	1.4D	D	D/2	2 mm	0,125 mm	0,063 mm				
Siebdurchgang (M.-%)	100,0	94,9		51,8	16,4	14,3			<input checked="" type="checkbox"/>	
Größtkorndurchmesser (mm)	5,6	8	11,2	16	22,4	31,5	45		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kornform										
Kornformkennzahl SI	SI ₁₅ <input checked="" type="checkbox"/>		SI ₂₀		SI ₅₀				<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anteil gebrochener Körner C	C _{100/0} <input checked="" type="checkbox"/>	C _{95/1}	C _{90/1}	C _{50/30}	C _{NR}				<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Widerstand gegen Zartrümmerung										
Schlagzertrümmerung SZ	SZ ₁₈ <input checked="" type="checkbox"/>	SZ ₂₂	SZ ₂₆	SZ ₃₂	SZ ₃₅	SZ _{NR}			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Polierwert PSV	PSV ₃₁ <input checked="" type="checkbox"/>	PSV ₄₈	PSV ₄₂	PSV _{angegeben}	PSV _{NR}				<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Frostwiderstand										
Wasseraufnahme W _{cm}	W _{cm,0,5}								<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Widerstand gegen Frost F	F ₁ <input checked="" type="checkbox"/>				F ₂				<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Bindemittel

Eigenschaft/Merkmalgröße	Prüfergebnis	Prüfung	Vorinfo
Bindemittelart			<input type="checkbox"/>
Erweichungspunkt Ring und Kugel (°C)	69,1	<input checked="" type="checkbox"/>	
Nadelpenetration (1/10mm)		<input type="checkbox"/>	

Maximal mögliche Zugabe in Abhängigkeit von den anlagentechnischen Kriterien

Anlagentechnische Merkmale (nicht Zutreffendes streichen)	Chargenmischer	Durchlaufmischer
Anlagentechnische Merkmale (nicht Zutreffendes streichen)	Kaltzugabe	Warmzugabe
Max. mögl. Zugabemenge entspr. der anlagentechn. Kriterien:		80 M.-%

Maximal mögliche Zugabe in Abhängigkeit von der Gleichmäßigkeit

max. mögl. Zugabe entsprechend der Gleichmäßigkeit für AC T [M.-%]	50,0
max. mögl. Zugabe entsprechend der Gleichmäßigkeit für ACTD [M.-%]	40,0
max. mögl. Zugabe entsprechend der Gleichmäßigkeit für AC B + AC D [M.-%]	26,4

Datum: 19.04.2016

Anlage 1.2: Datenblatt Baustoffgemisch BB2

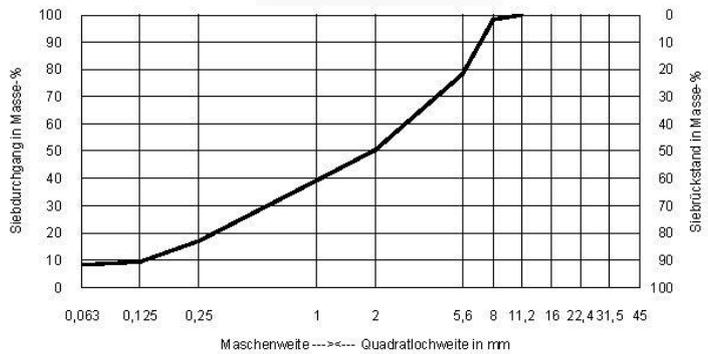
Grundlagen

in Anlehnung an TL Asphalt-StB 07;
TP Asphalt-StB

Kornzusammensetzung des Mineralstoffgemisches für die Vordosierung an der Mischanlage			
Nr.	Masse-%	Bezeichnung	Lieferkömung
M 1	7,0	Kalkstein + Farbpigment	Füller
M 2	25,0	Farbpulver gelb	feine GK 0/2
M 3	20,0	Natursand	feine GK 0/2 gew.
M 4	28,0	Granit gelb	grobe GK 2/5
M 5	20,0	Granit gelb	grobe GK 5/8

Kornzusammensetzung des Mineralstoffgemisches			
mm	Rückstand	Durchgang	Masse-%
> 45,00			grobe GK 49,6
45,00			
31,50			
22,40			
16,00			
11,20		100,0	
8,00	1,7	98,3	feine GK 42,2
5,60	20,0	78,3	
2,00	27,9	50,4	
1,00	11,2	39,2	
0,25	22,2	17,0	
0,125	7,7	9,3	
0,063	1,1	8,2	
< 0,063	8,2		

Sieblinienbereich für



Bindemittel / Zusätze				
Material:		Mischgut-zusammensetzung	Sollwert	
			min	max
Gesamt-Bindemittelgehalt	Masse-%	6,0		
Gesamt-Bindemittelgehalt	Gew.-T	6,38		
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	48,0		

Mischguteigenschaften				
Material:		Mischgut-zusammensetzung	Sollwert	
Rohdichte	g/cm³	2,423		
Raumdichte	g/cm³	2,360		
Verdichtungstemperatur	°C	135,0		
Hohlraumgehalt (ber.)	Vol.-%	2,6		

Anlage 1.3: Datenblatt Baustoffgemisch UB1

ERDBAULABOR POHL GMBH • Katharinenstraße 26a • 99955 Herbsleben

Ihr Zeichen
Ihre Nachricht vom
Unser Zeichen
Datum
Thema
Bezug

07.05.2020

po/

11.06.2020

**Wegedecke, Prüfungen nach DIN 18035 – 5,
Ergebnisdokumentation**

Projekt Nr. 22/2020

Ausfertigung: 1

1. Vorbemerkung

Auftragsgemäß wurde dem angelieferten zugemischt. Es wurden die Korngrößenverteilung nach DIN EN 933-1, die Proctordichte nach DIN 18127, die Wasserdurchlässigkeit nach DIN 18035-5 und die Oberflächenscherfestigkeit nach DIN 18035-5 bestimmt.

2. Prüfergebnisse

2.1 Bestimmung der Körnungslinie

Das untersuchte Gemisch ist gleichmäßig abgestuft und entspricht dem empfohlenen Körnungsbereich entsprechend Fachbericht zu Planung, Bau und Instandhaltung von Wassergebundenen Wegen Punkt 5.6 Deckschicht der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. (FLL Fachbericht 2007).

Körnungslinie mit empfohlenem Körnungsbereich FLL Fachbericht 2007
siehe Anlage 1

**ERDBAULABOR
POHL GMBH**

Katharinenstraße 26a
99955 Herbsleben

Telefon
(0360 41) 32 21 97

Telefax
(0360 41) 32 21 98

e-mail:
erdbaulabor-pohl@gmx.de

Erfurter Bank eG
IBAN:
DE51 8206 4228 0003 4001 15

BIC:
ERF BDE 33 XXX

HRB 113656
Amtsgericht Jena

Geschäftsführer:
Dipl.-Ing. W. Pohl

Erdbaulabor Pohl GmbH Stellungnahme Projekt-Nr.: 22/2020

1

2.2 Bestimmung der Proctordichte

$$Q_{Pr} = 2,05 \text{ g/cm}^3$$

$$w_{Pr} = 0,069$$

Proctorkurve siehe Anlage 2

2.3 Bestimmung der Oberflächenscherfestigkeit

Im Mittel wurde eine Oberflächenscherfestigkeit von $\tau_s = 105,01 \text{ kN/m}^2$ erreicht. Der Sollwert nach DIN 18035-5 beträgt $\tau_s \geq 50 \text{ kN/m}^2$.

Einzelwerte Protokoll siehe Anlage 3

2.4 Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit

Das untersuchte Korngemisch ist als wasserdurchlässig einzustufen. Die ermittelte Wasserdurchlässigkeit $k^* = 2,93 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ genügt den Anforderungen $k^* \geq 1,0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$.

Einzelwerte Protokoll siehe Anlage 4

3. Bewertung

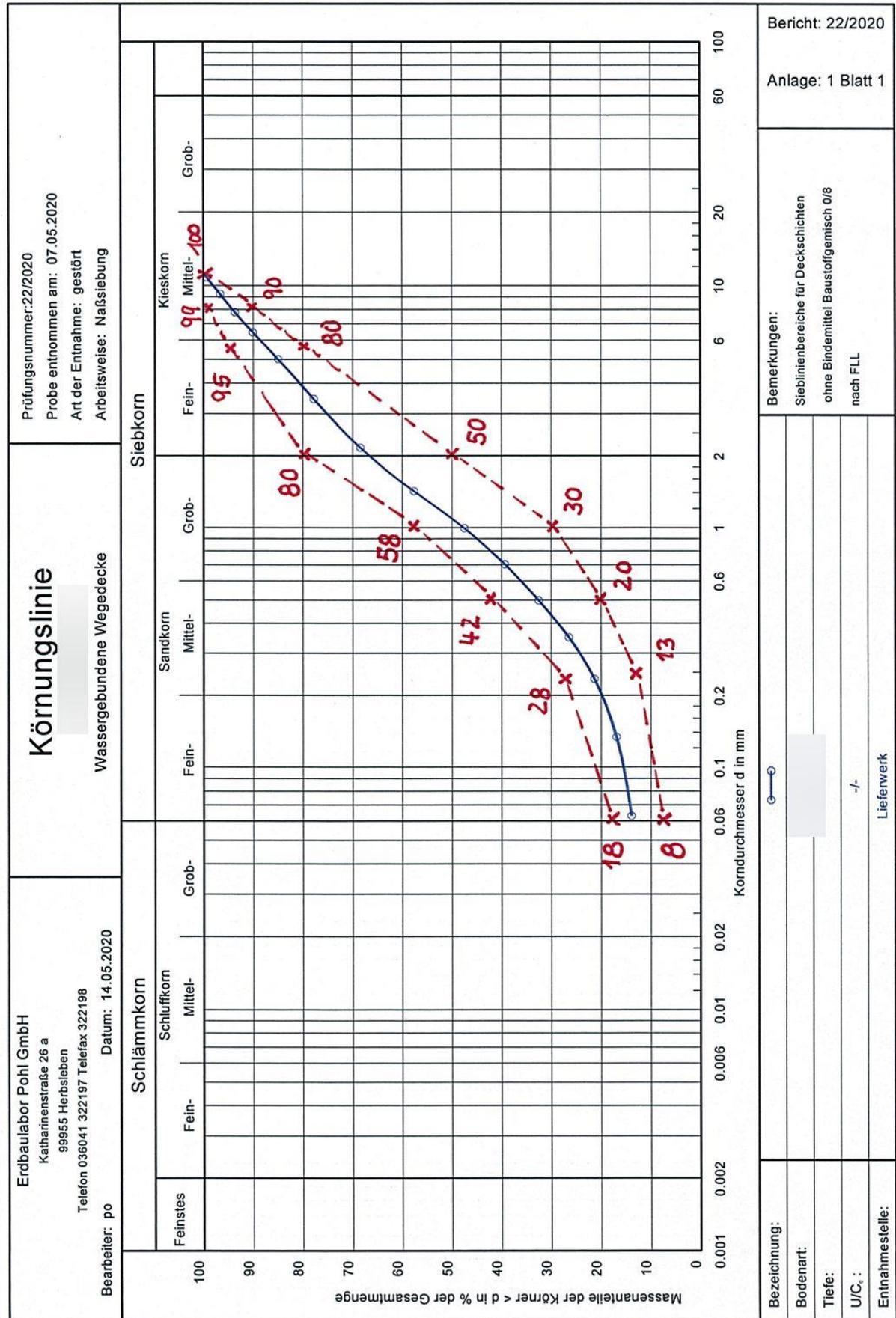
Das untersuchte Baustoffgemisch entspricht bei den untersuchten Parametern generell den Anforderungen nach FLL Fachbericht 2007 Tabelle 12 Deckschichten.

Pohl
Dipl.-Ing.



Anlagen:

- 1 Körnungslinie Blatt 1
- 2 Proctorkurve Blatt 2
- 3 Oberflächenscherfestigkeit Blatt 3
- 4 Wasserdurchlässigkeit Blatt 4



Erdbaulabor Pohl GmbH
 Katharinenstraße 26 a
 99955 Herbsleben
 Telefon 036041 322197 Fax 036041 322198

Bericht: 22/2020
 Anlage: 2 Blatt: 2

Proctorkurve nach DIN 18 127

Wassergebundene Wegedecke

Bearbeiter: po

Datum: 18.05.2020

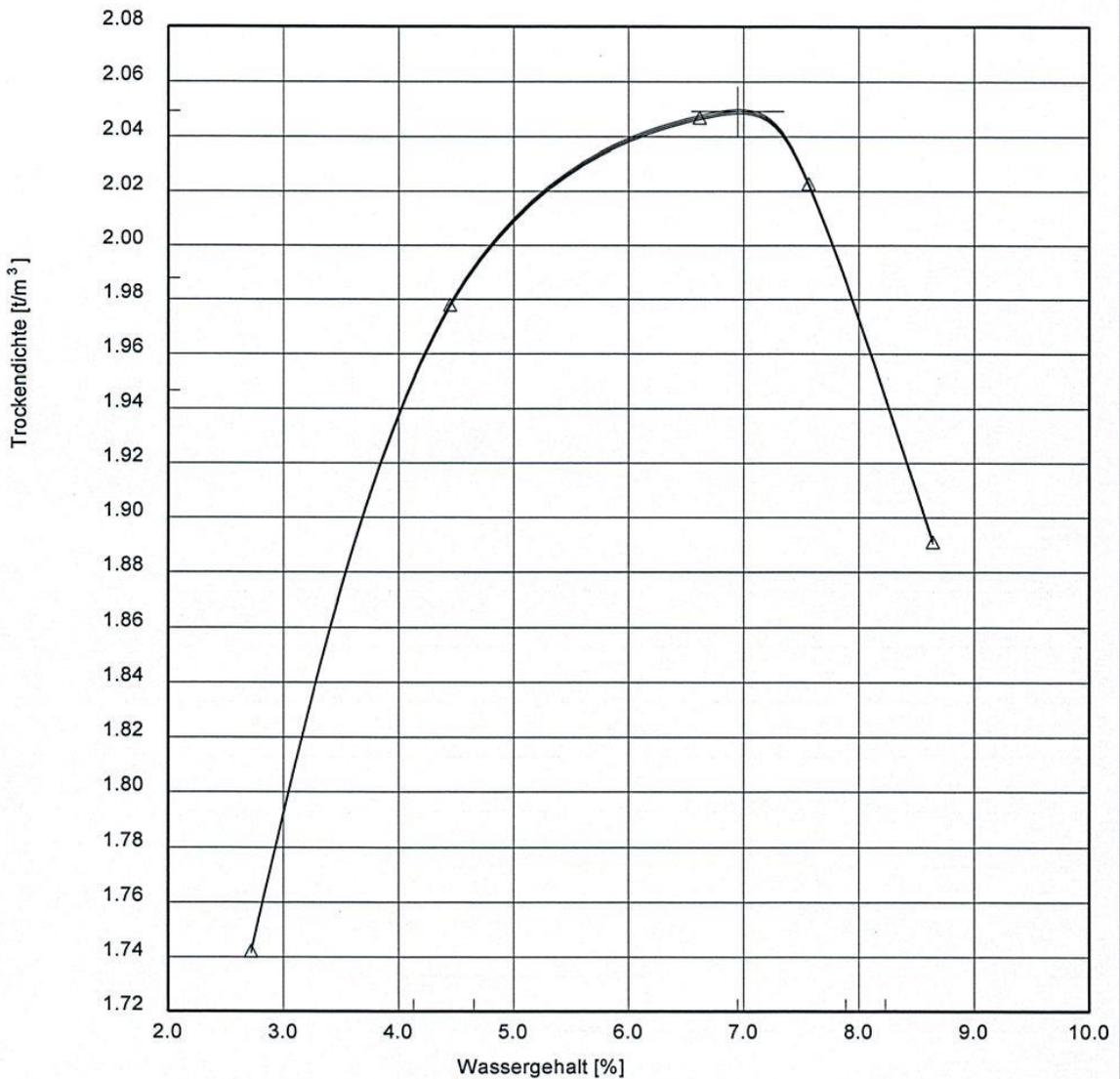
Entnahmestelle: Lieferwerk

Tiefe:

Bodenart:

Art der Entnahme: gestört / Labormischung

Probe entnommen am: 07.05.2020



100 % der Proctordichte $\rho_{Pr} = 2.049 t/m^3$

Optimaler Wassergehalt $w_{Pr} = 6.9 \%$

97.0 % der Proctordichte $\rho_d = 1.988 t/m^3$

min/max Wassergehalt $w = 4.7 / 7.9 \%$

95.0 % der Proctordichte $\rho_d = 1.947 t/m^3$

min/max Wassergehalt $w = 4.1 / 8.2 \%$

Erdbaulabor Pohl GmbH, Katharinenstraße 26 a, 99955 Herbsleben
Telefon 036041 322197 Fax 036041 322198 E-Mail erdbaualabor-pohl@gmx.de

Bestimmung der Oberflächenscherfestigkeit τ_s nach DIN 18035 Teil 5

Projekt-Nr.: 22/2020

Anlage: 3 Blatt 3

Auftraggeber:

Materialart:

Wassergebundene Wegedecke

Anforderungen: DIN 18035 Teil 5 als Deckschicht

Proctorwerte am Korngemisch 0 - 8 + Stabilisator:

Proctordichte: 2,05 g/cm³

opt. Wassergehalt: 6,9 %

Probemengenermittlung:

$$G_n = Q_{Pr} \times (1 + w_e/100) \times h \times A$$

$$G_n = 6329,32 \text{ g}$$

Versuchsergebnisse:

Messung M_{max} in kNm Versuch 1: 0,042

Messung M_{max} in kNm Versuch 2: 0,038

Messung M_{max} in kNm Versuch 3: 0,040

Mittelwert $M_{max} = 0,040$ kNm

Bestimmung Oberflächenscherfestigkeit:

$$\tau_s = M_{max} / \pi \times D^2/4 \times (H + D/8) \times 10^9$$

$$\tau_s = 105,01 \text{ kN/m}^2$$

τ_s Sollwert $\geq 50 \text{ kN/m}^2$ Anforderung erfüllt

Herbsleben, den 10.06.2020



Pohl
Dipl.-Ing.

ERDBAULABOR POHL GMBH
KATHARINENSTRASSE 26 A
99955 HER SLEBEN
☎ 036041 322197
FAX 036041 322198

Erdbaulabor Pohl GmbH, Katharinenstraße 26 a, 99955 Herbsleben
Telefon 036041 322197 Fax 036041 322198 E-Mail erdbaulabor-pohl@gmx.de

**Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit k^* nach DIN 18035 Teil 5
Prüfung nach Punkt 6.6.2 als Deckschicht**

Projekt-Nr.: 22/2020

Anlage: 4 Blatt 4

Auftraggeber:

Materialart:

Wassergebundene Wegedecke

Anforderungen: DIN 18035 Teil 5 als Deckschicht

Proctorwerte am Korngemisch 0-8 + Stabilisator:

Proctordichte: 2,05 g/cm³

opt. Wassergehalt: 6,9 %

Probemengenermittlung:

$$G_n = Q_{Pr} \times (1 + w_e/100) \times h \times D^2/4 \times \pi$$

$$G_n = 330,82 \text{ g}$$

Versuchsergebnisse:

Messungen t in s Versuch 1: 172 / 174 / 174

Messungen t in s Versuch 2: 176 / 178 / 175

Messungen t in s Versuch 3: 164 / 162 / 162

Mittelwert t = 170,8 s

Bestimmung Wasserdurchlässigkeit:

$$k^* = \Delta h / t \times h / h + 4,0$$

$$k^* = 2,93 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$$

k^* Sollwert $\geq 1,0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$

Anforderung erfüllt

Herbsleben, den 10.06.2020

ERDBAULABOR POHL GMBH
KATHARINENSTRASSE 26 A
99955 H. R. SLEBEN
036041 322197
FAX 036041 322198



Pohl
Dipl.-Ing.

Anlage 1.4: Datenblatt Baustoffgemisch UB2

Projekt Nr. 27/2020

Ausfertigung: 1

1. Vorbemerkung

Auftragsgemäß wurde bei dem angelieferten Material 0 – 8 die Korngrößenverteilung nach DIN EN 933-1, die Proctordichte nach DIN 18127, die Wasserdurchlässigkeit nach DIN 18035-5 und die Oberflächenscherfestigkeit nach DIN 18035-5 bestimmt.

2. Prüfergebnisse

2.1 Bestimmung der Körnungslinie

Das untersuchte Gemisch ist gleichmäßig abgestuft und entspricht dem empfohlenen Körnungsbereich entsprechend Fachbericht zu Planung, Bau und Instandhaltung von Wassergebundenen Wegen Punkt 5.6 Deckschicht der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. (FLL Fachbericht 2007).

Körnungslinie mit empfohlenem Körnungsbereich FLL Fachbericht 2007 siehe Anlage 1

2.2 Bestimmung der Proctordichte

$$\rho_{Pr} = 2,04 \text{ g/cm}^3$$

$$w_{Pr} = 0,083$$

Proctorkurve siehe Anlage 2

2.3 Bestimmung der Oberflächenscherfestigkeit

Im Mittel wurde eine Oberflächenscherfestigkeit von $\tau_s = 94,51 \text{ kN/m}^2$ erreicht. Der Sollwert nach DIN 18035-5 beträgt $\tau_s \geq 50 \text{ kN/m}^2$.

Einzelwerte Protokoll siehe Anlage 3

2.4 Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit

Das untersuchte Korngemisch ist als wasserdurchlässig einzustufen. Die ermittelte Wasserdurchlässigkeit $k^* = 4,88 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ genügt den Anforderungen $k^* \geq 1,0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$.

Einzelwerte Protokoll siehe Anlage 4

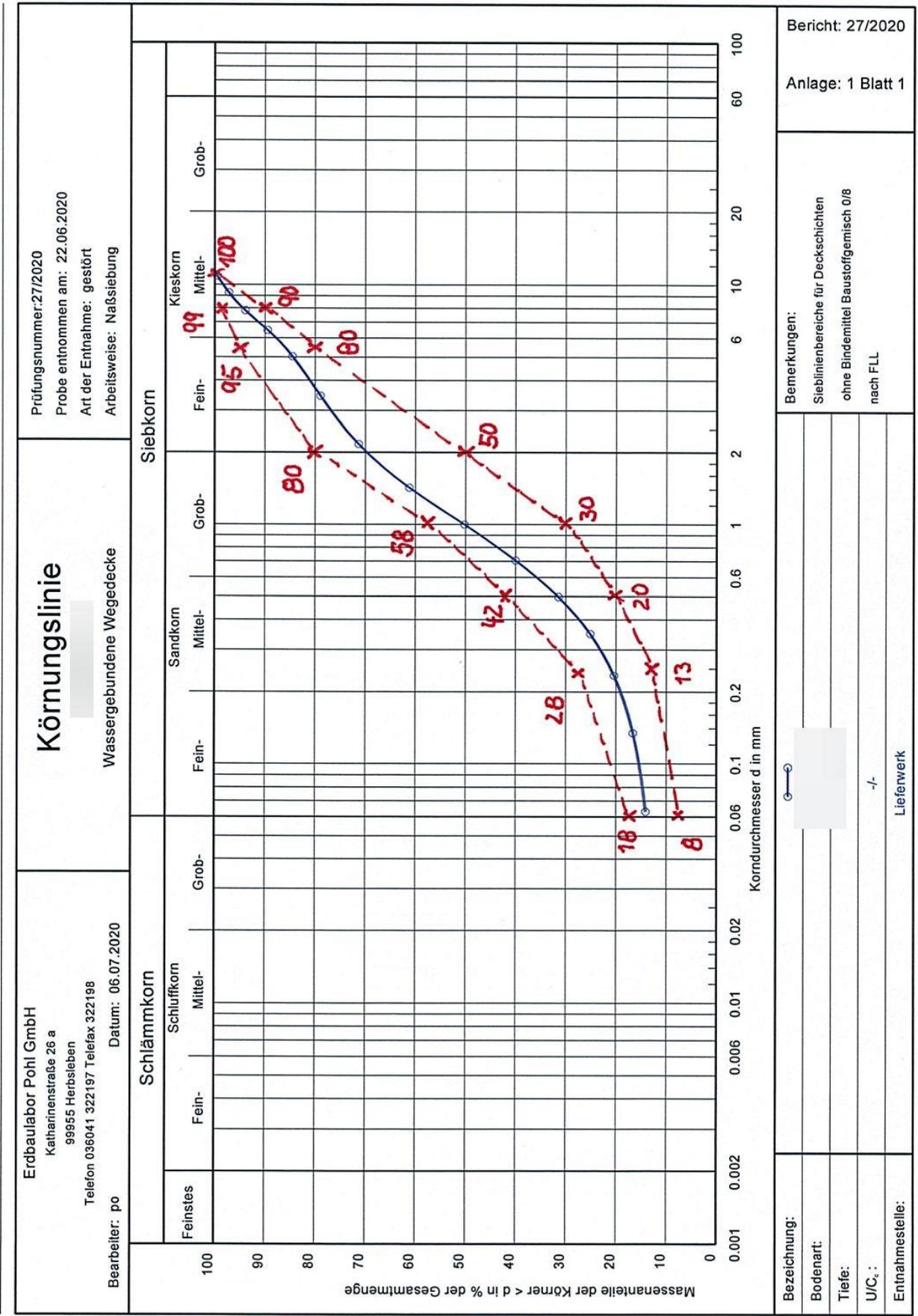
3. Bewertung

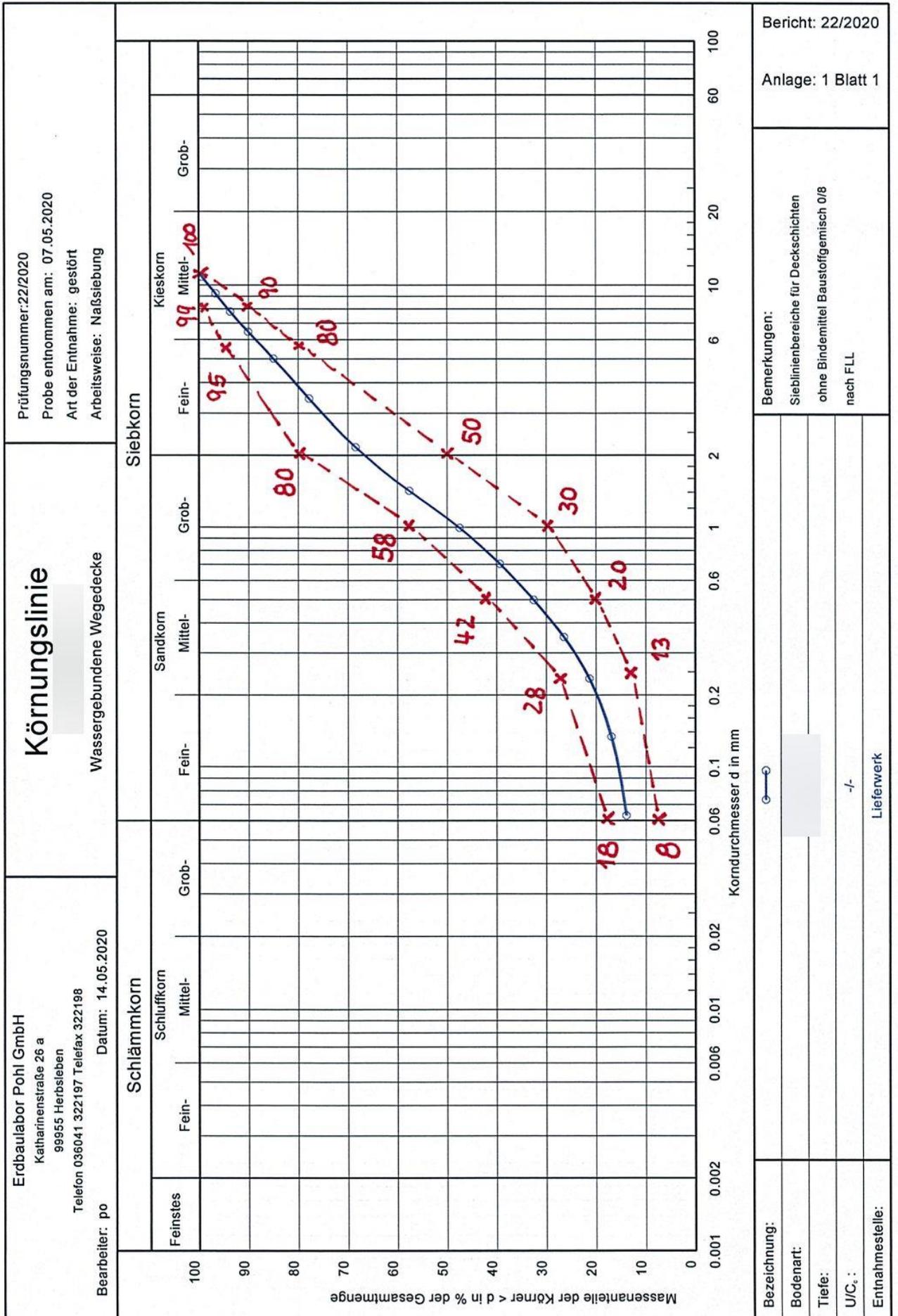
Das untersuchte Baustoffgemisch entspricht bei den untersuchten Parametern generell den Anforderungen nach FLL Fachbericht 2007 Tabelle 12 Deckschichten.



Anlagen:

- 1 Körnungslinie Blatt 1
- 2 Proctorkurve Blatt 2
- 3 Oberflächenscherfestigkeit Blatt 3
- 4 Wasserdurchlässigkeit Blatt 4





Erdbaulabor Pohl GmbH
 Katharinenstraße 26 a
 99955 Herbsleben
 Telefon 036041 322197 Fax 036041 322198

Bericht: 27/2020

Anlage: 2 Blatt 2

Proctorkurve nach DIN 18 127

Wassergebundene Wegedecke

Bearbeiter: po

Datum: 08.07.2020

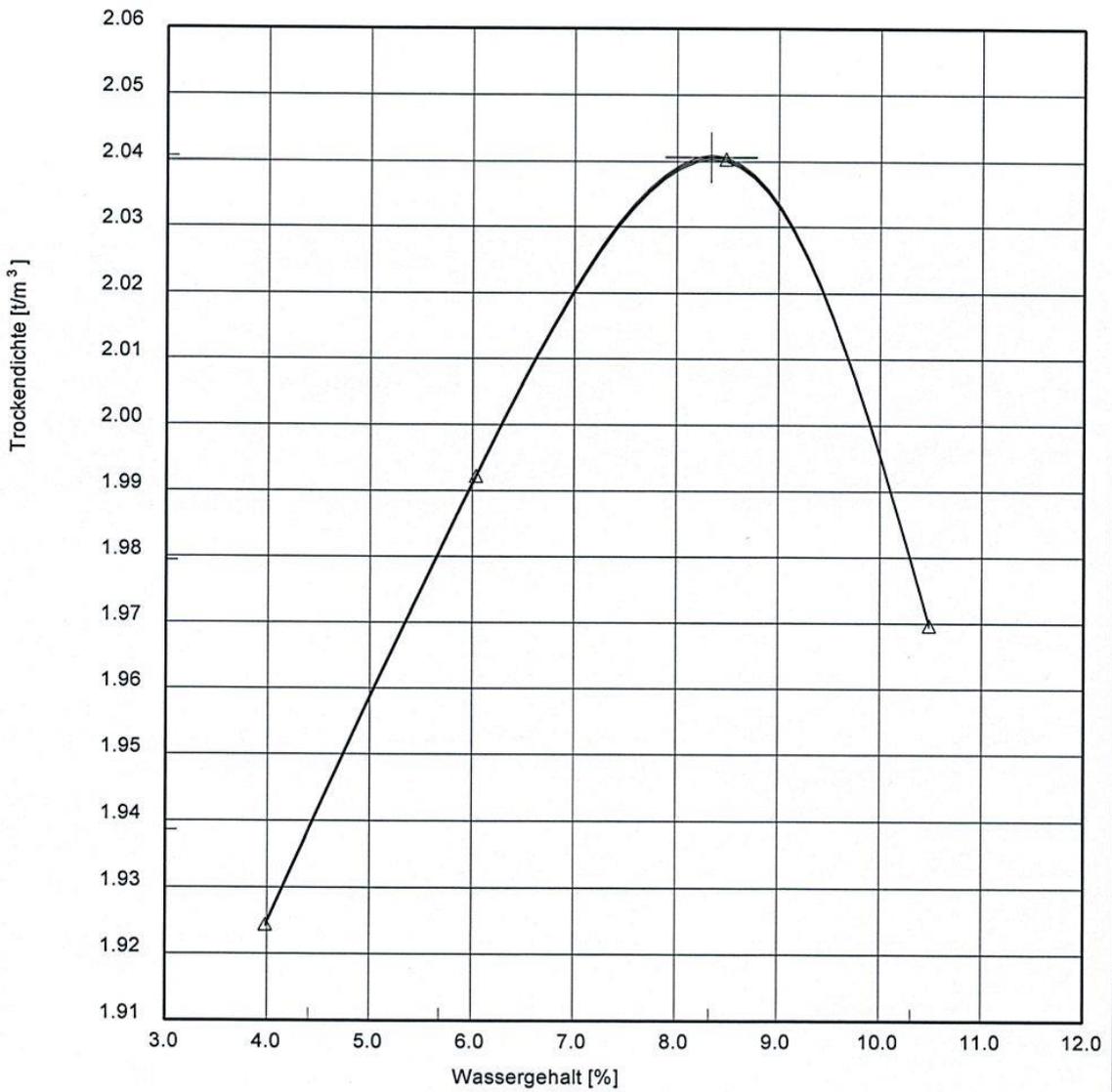
Entnahmestelle: Lieferwerk

Tiefe:

Bodenart:

Art der Entnahme: gestört

Probe entnommen am: 22.06.2020



100 % der Proctordichte $\rho_{pr} = 2.041 t/m^3$

Optimaler Wassergehalt $w_{pr} = 8.3 \%$

97.0 % der Proctordichte $\rho_d = 1.979 t/m^3$

min/max Wassergehalt $w = 5.7 / 10.3 \%$

95.0 % der Proctordichte $\rho_d = 1.939 t/m^3$

min/max Wassergehalt $w = 4.4 / - \%$

Erdbaulabor Pohl GmbH, Katharinenstraße 26 a, 99955 Herbsleben
Telefon 036041 322197 Fax 036041 322198 E-Mail erdbaualabor-pohl@gmx.de

Bestimmung der Oberflächenscherfestigkeit τ_s nach DIN 18035 Teil 5

Projekt-Nr.: 27/2020

Anlage: 3 Blatt 3

Auftraggeber:

Materialart: Wassergebundene Wegedecke

Anforderungen: DIN 18035 Teil 5 als Deckschicht

Proctorwerte am Korngemisch 0 - 8:

Proctordichte: 2,04 g/cm³
opt. Wassergehalt: 8,3 %

Probemengenermittlung:

$$G_n = Q_{Pr} \times (1 + w_e/100) \times h \times A$$
$$G_n = 6357,33 \text{ g}$$

Versuchsergebnisse:

Messung M_{max} in kNm Versuch 1:	0,036
Messung M_{max} in kNm Versuch 2:	0,034
Messung M_{max} in kNm Versuch 3:	0,038

Mittelwert $M_{max} = 0,036 \text{ kNm}$

Bestimmung Oberflächenscherfestigkeit:

$$\tau_s = M_{max} / \pi \times D^2/4 \times (H + D/8) \times 10^9$$

$$\tau_s = 94,51 \text{ kN/m}^2$$

τ_s Sollwert $\geq 50 \text{ kN/m}^2$ Anforderung erfüllt

Herbsleben, den 15.07.2020

ERDBAULABOR POHL GMBH
KATHARINENSTRASSE 26 A
99955 HERBSLEBEN
☎ 036041 322197
FAX 036041 322198

Pohl
Dipl.-Ing.



Erdbaulabor Pohl GmbH, Katharinenstraße 26 a, 99955 Herbsleben
Telefon 036041 322197 Fax 036041 322198 E-Mail erdbaulabor-pohl@gmx.de

**Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit k^* nach DIN 18035 Teil 5
Prüfung nach Punkt 6.6.2 als Deckschicht**

Projekt-Nr.: 27/2020

Anlage: 4 Blatt 4

Auftraggeber:

Materialart: Wassergebundene Wegedecke

Anforderungen: DIN 18035 Teil 5 als Deckschicht

Proctorwerte am Korngemisch 0-8:

Proctordichte: 2,04 g/cm³

opt. Wassergehalt: 8,3 %

Probemengenermittlung:

$$G_n = \rho_{Pr} \times (1 + w_e/100) \times h \times D^2/4 \times \pi$$
$$G_n = 332,28 \text{ g}$$

Versuchsergebnisse:

Messungen t in s Versuch 1: 110 / 112 / 114

Messungen t in s Versuch 2: 104 / 104 / 102

Messungen t in s Versuch 3: 90 / 92 / 94

Mittelwert t = 102,5 s

Bestimmung Wasserdurchlässigkeit:

$$k^* = \Delta h / t \times h / h + 4,0$$

$$k^* = 4,88 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$$

k^* Sollwert $\geq 1,0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ Anforderung erfüllt

Herbsleben, den 15.07.2020

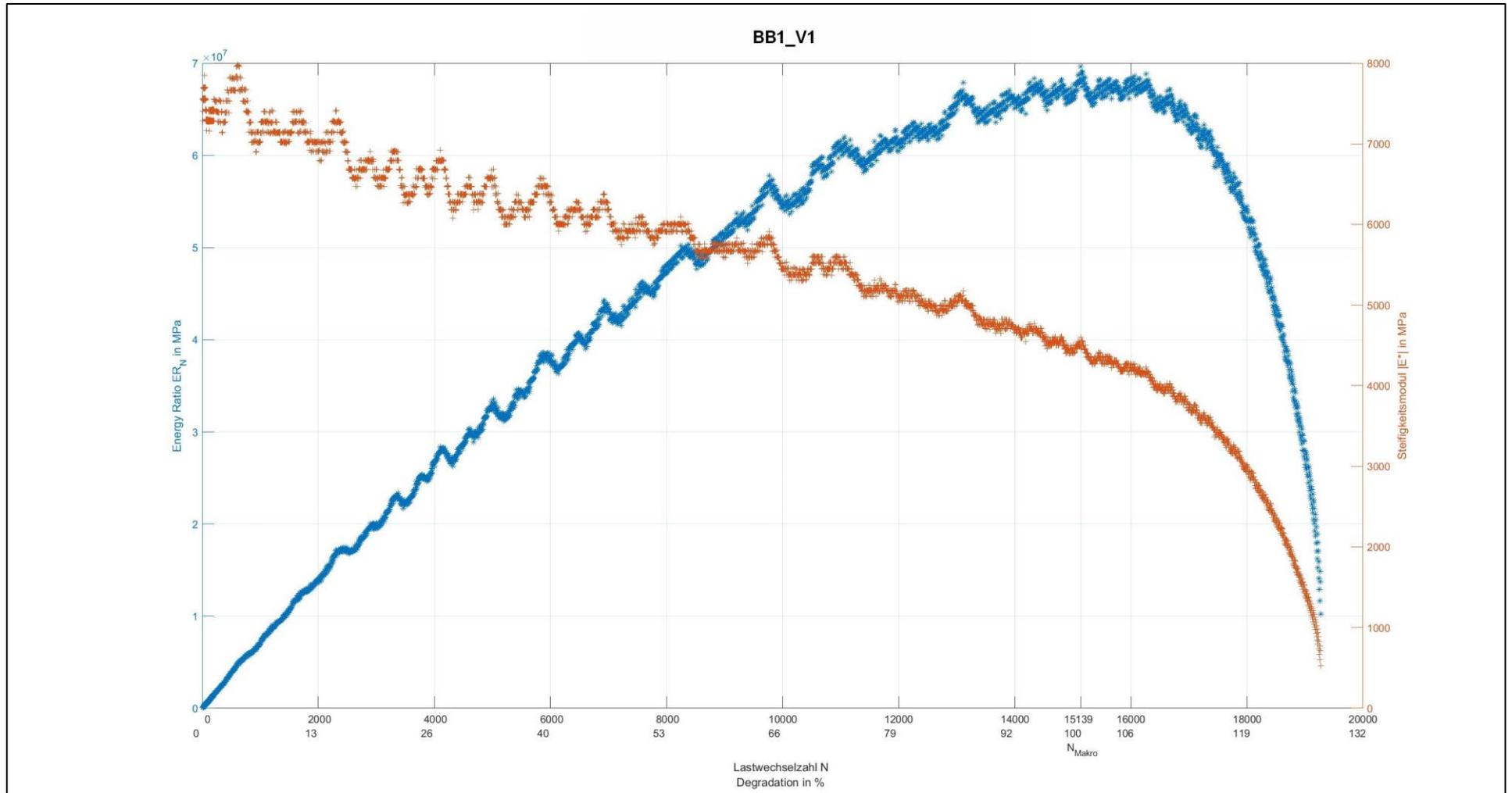


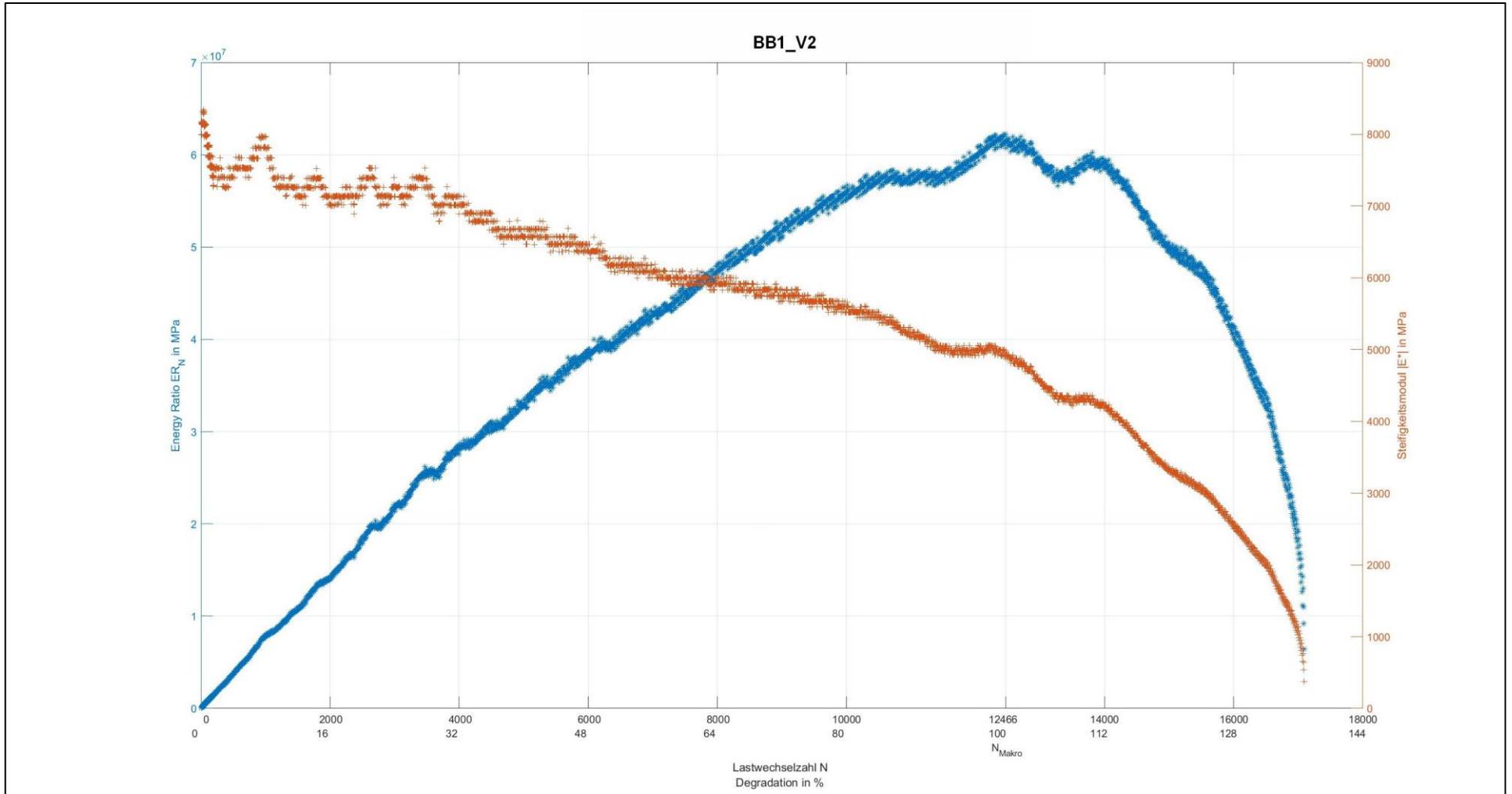
ERDBAULABOR POHL GMBH
KATHARINENSTRASSE 26 A
99955 HERBSLEBEN
☎ 036041 322197
FAX 036041 322198

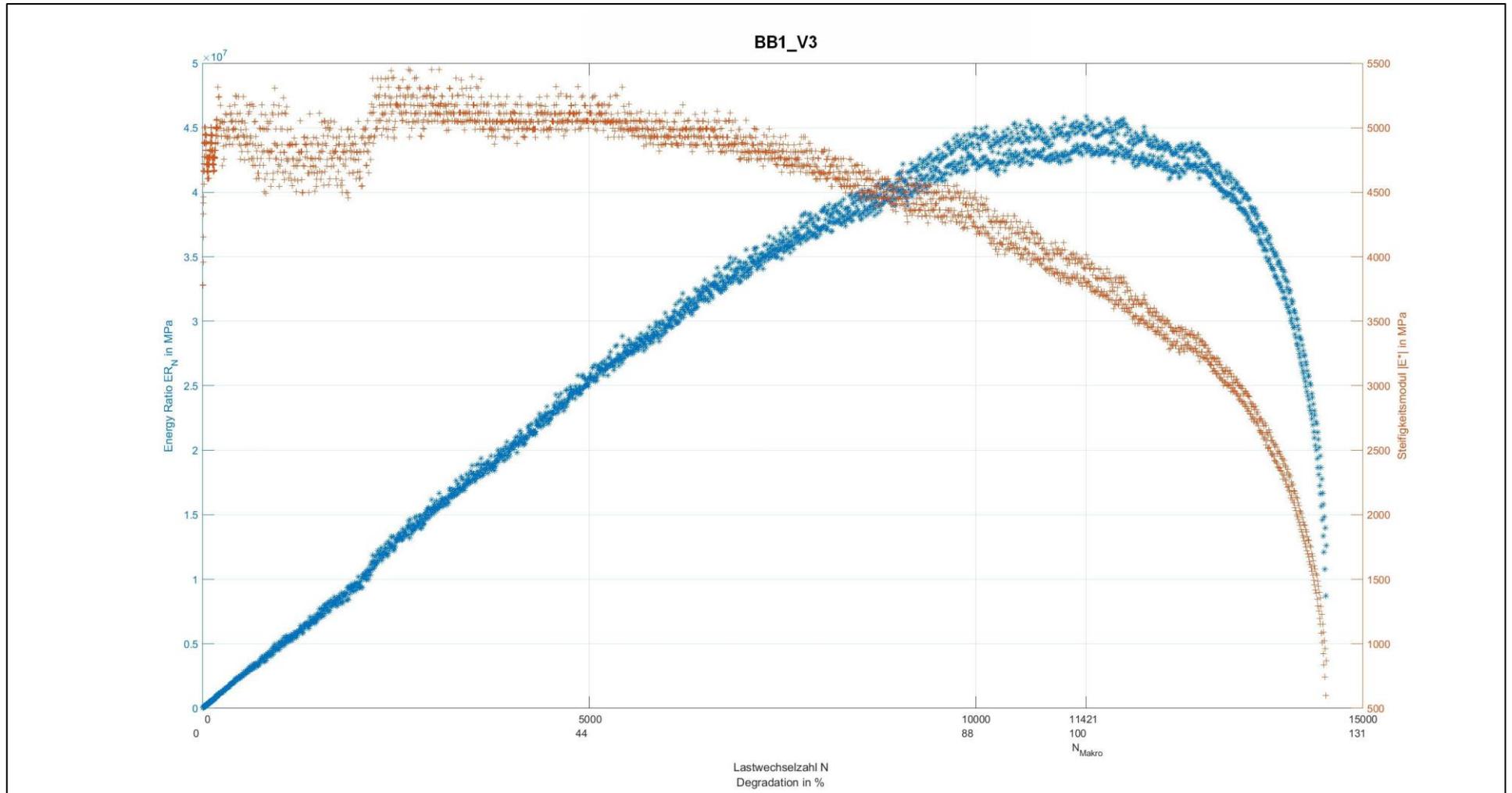
Pohl
Dipl.-Ing.

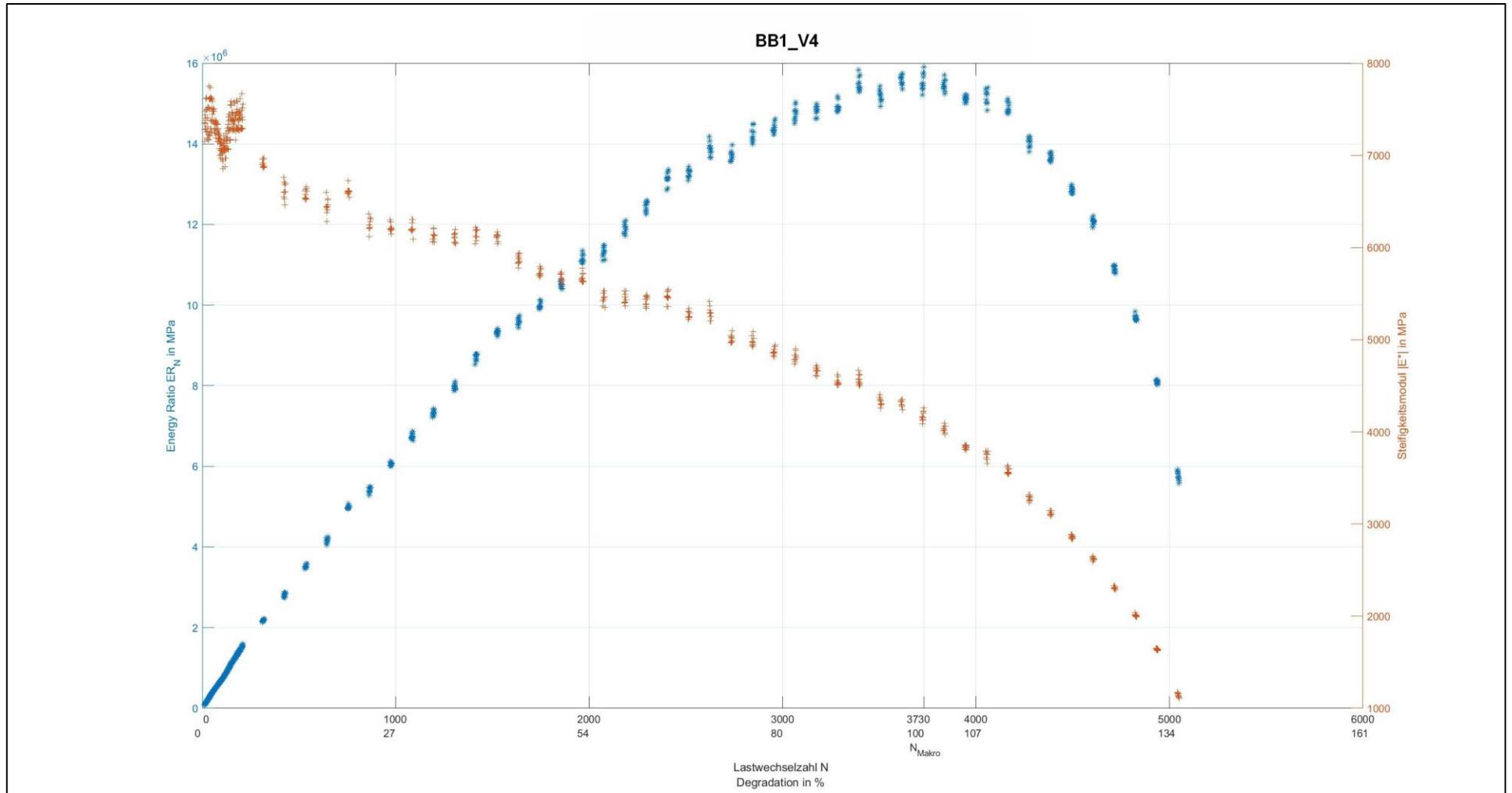
Tab. A.1: Ergebnisse der Versuche zum Ermüdungsverhalten des Baustoffgemisches BB1

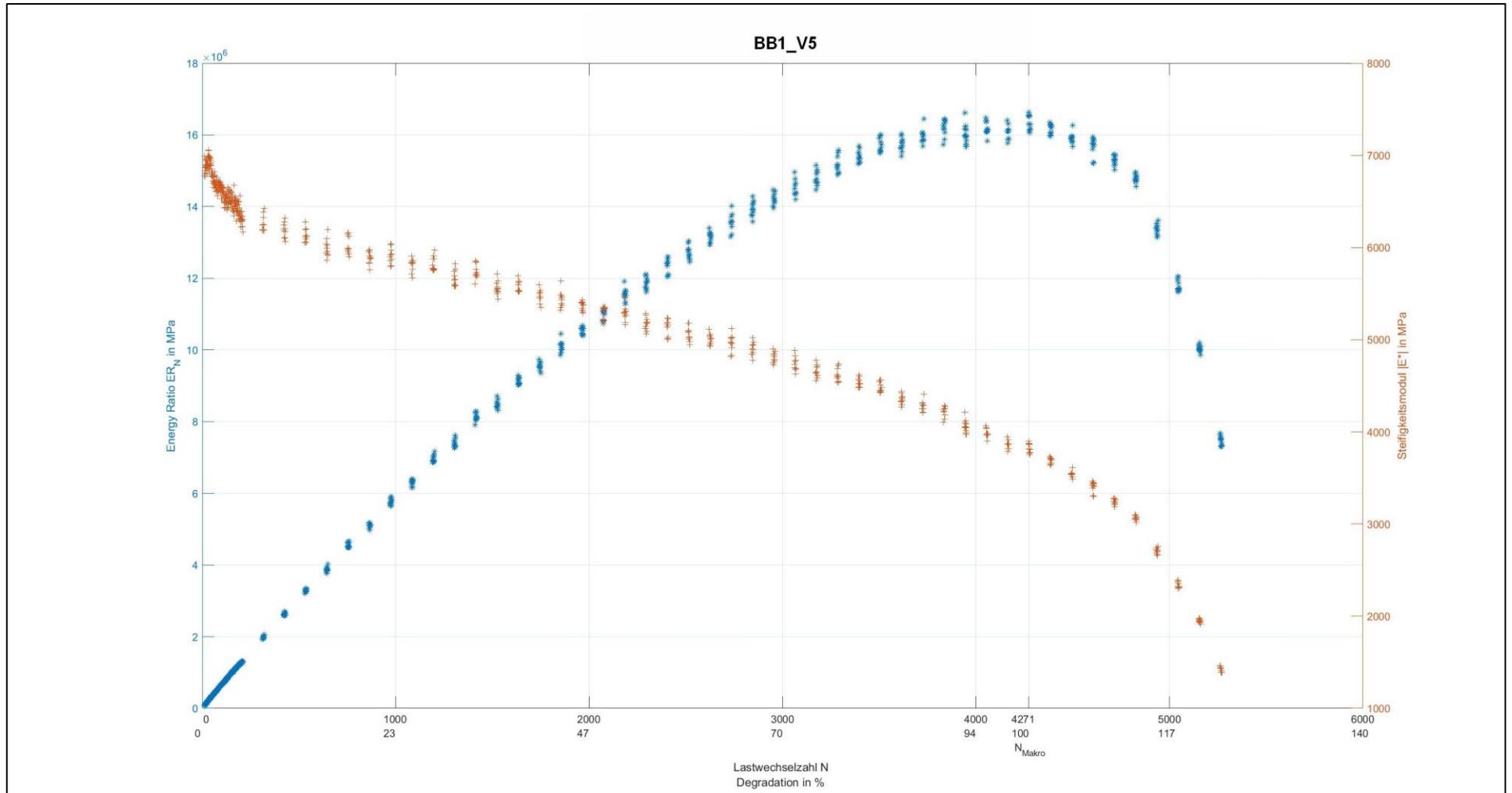
Probekörpernr.	Durchmesser d [mm]	Höhe h [mm]	Temperatur t [°C]	Frequenz f [Hz]	Oberspannung σ_o [MPa]	Unterspannung σ_u [Mpa]	Elastische Anfangsdehnung $E_{el, anf}$ [% ₀]	Lastwechselzahl N_{Makro} [-]
1	100	40	20	0,5	0,5	0,3	0,1073	15139
2	100	39	20	0,5	0,5	0,3	0,0993	12466
3	100	39	20	0,5	0,5	0,3	0,1315	11421
4	100	39	20	0,5	0,6	0,3	0,1382	3730
5	100	38	20	0,5	0,6	0,3	0,1460	4271
6	100	38	20	0,5	0,6	0,3	0,1549	3942
7	100	40	20	0,5	0,7	0,3	0,2001	2643
8	100	40	20	0,5	0,7	0,3	0,1799	3435
9	100	39	20	0,5	0,7	0,3	0,1611	2182

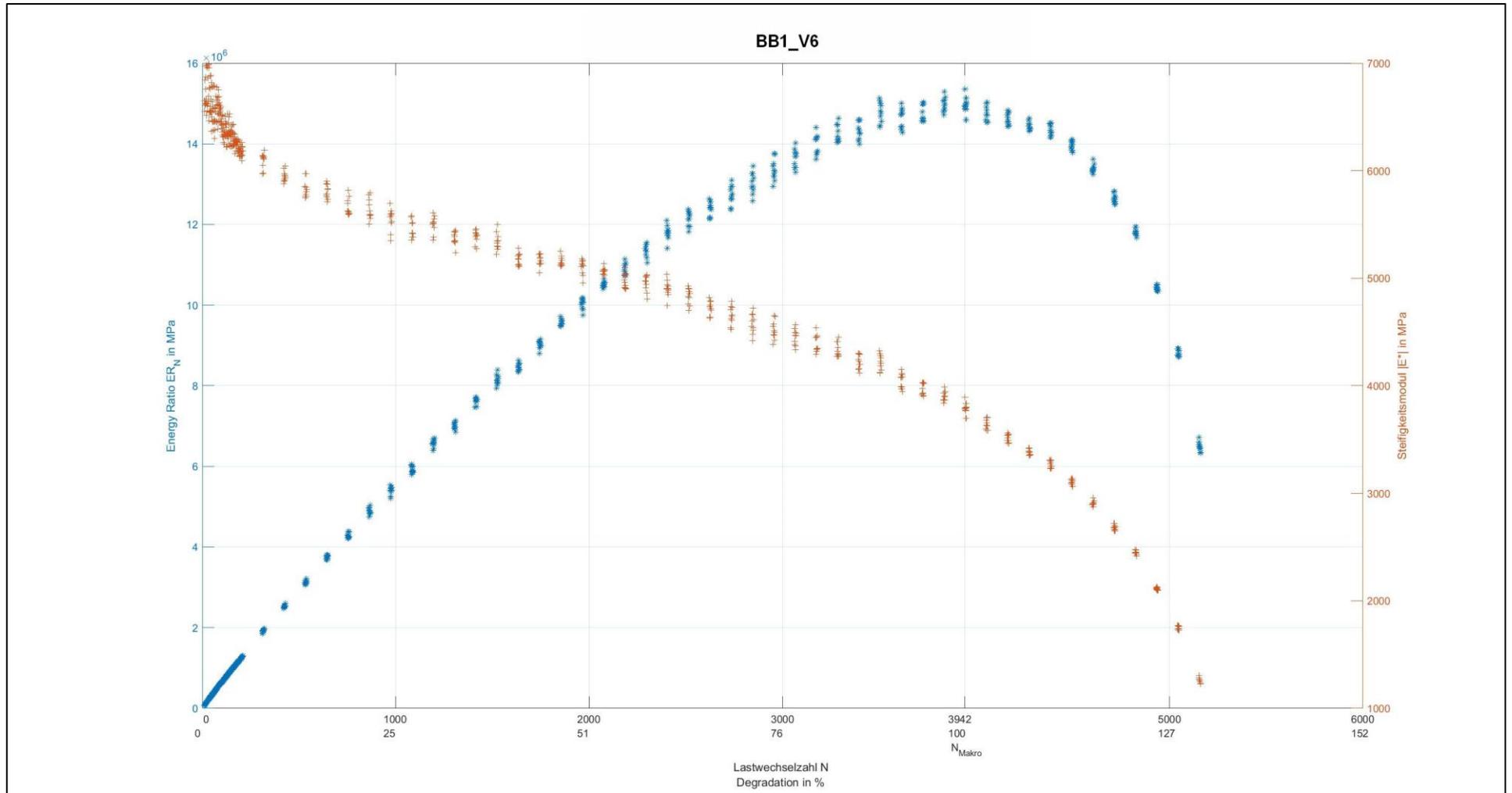


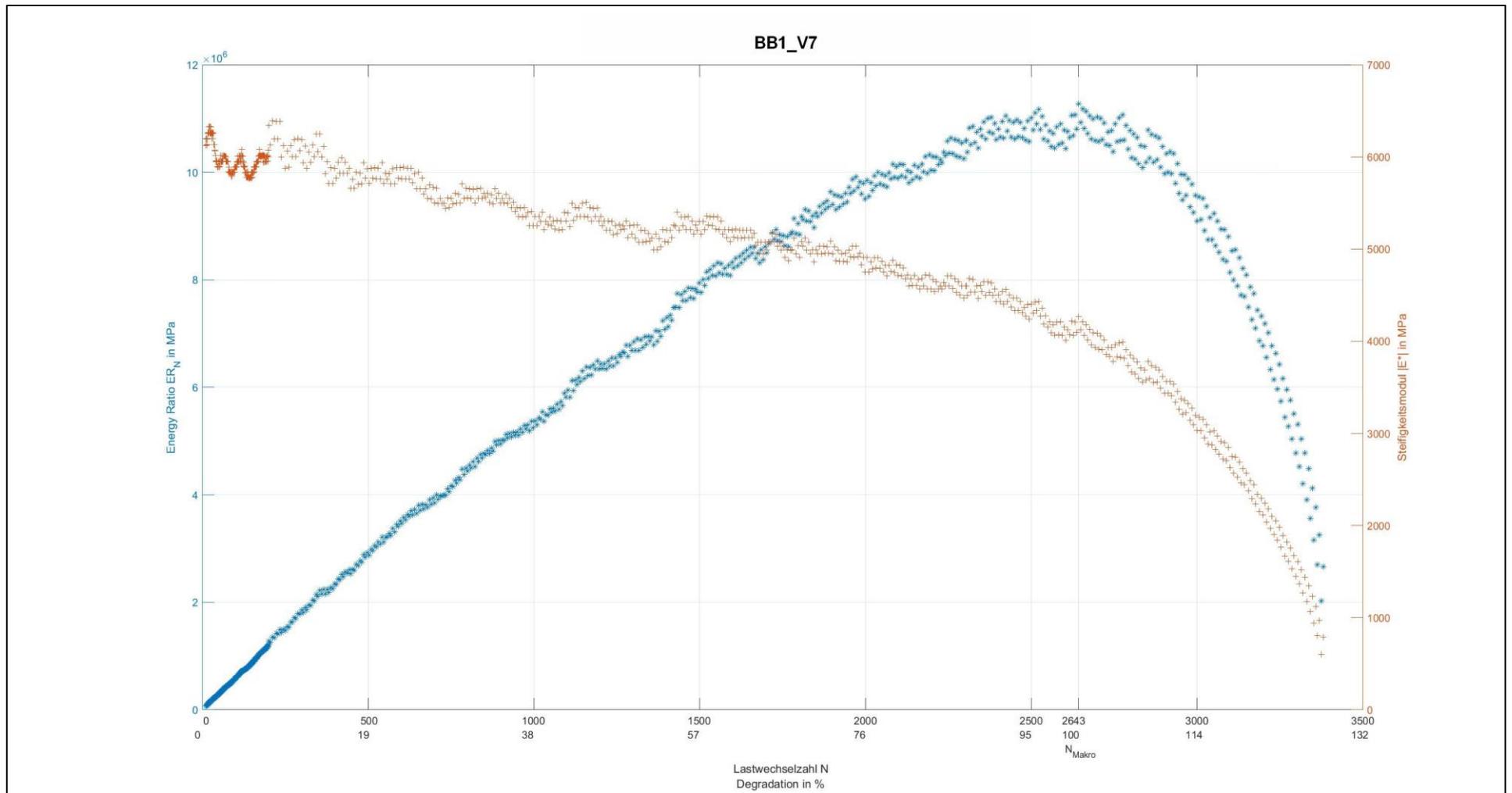


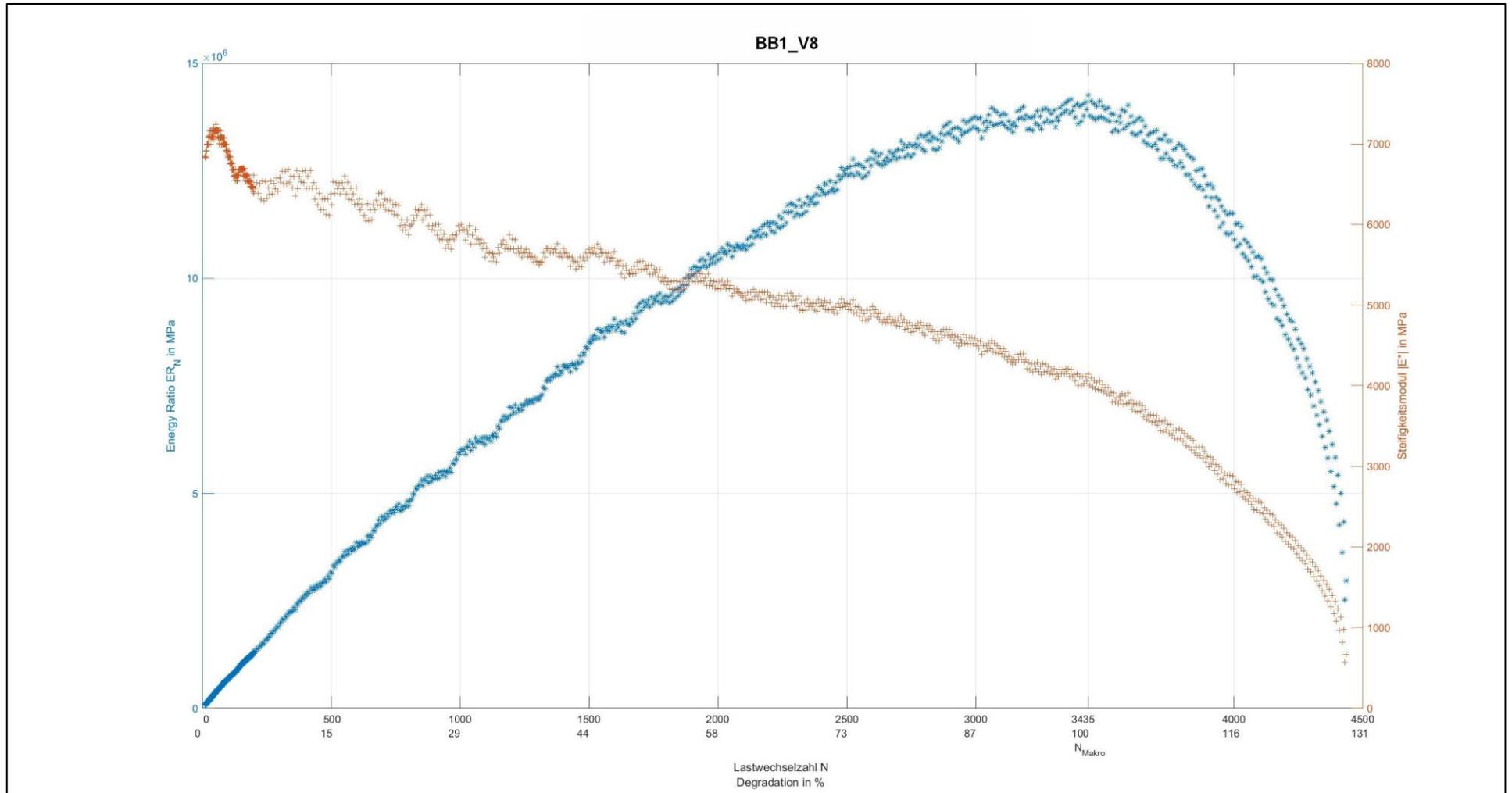


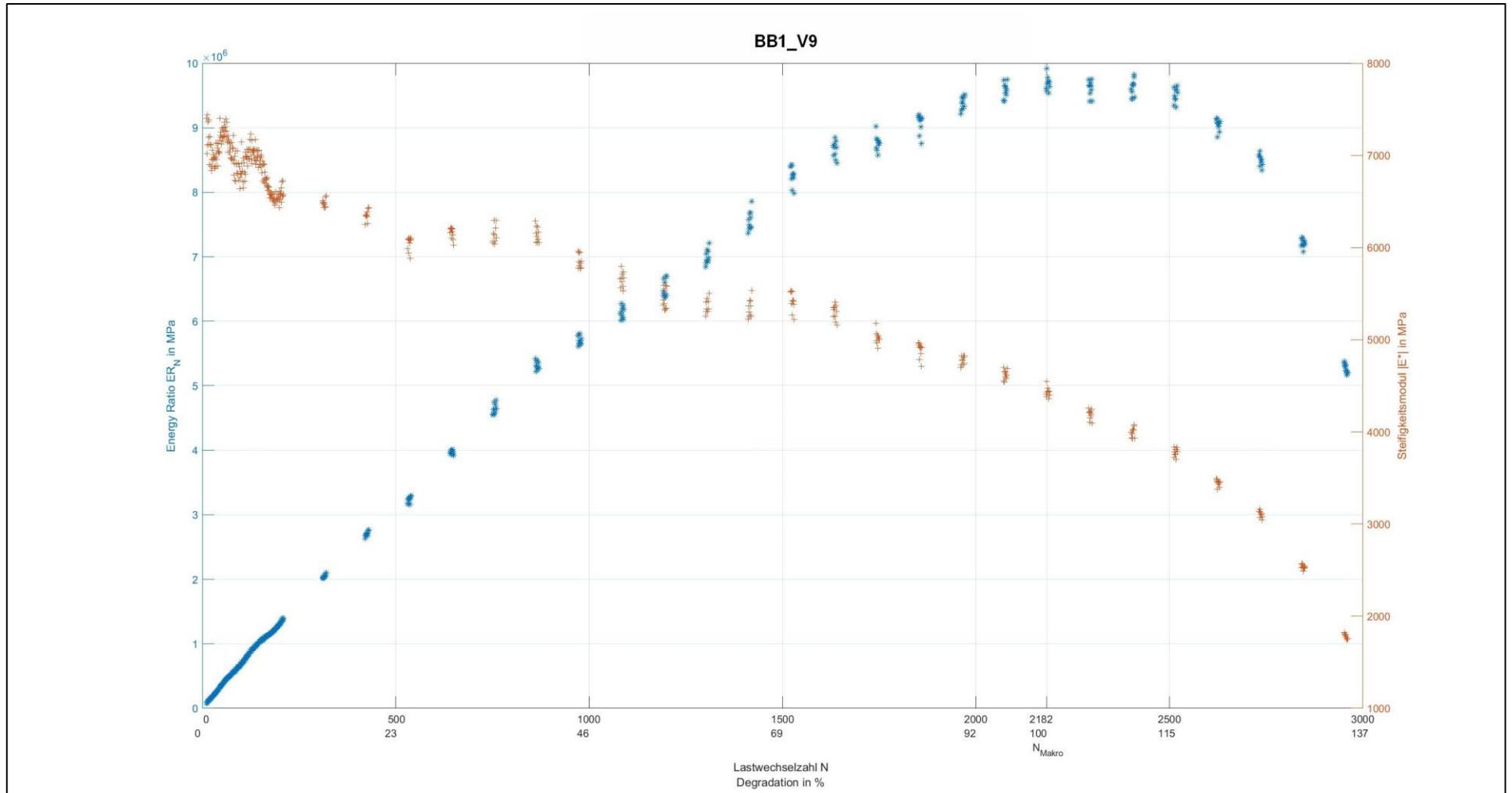












Anlage 2.2: Baustoffgemisch BB2

Zeitraffer Video als digitale Anlage:

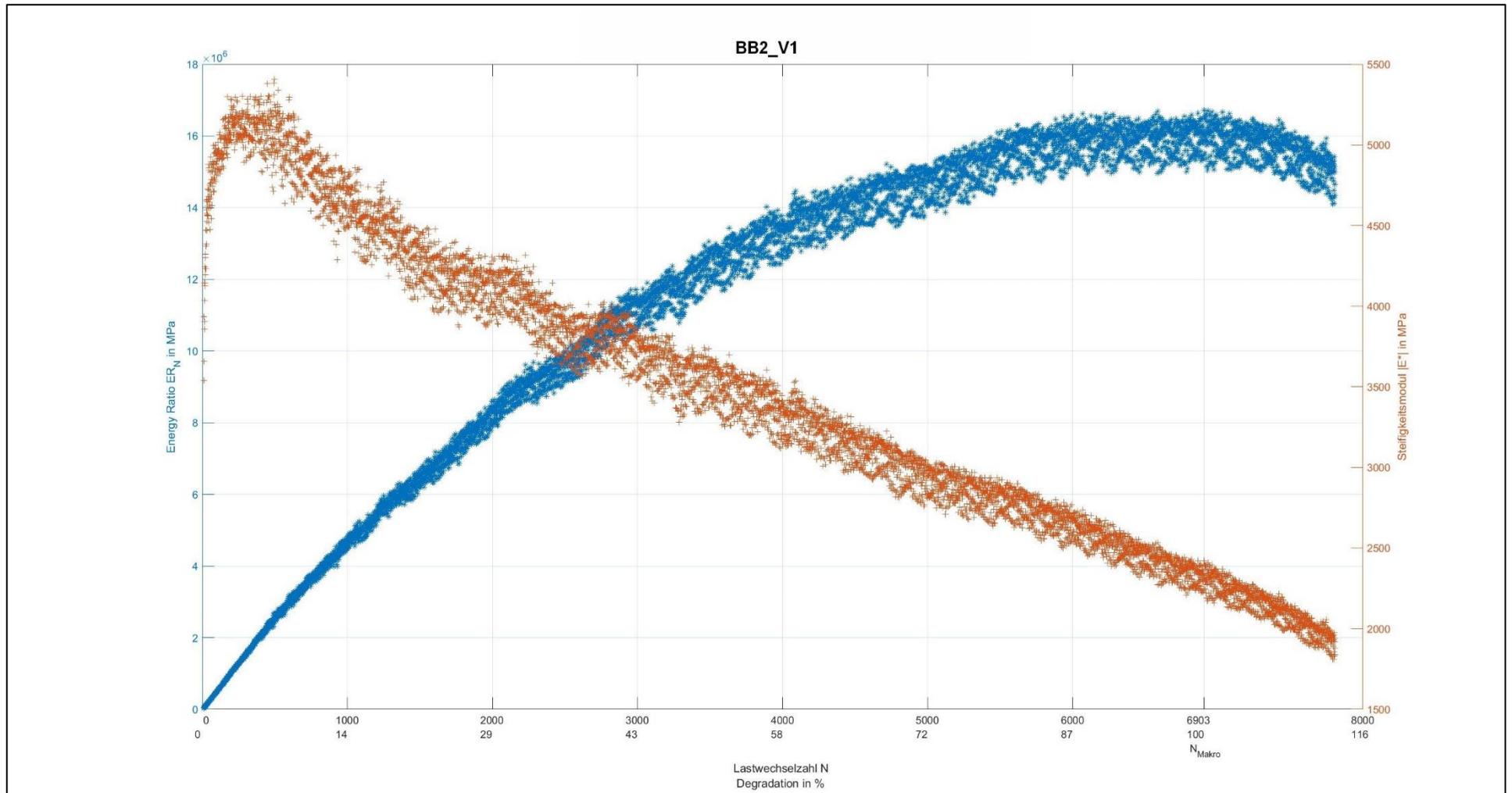
Ordner: Anlage D2 Videos Spaltzugschwellversuch_Ermuedung

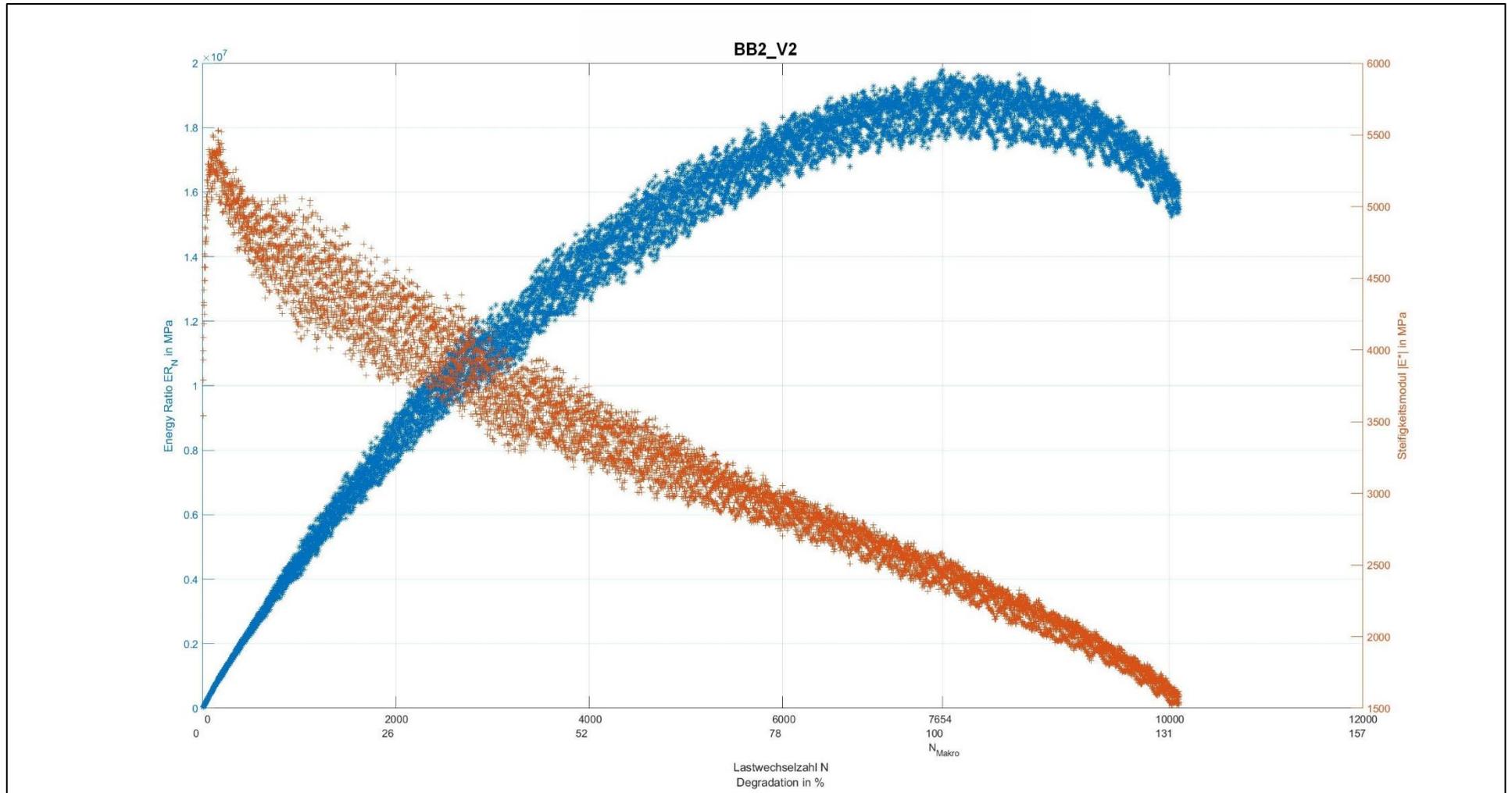
Inhalt: D2.2 Spaltzugschwellversuch_Ermuedung_BB2

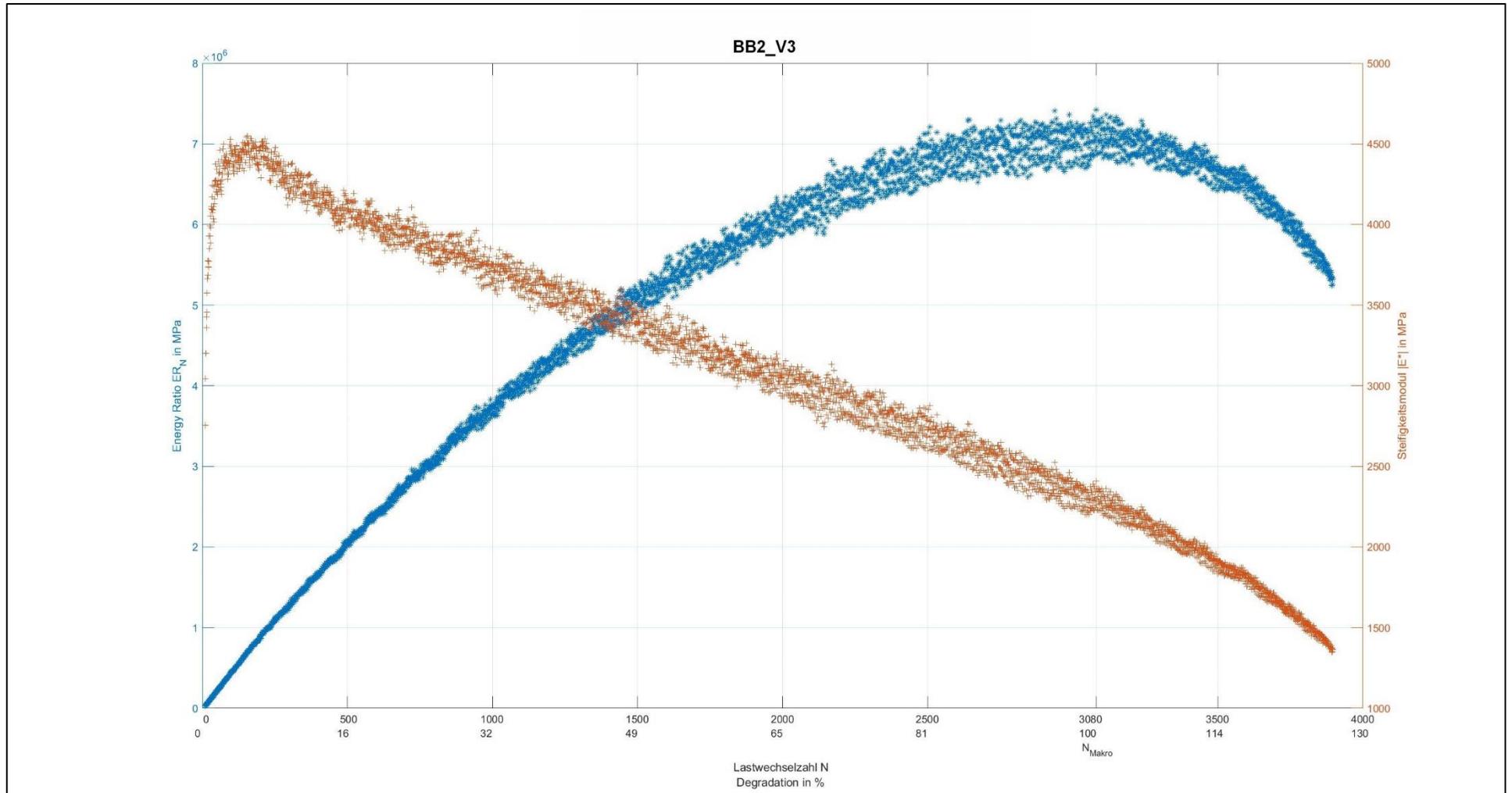
Mp4

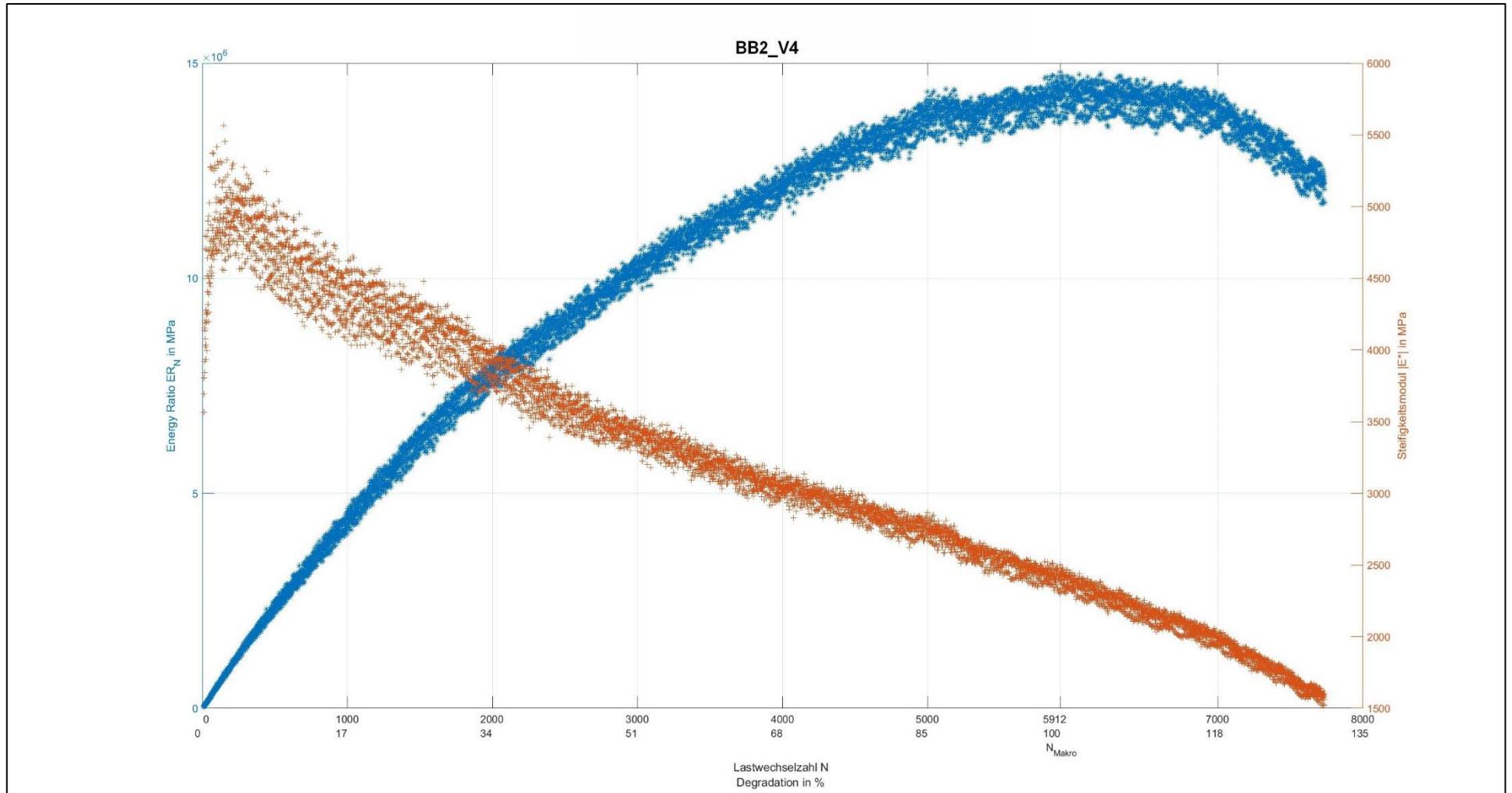
Tab. A.2: Ergebnisse der Versuche zum Ermüdungsverhalten des Baustoffgemisches BB2

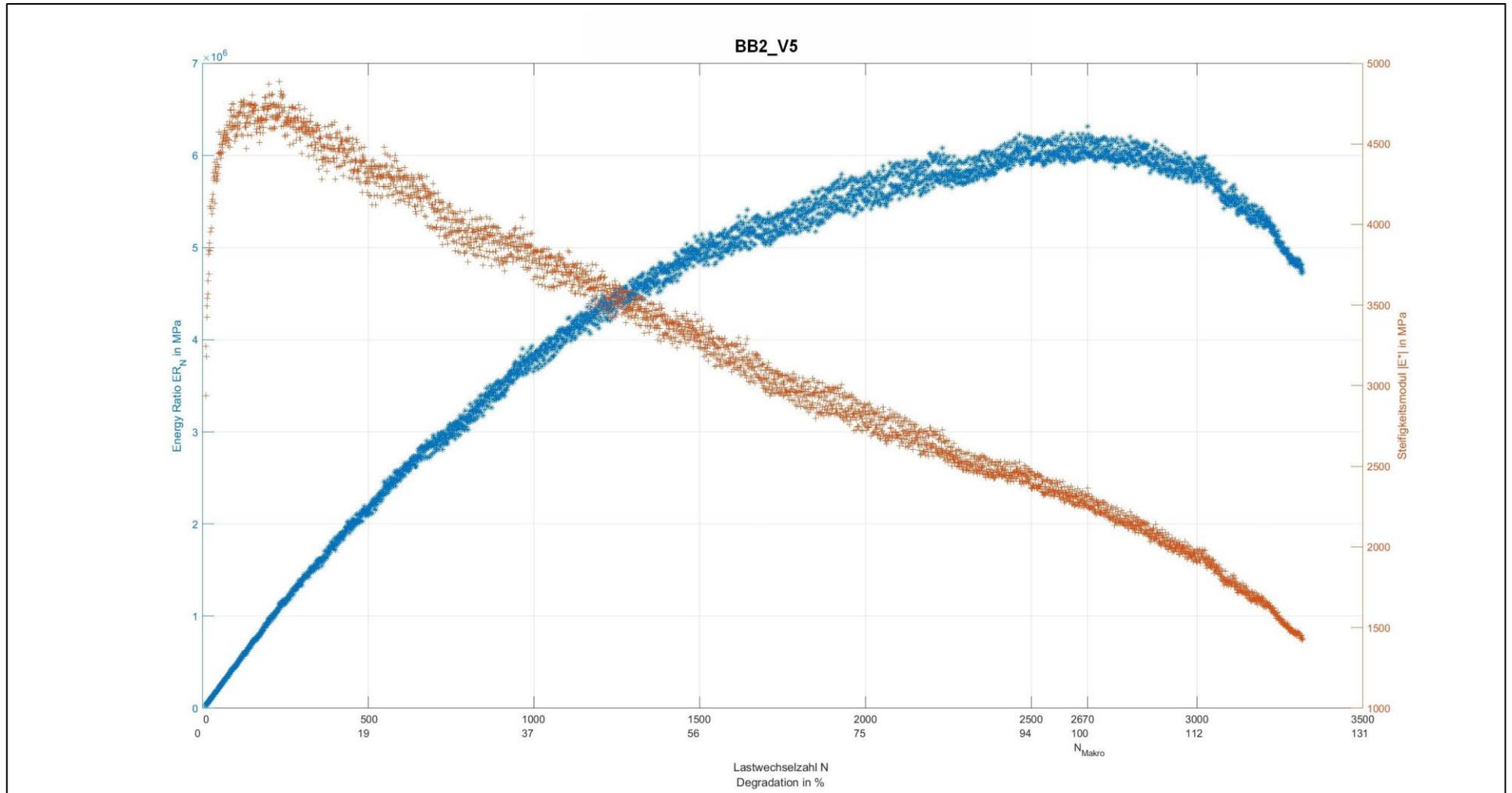
Probekörpernr.	Durchmesser d [mm]	Höhe h [mm]	Temperatur t [°C]	Frequenz f [Hz]	Oberspannung σ_o	Unterspannung σ_u [MPa]	Elastische Anfangsdehnung $E_{el, anf}$ [% ₀]	Lastwechselzahl N_{Makro} [-]
1	100	39	20	0,5	0,3	0,3	0,1010	6903
2	100	40	20	0,5	0,3	0,3	0,1029	7654
3	100	40	20	0,5	0,4	0,3	0,1740	3080
4	100	40	20	0,5	0,4	0,3	0,0990	5912
5	100	40	20	0,5	0,4	0,3	0,1641	2670
6	100	40	20	0,5	0,4	0,3	0,1549	2695
7	100	40	20	0,5	0,5	0,3	0,2309	1651
8	100	39	20	0,5	0,5	0,3	0,2287	1530
9	100	39	20	0,5	0,5	0,3	0,1689	1764

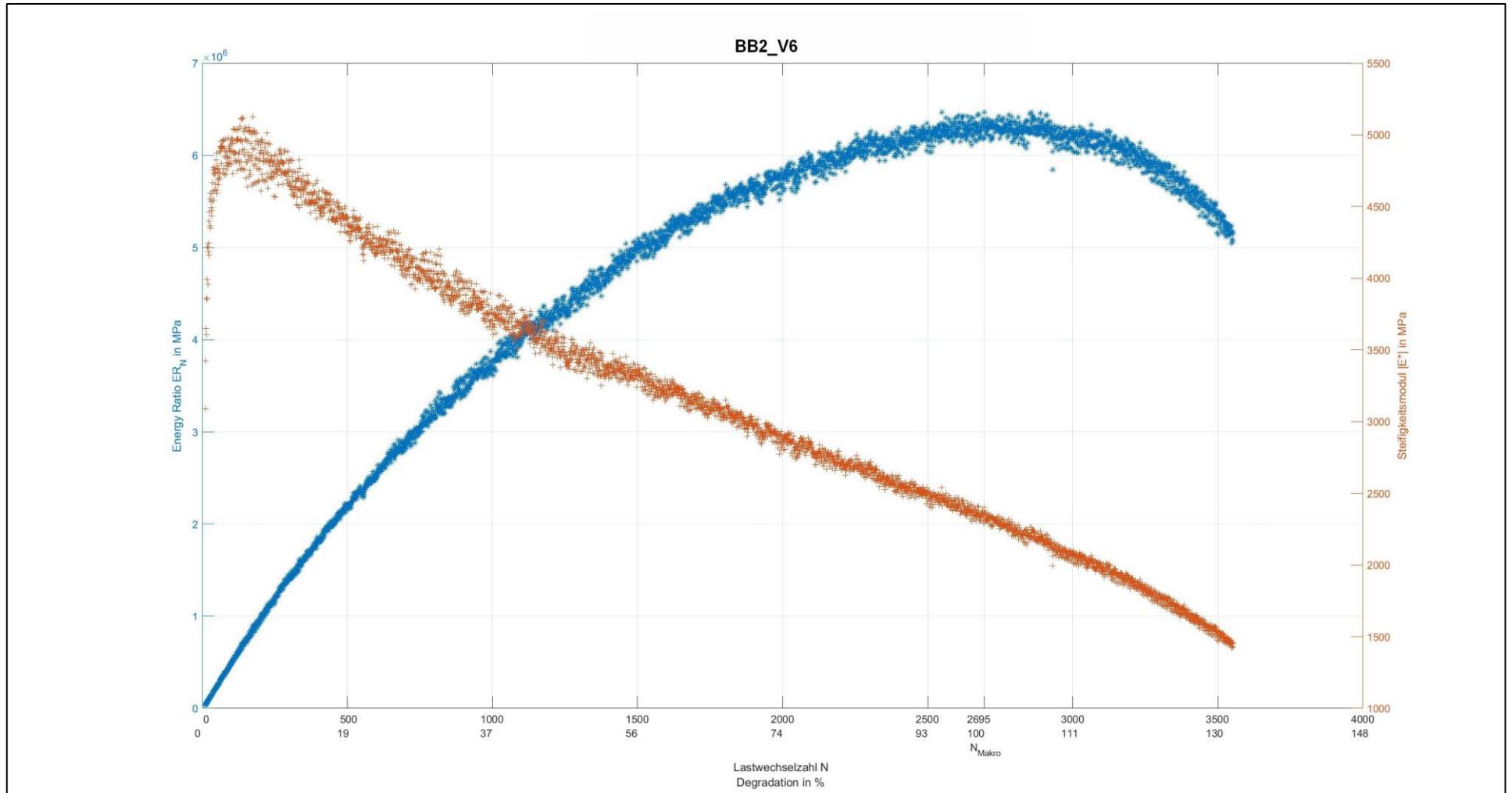


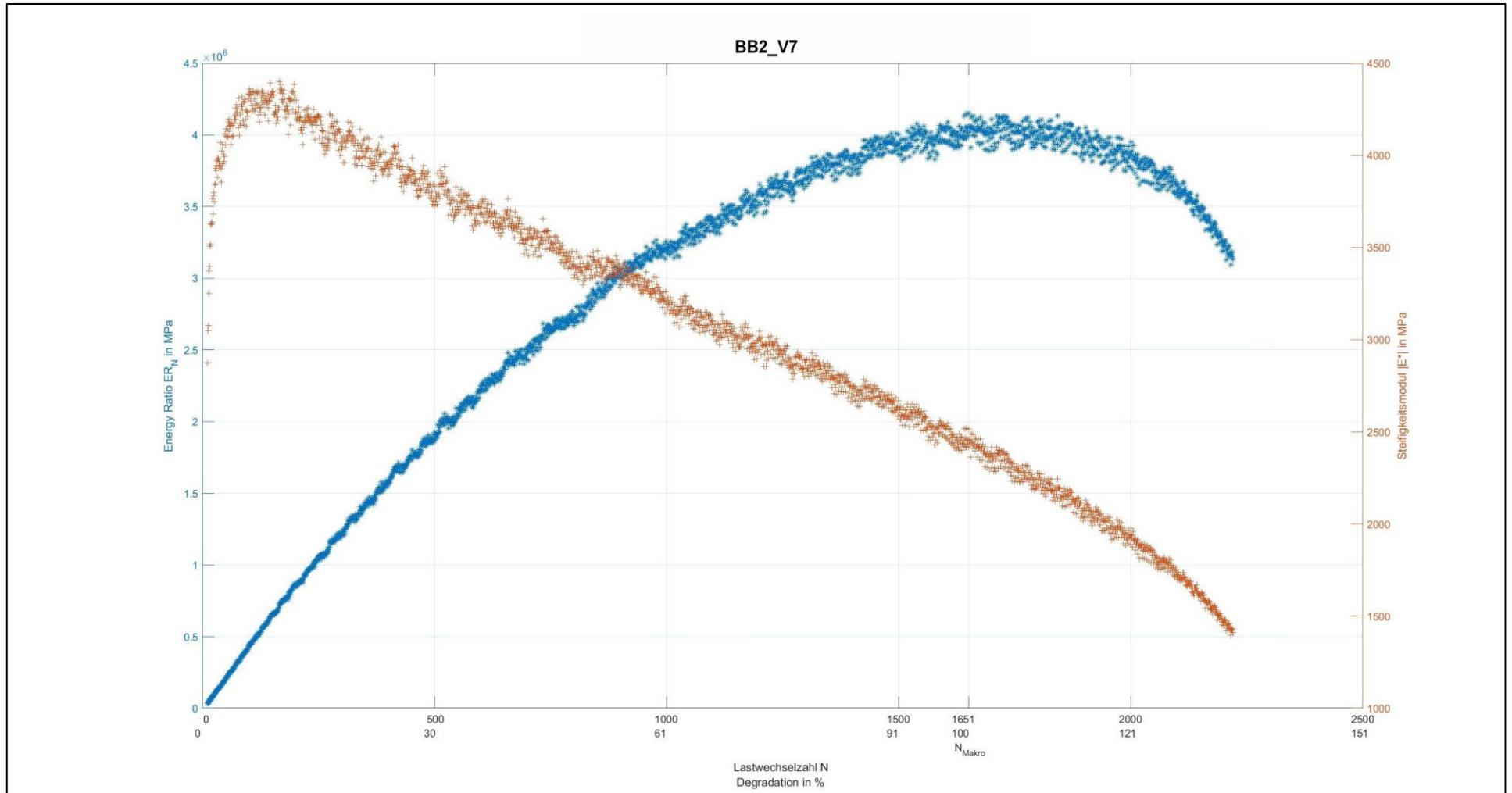


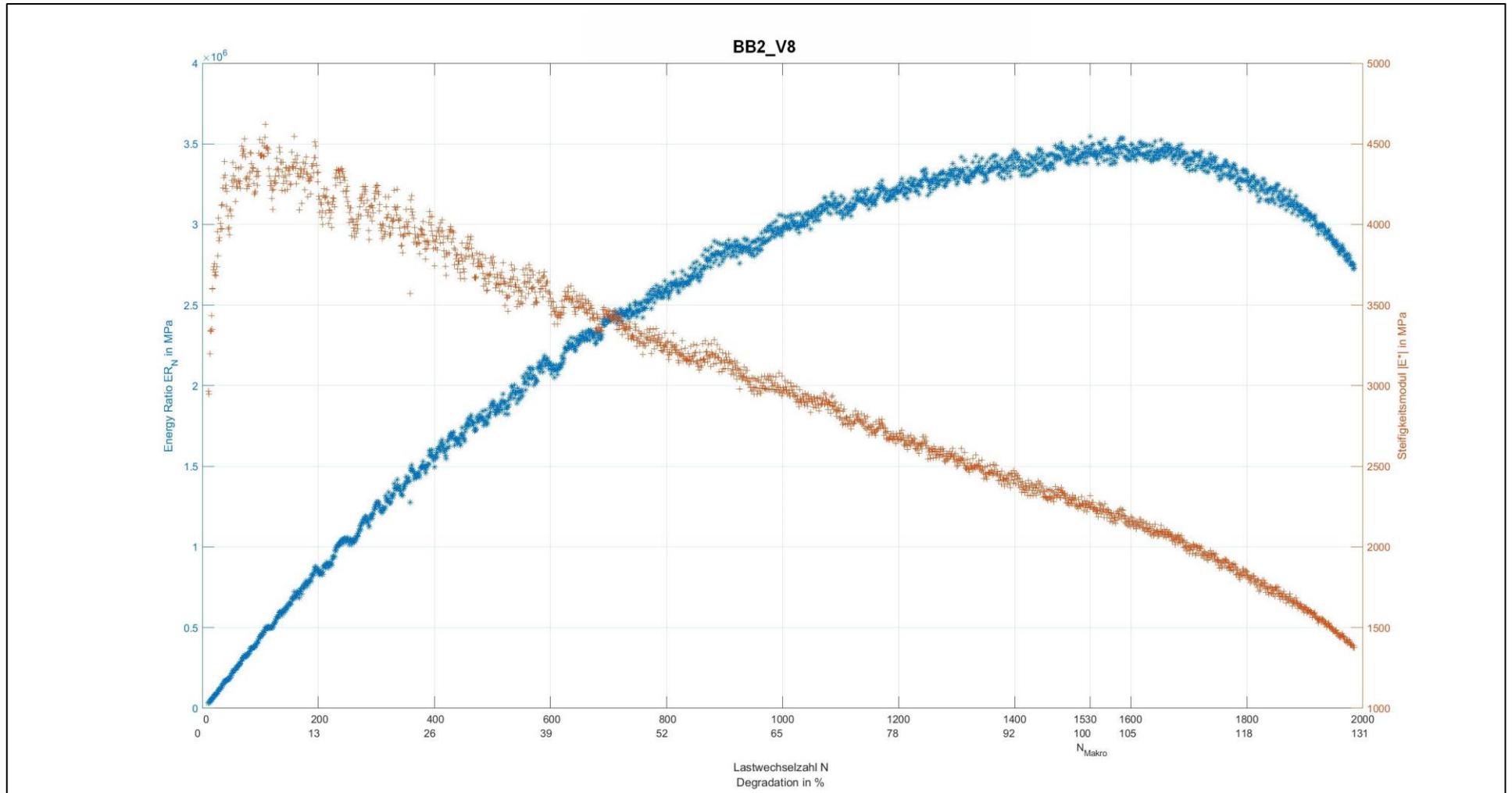


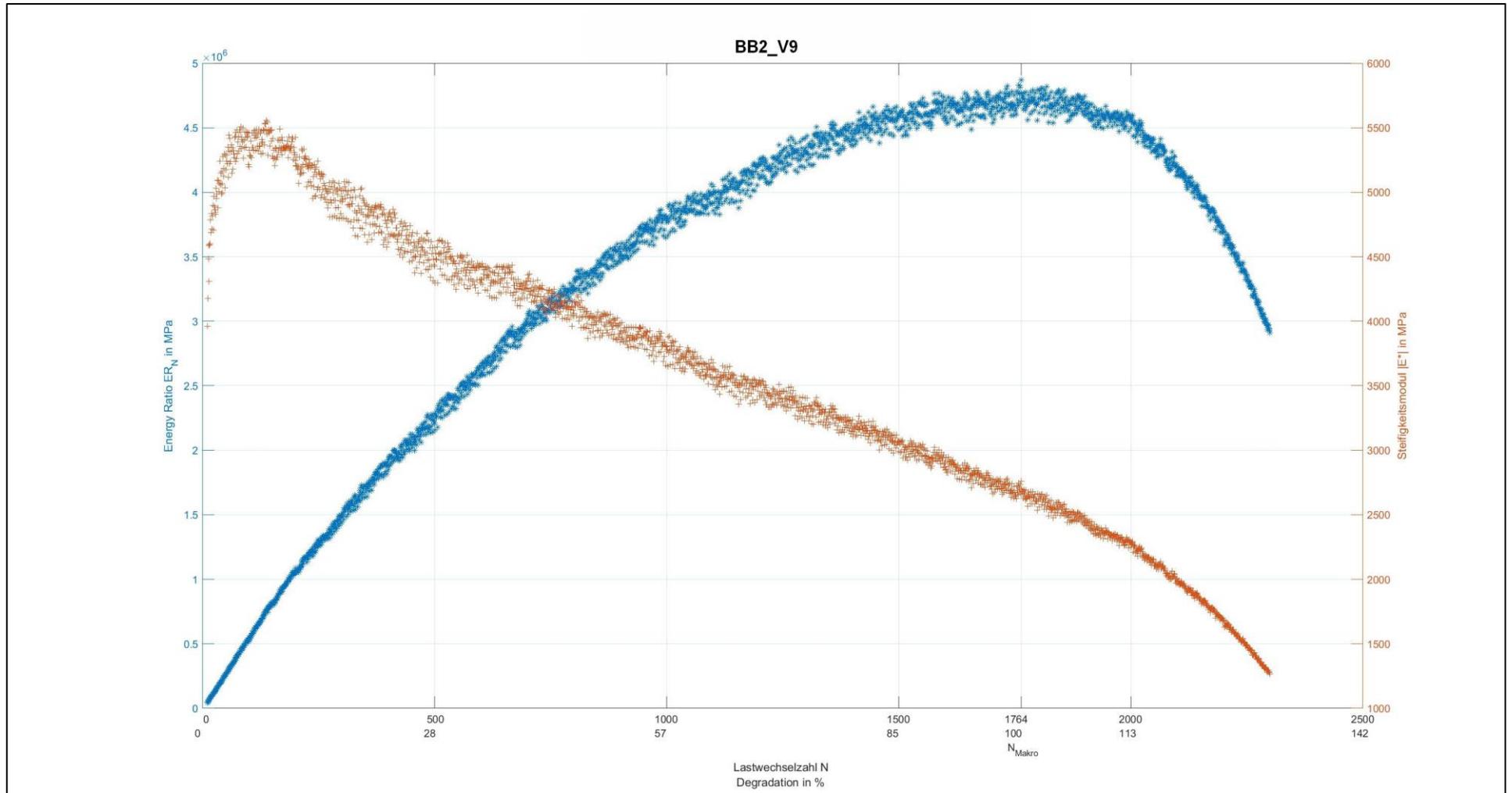












Anlage 2.3: Baustoffgemisch KB1

Zeitraffer Video als digitale Anlage:

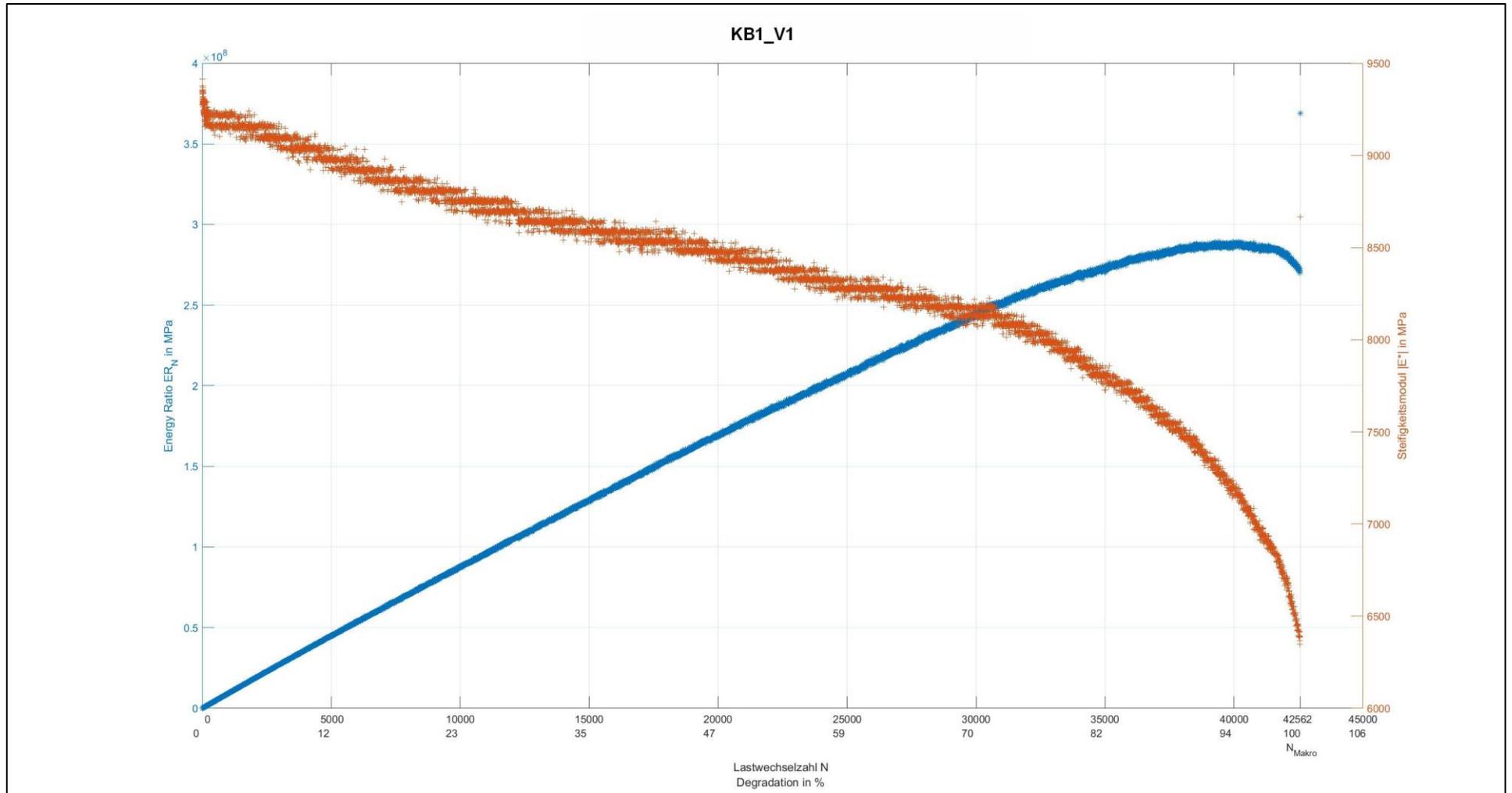
Ordner: Anlage D2 Videos Spaltzugschwellversuch_Ermuedung

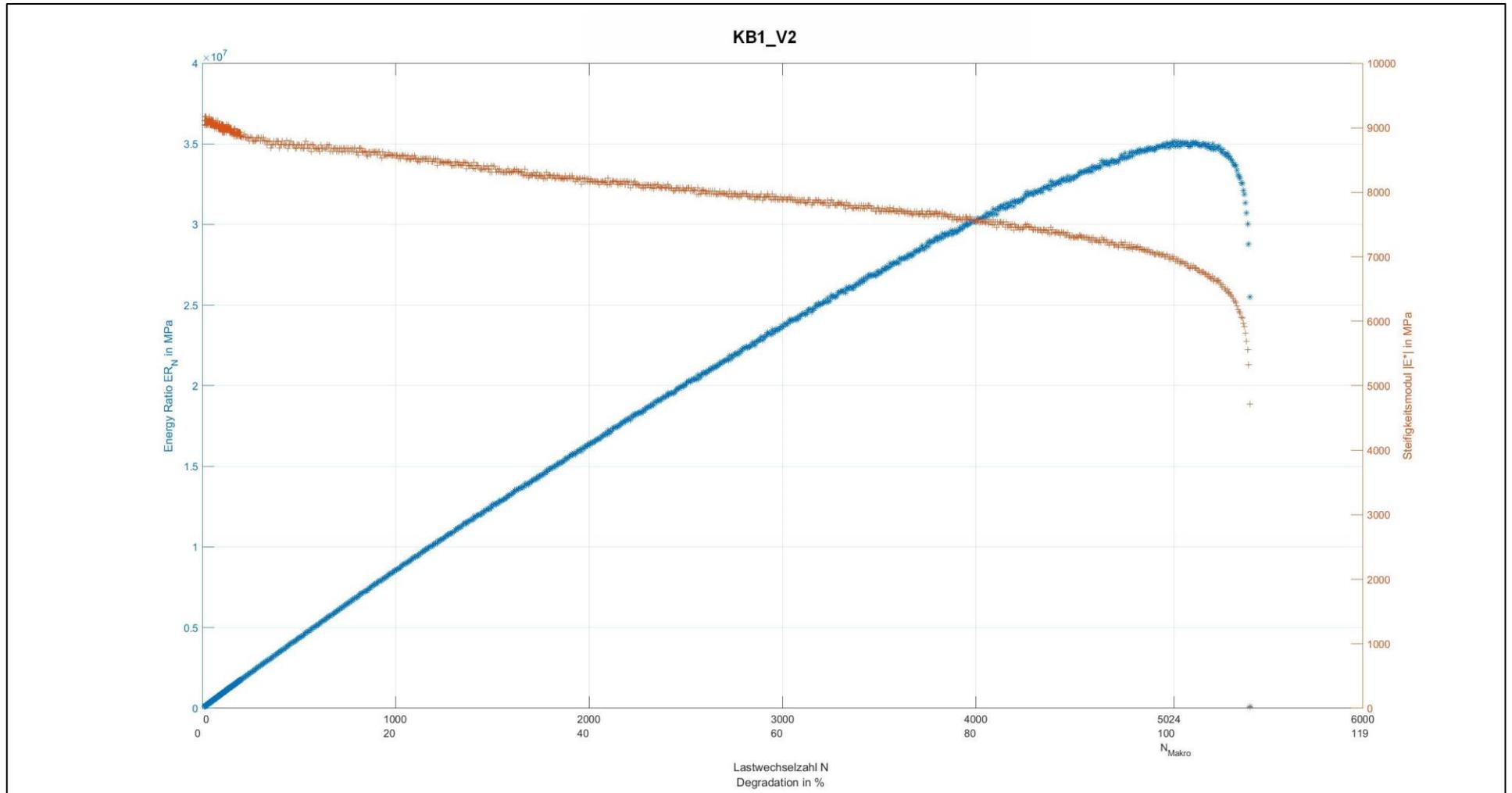
Inhalt: D2.3 Spaltzugschwellversuch_Ermuedung_KB1

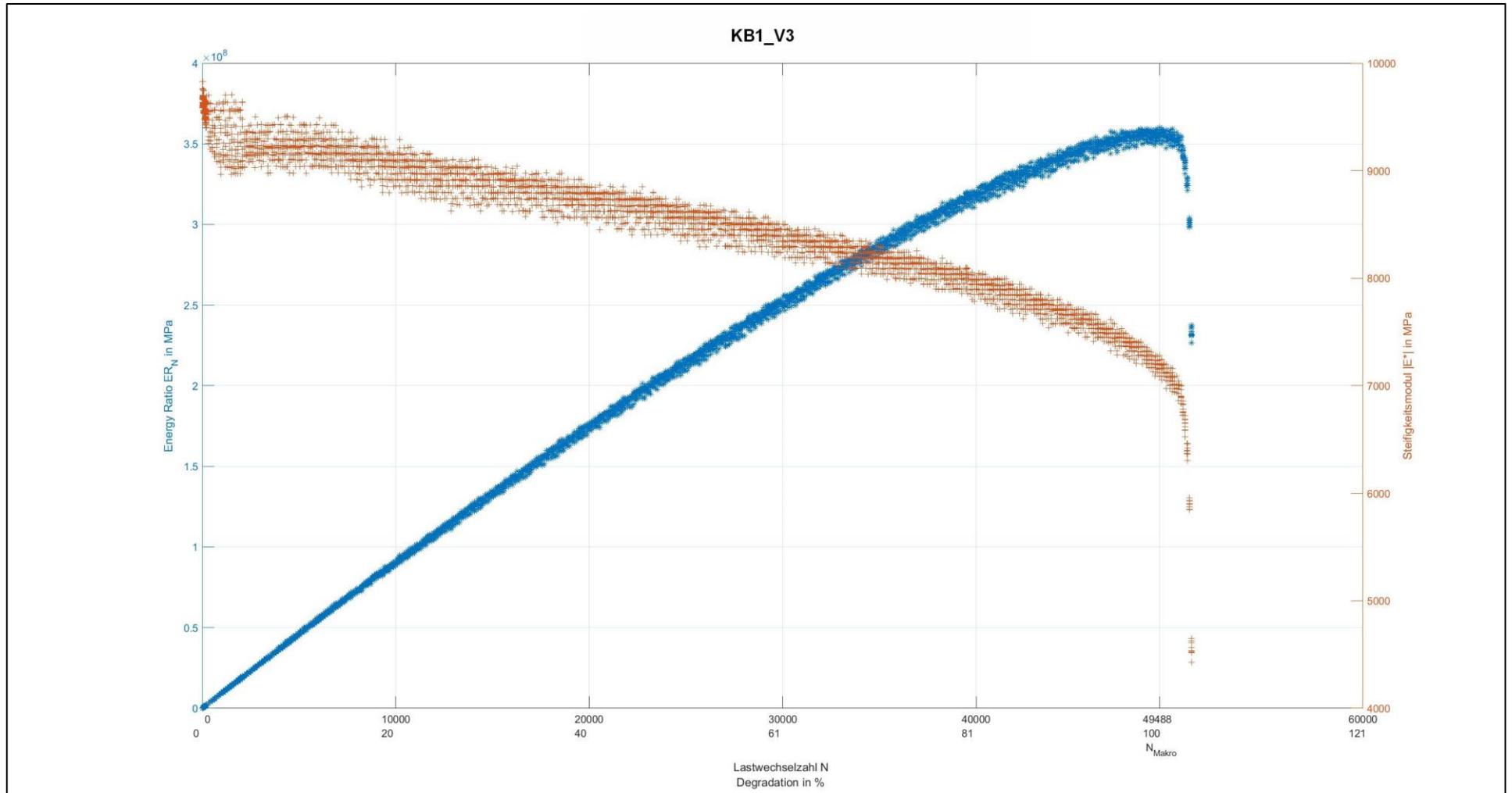
Mp4

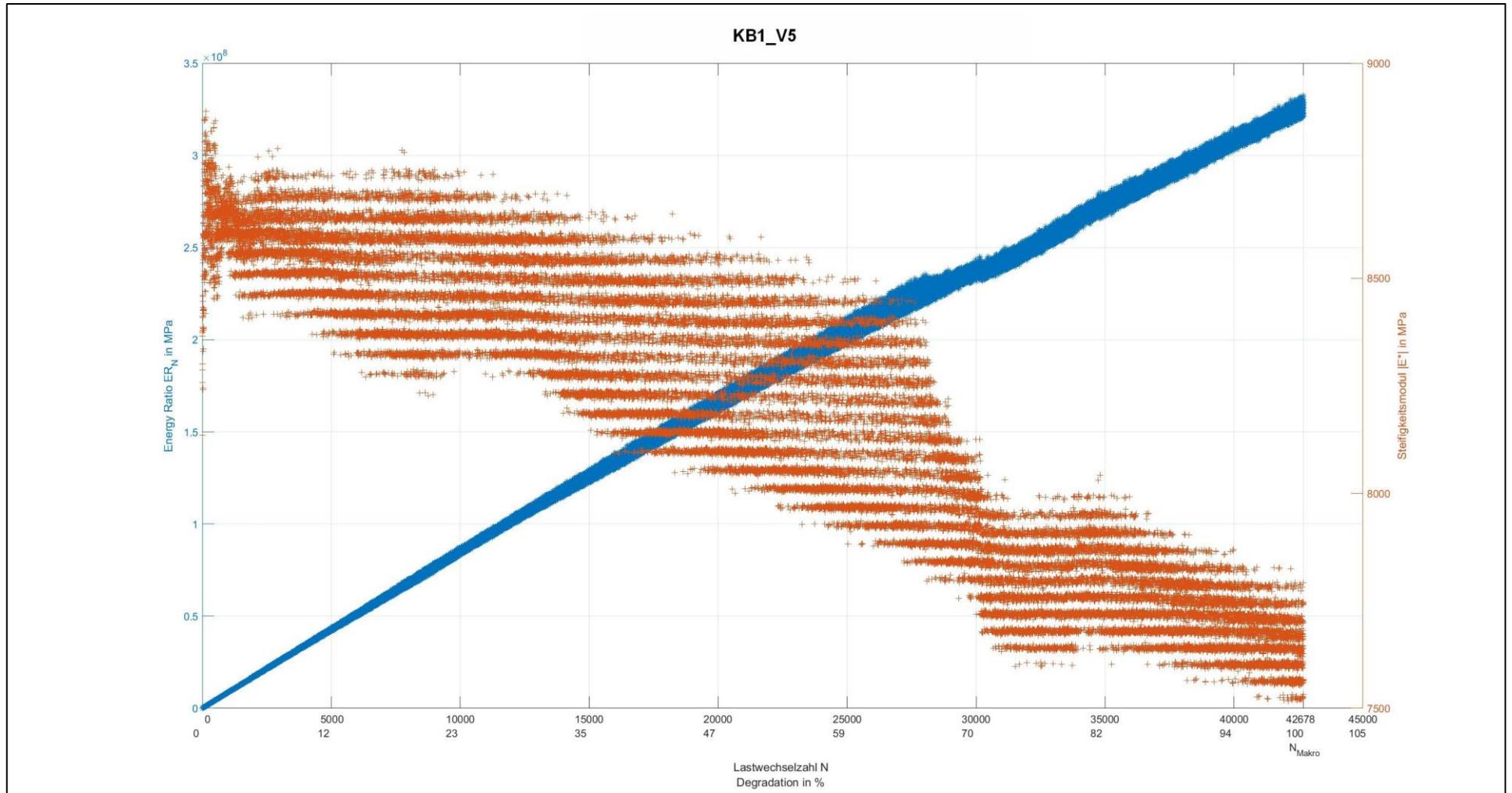
Tab. A.3: Ergebnisse der Versuche zum Ermüdungsverhalten des Baustoffgemisches KB1

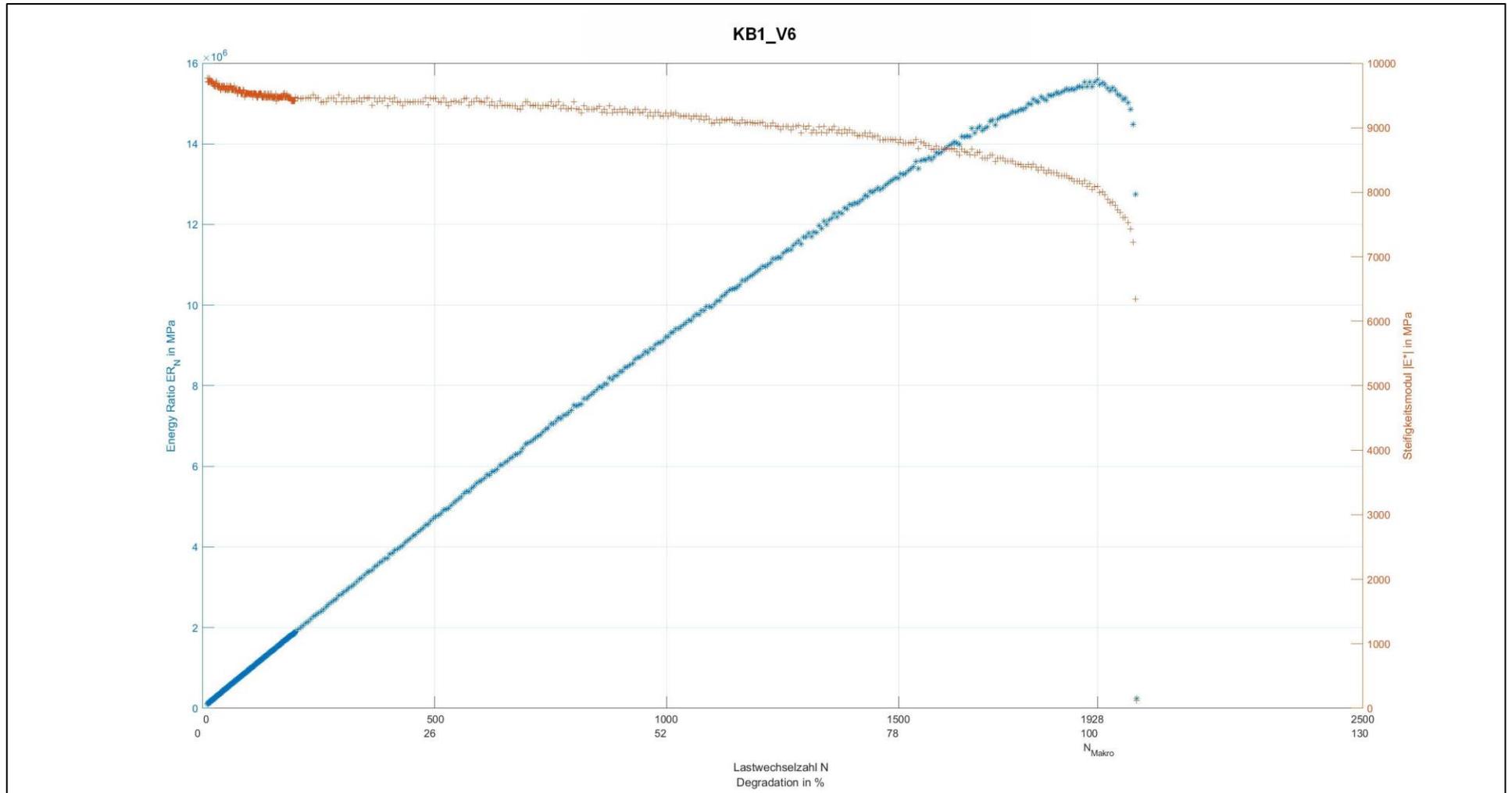
Probekörpernr.	Durchmesser d [mm]	Höhe h [mm]	Temperatur t [°C]	Frequenz f [Hz]	Oberspannung σ_o [MPa]	Unterspannung σ_u [MPa]	Elastische Anfangsdehnung $E_{el, anf}$ [% ₀]	Lastwechselzahl N_{Makro} [-]
1	100	40	20	0,5	1,5	0,3	0,3061	42562
2	100	40	20	0,5	1,5	0,3	0,3129	5024
3	100	40	20	0,5	1,5	0,3	0,2795	49488
4	100	40	20	0,5	1,5	0,3	0,2646	45328
5	100	40	20	0,5	1,7	0,3	0,3704	42678
6	100	40	20	0,5	1,7	0,3	0,3345	1928
7	100	39	20	0,5	1,7	0,3	0,3043	7578
8	100	42	20	0,5	1,7	0,3	0,3475	19220
9	100	42	20	0,5	1,7	0,3	0,3167	2072
10	100	40	20	0,5	1,9	0,3	0,3844	509
11	100	40	20	0,5	1,9	0,3	0,3946	355
12	100	40	20	0,5	1,9	0,3	0,4333	37

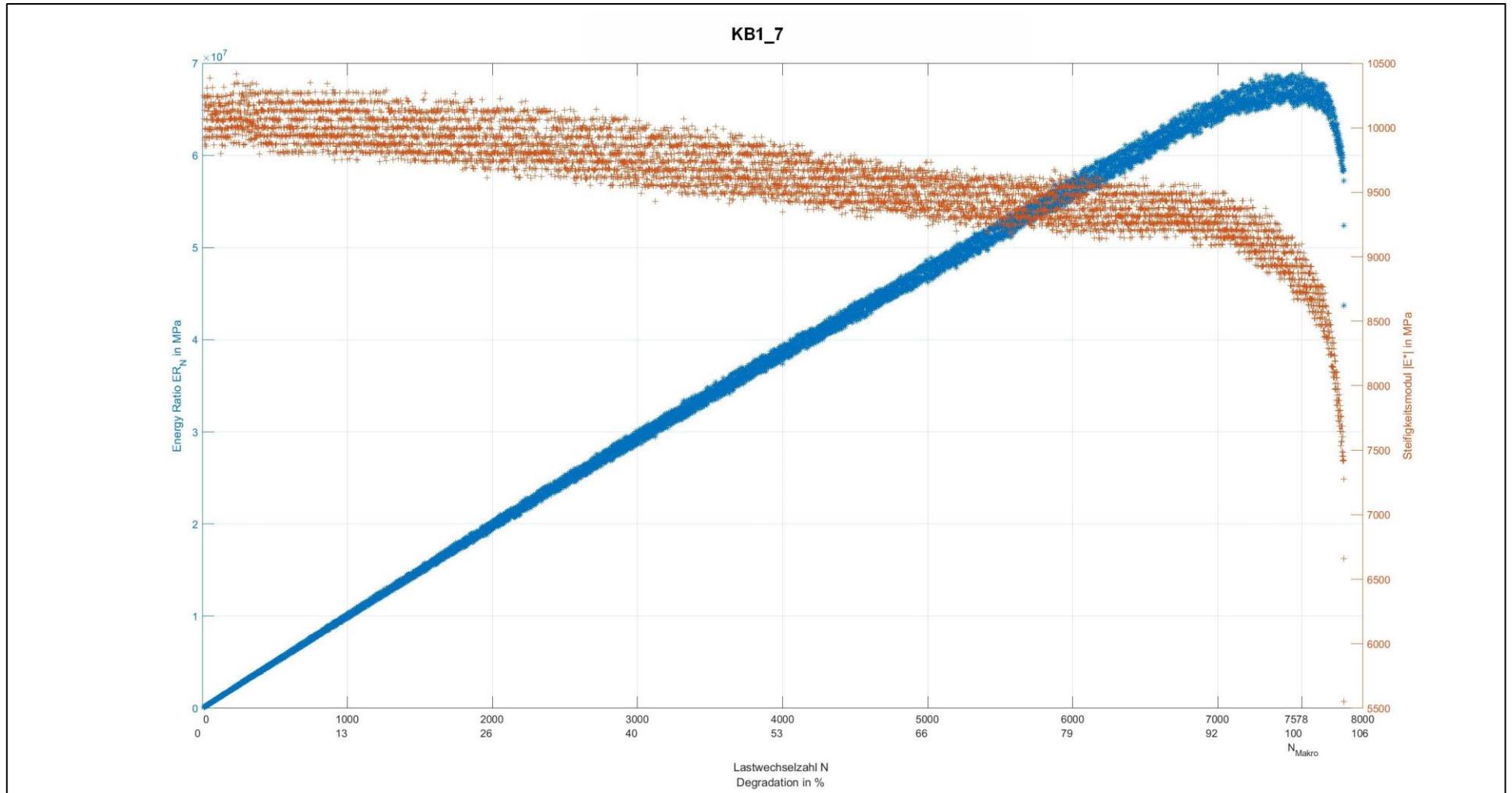


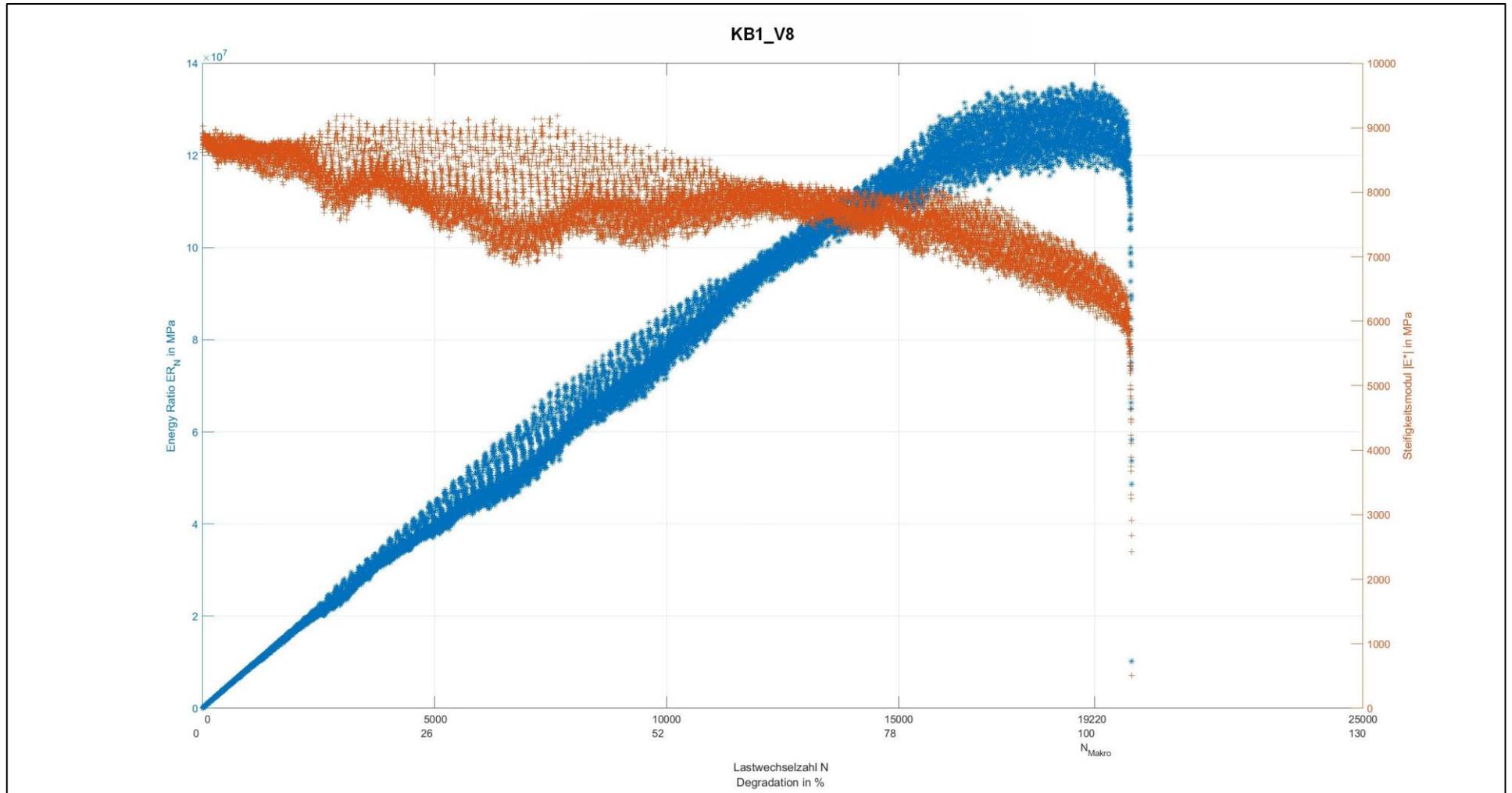


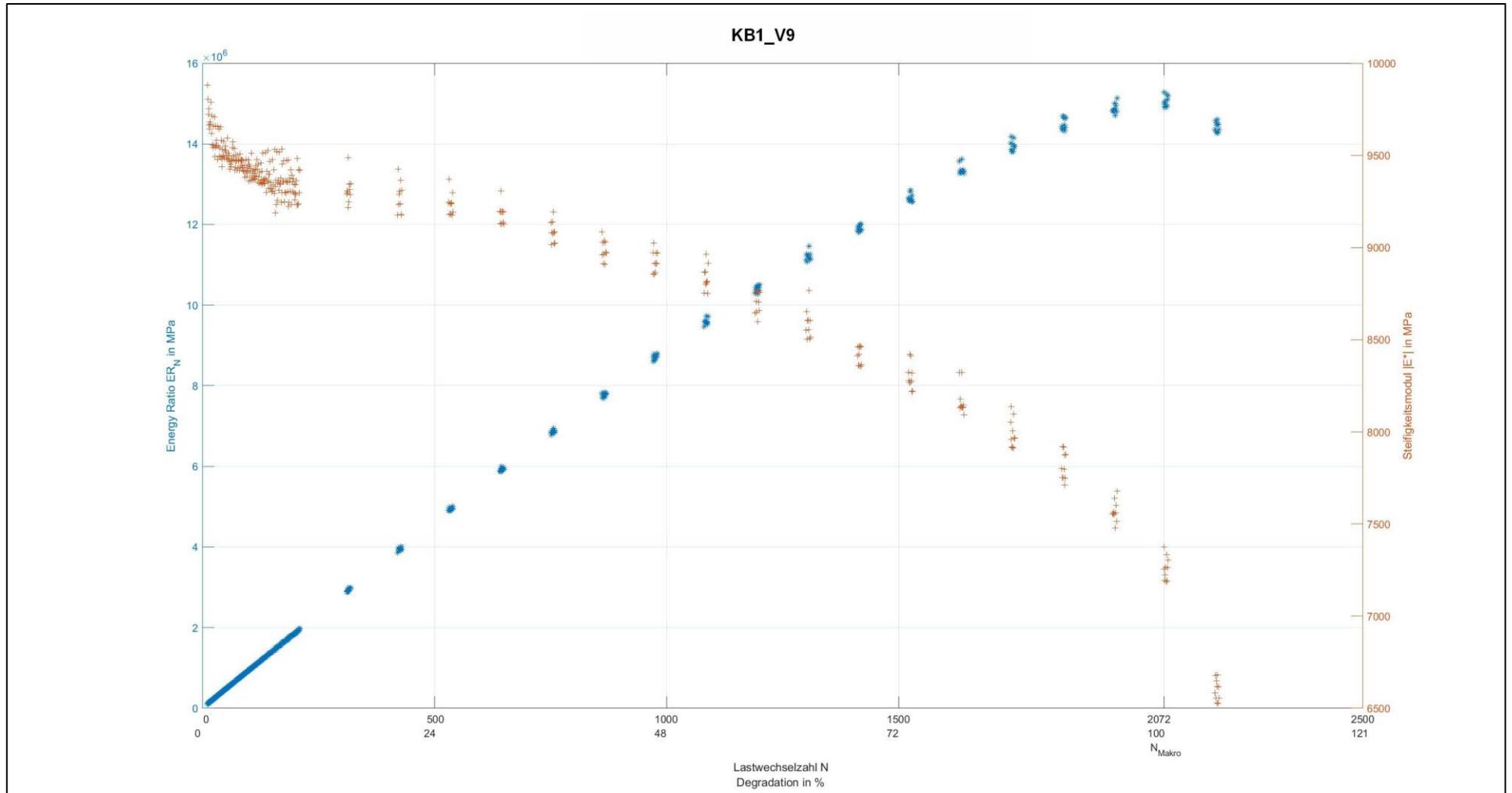


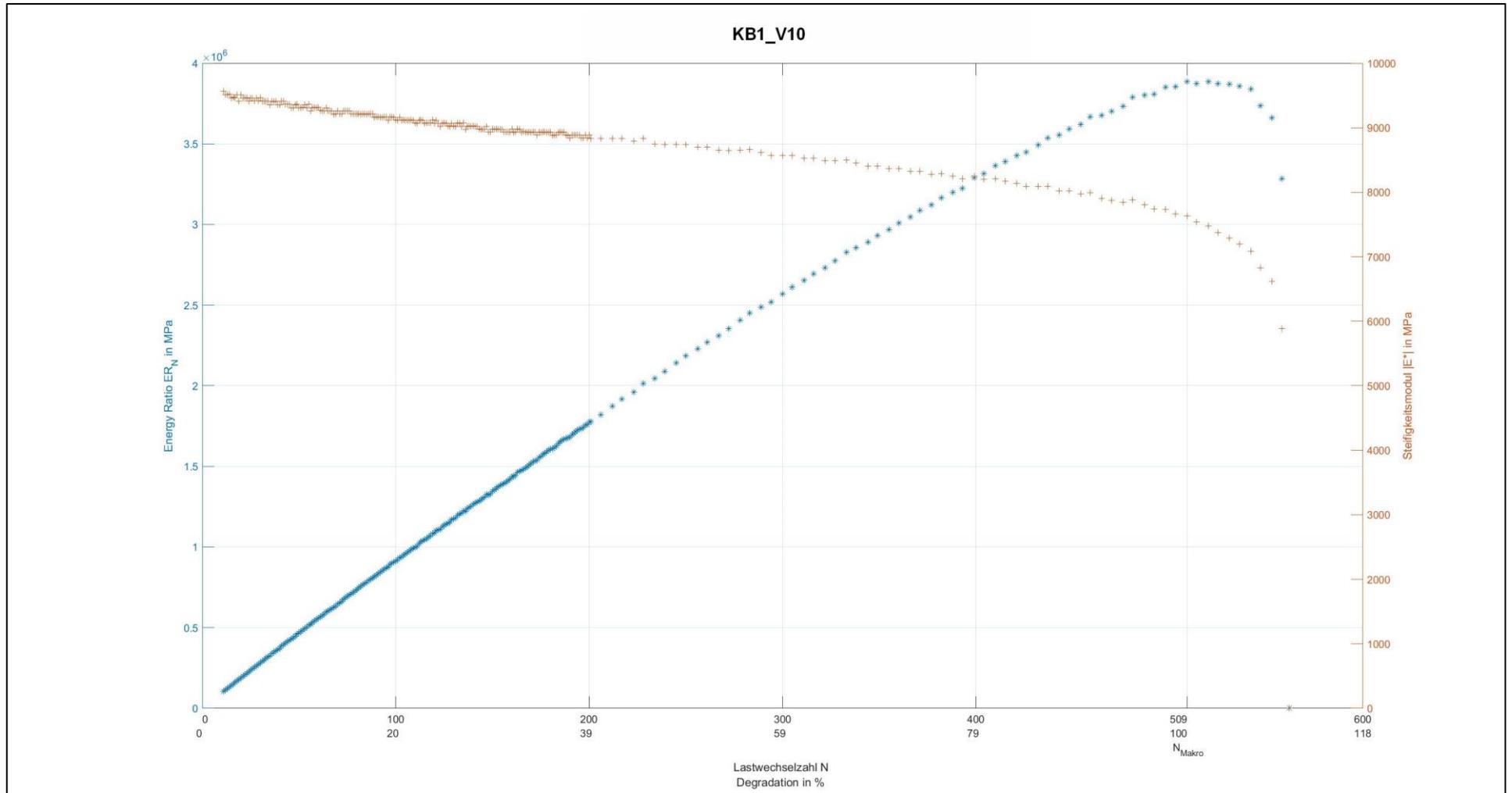


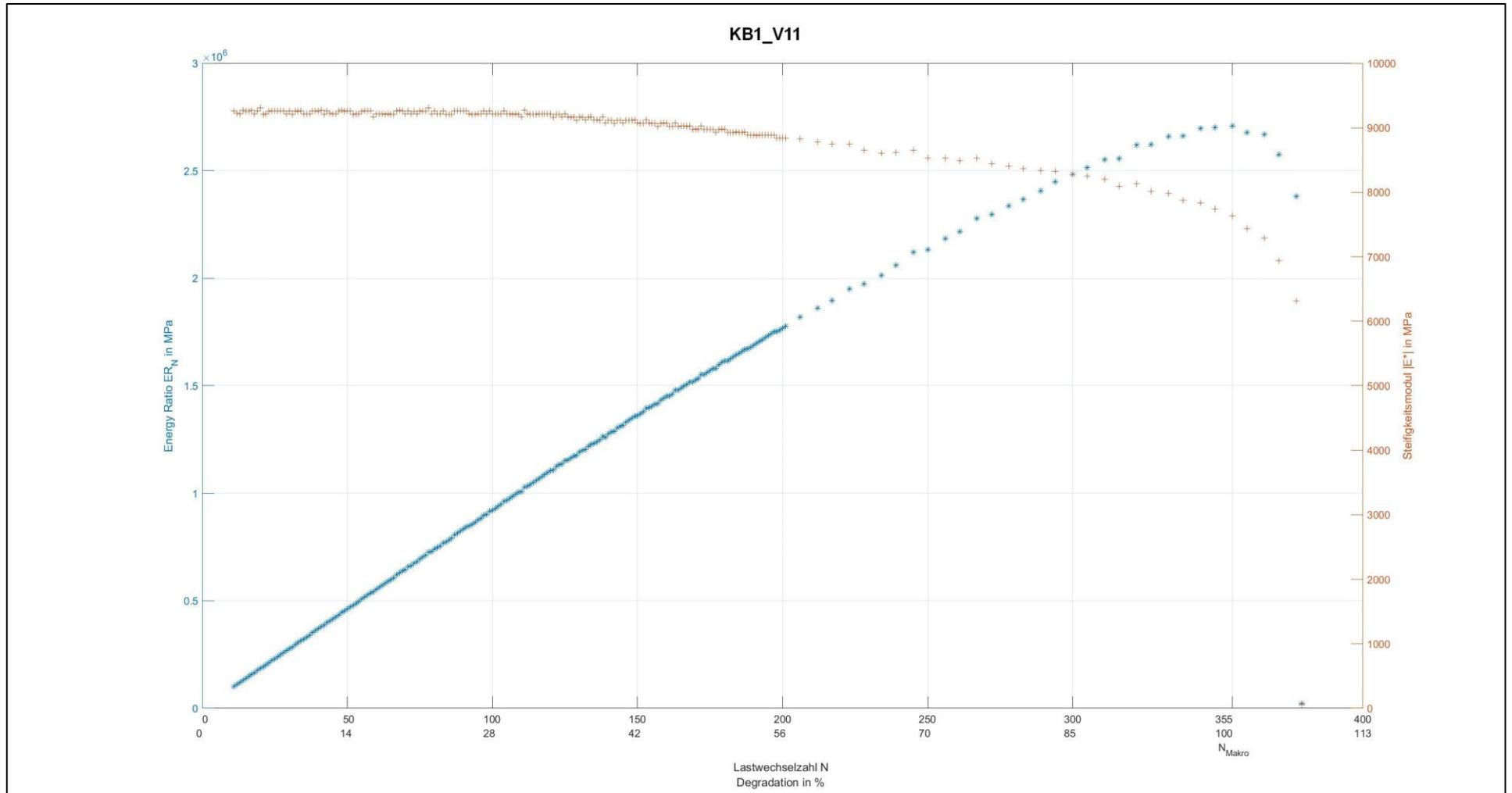


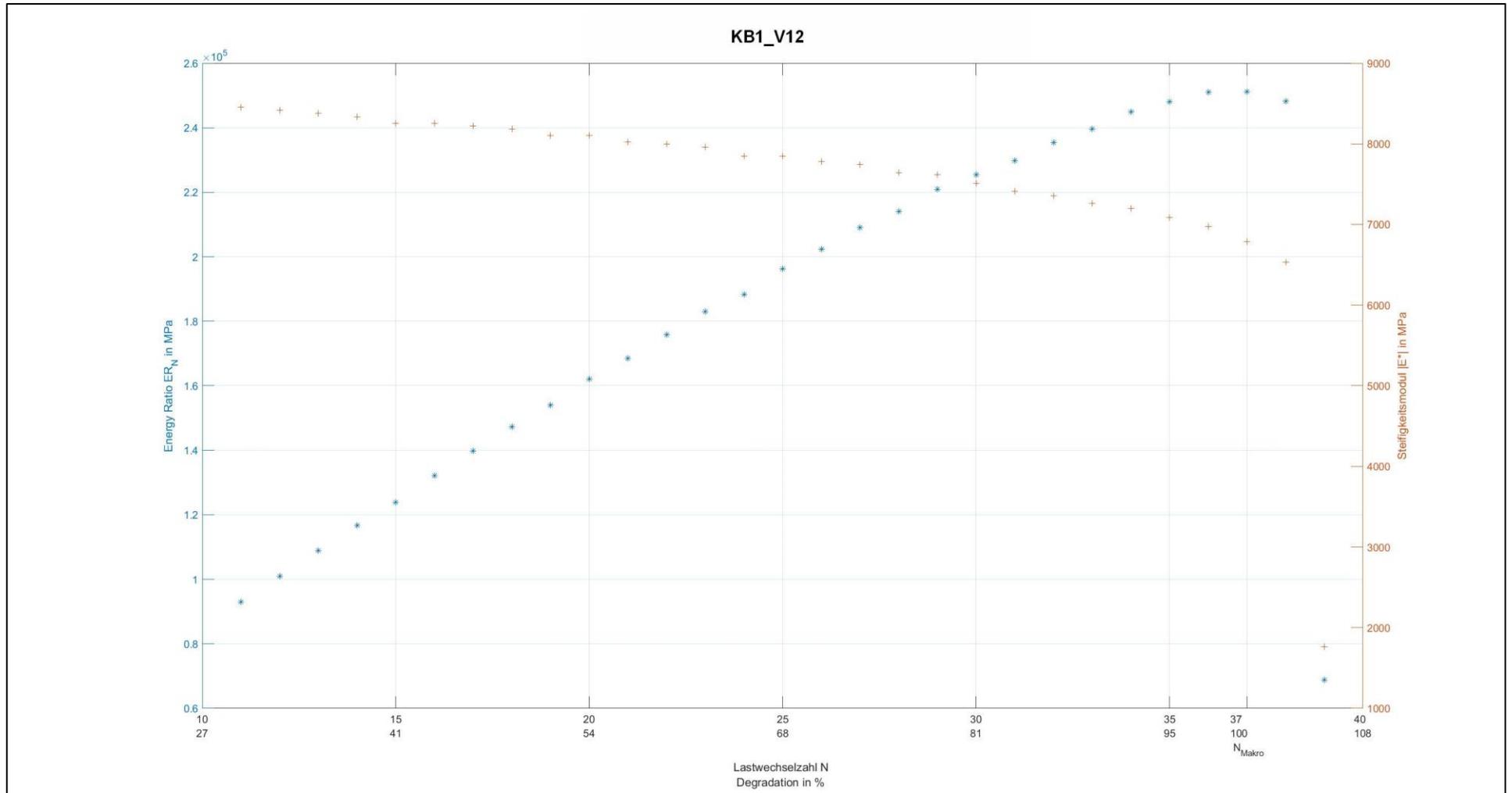


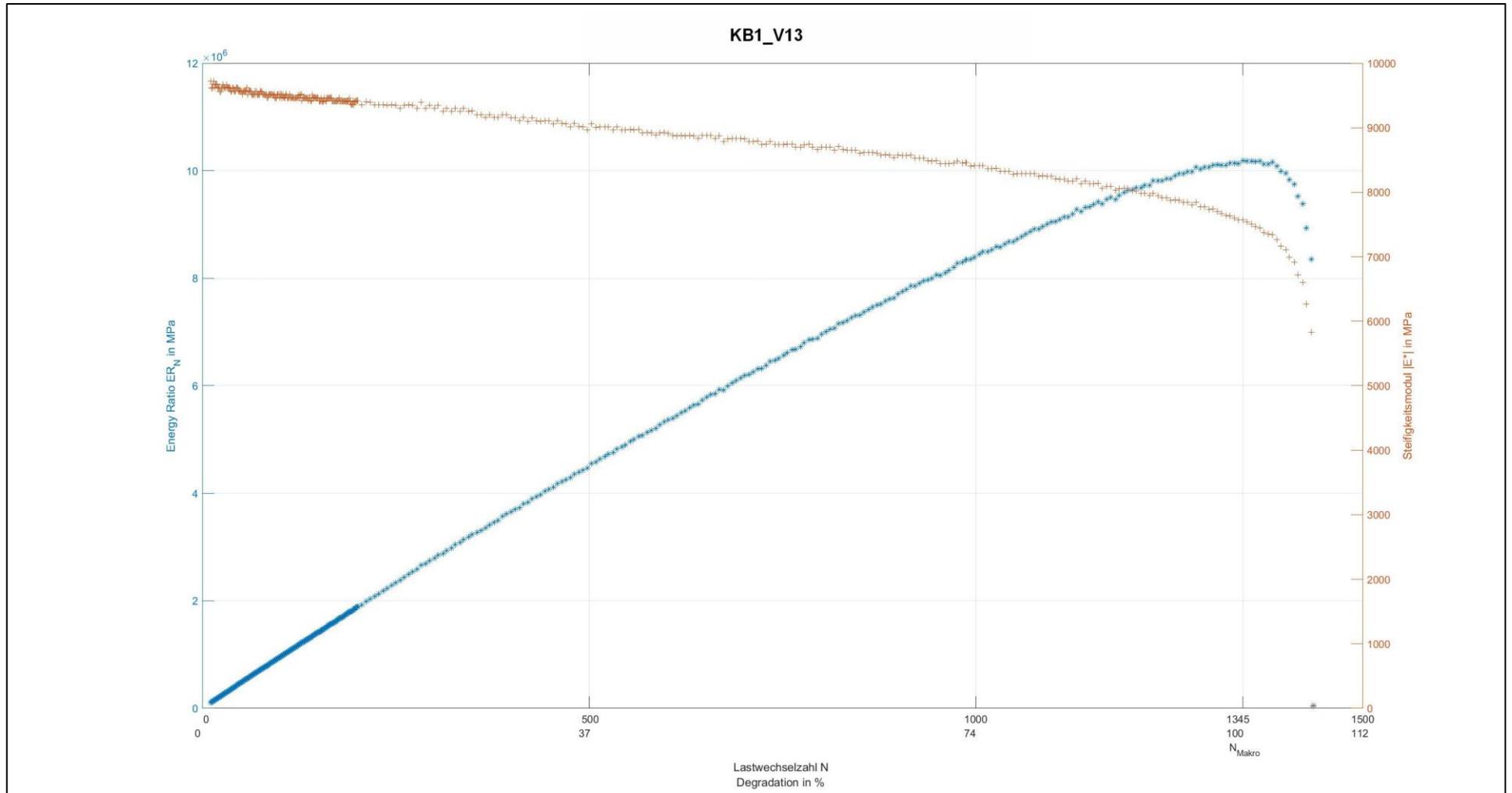






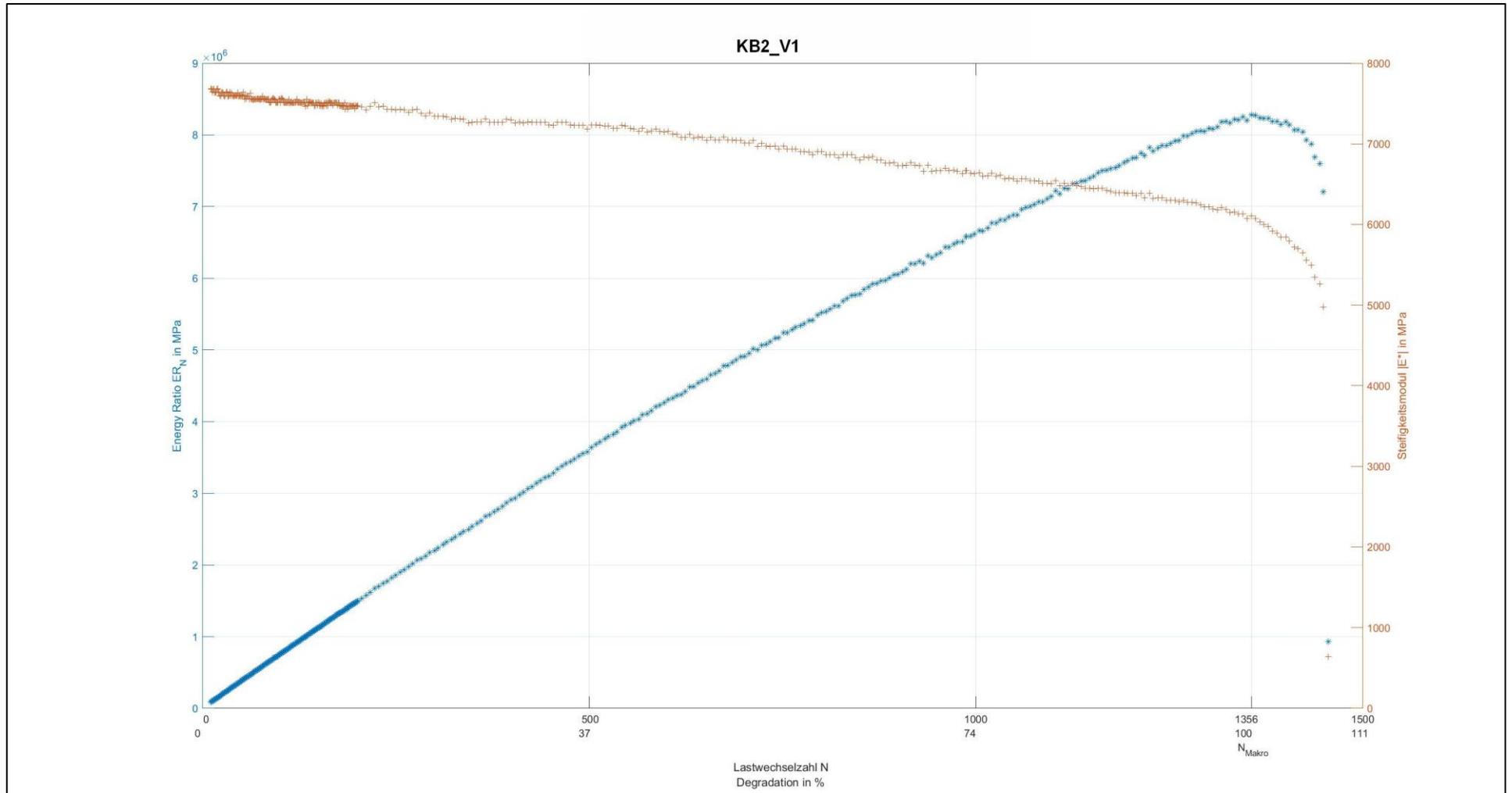


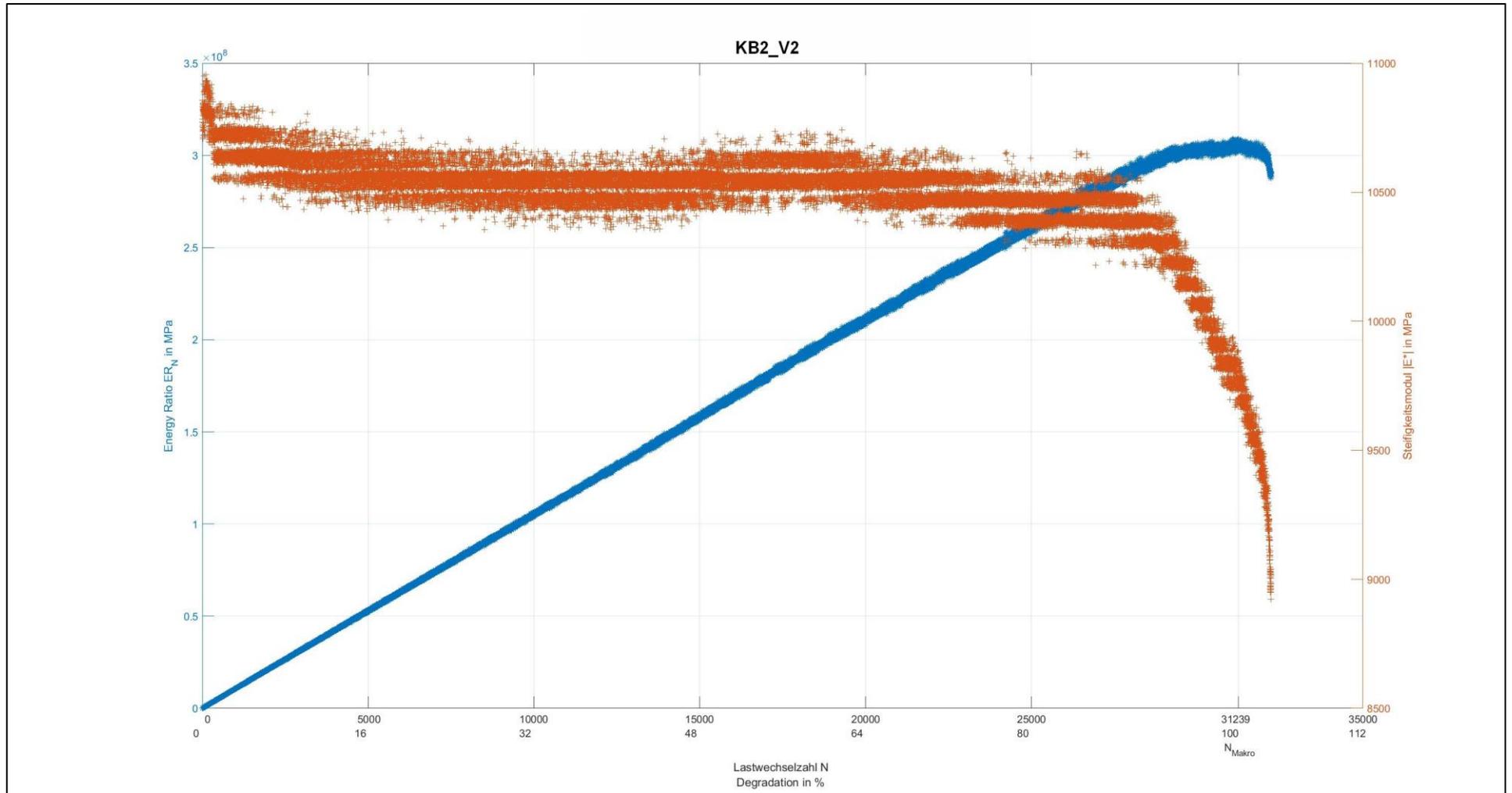


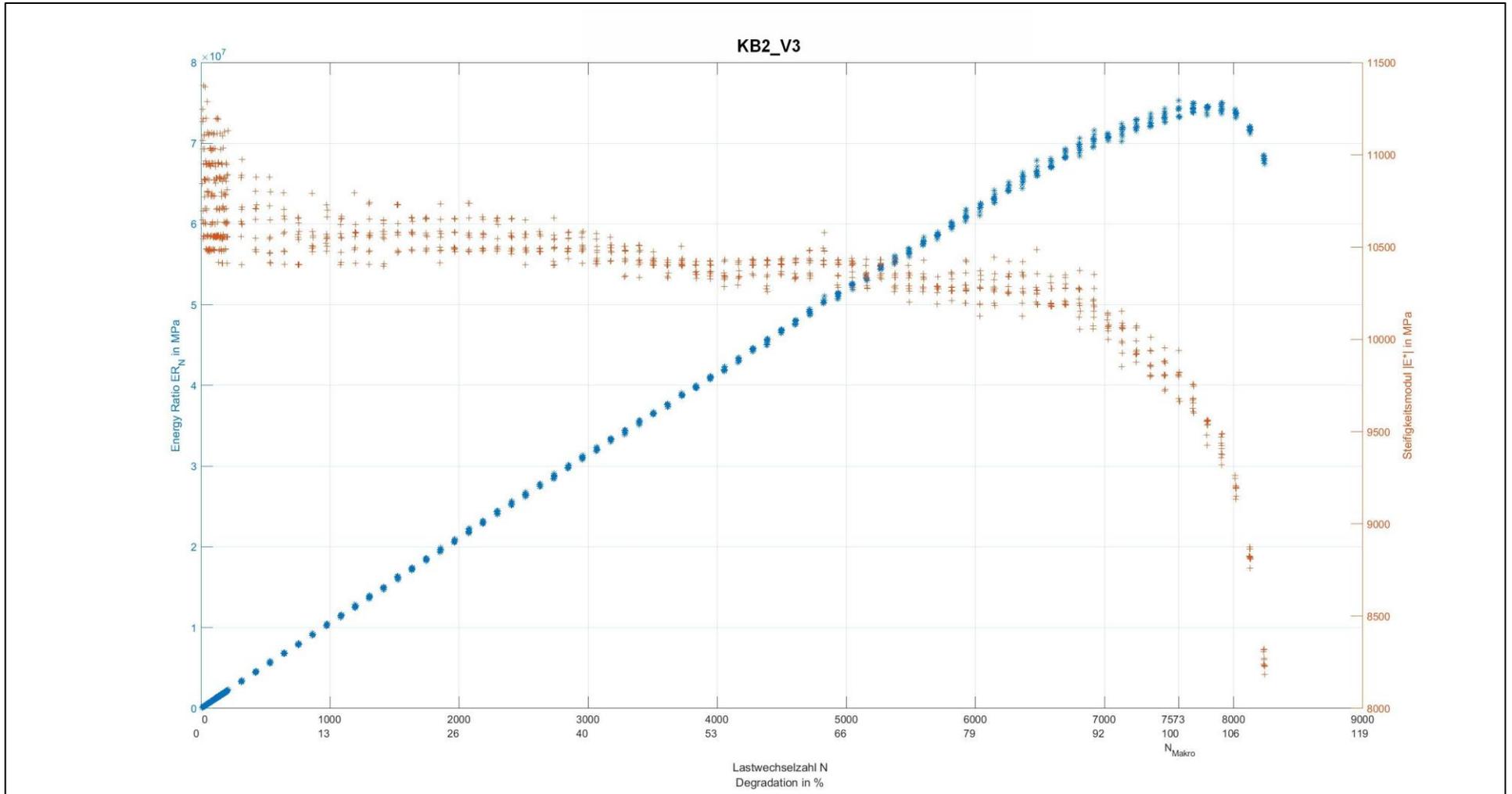


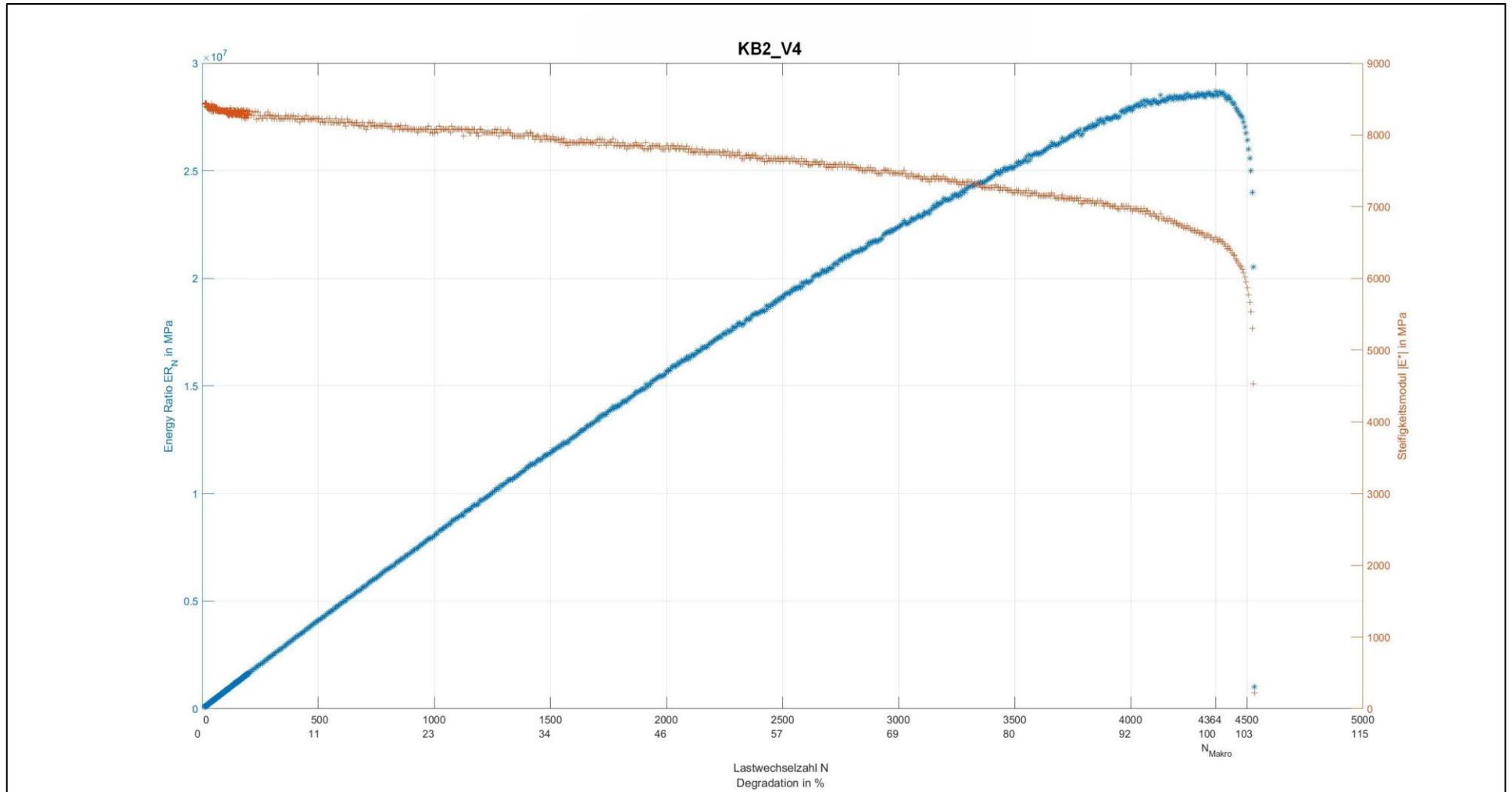
Tab. A.4: Ergebnisse der Versuche zum Ermüdungsverhalten des Baustoffgemisches KB2

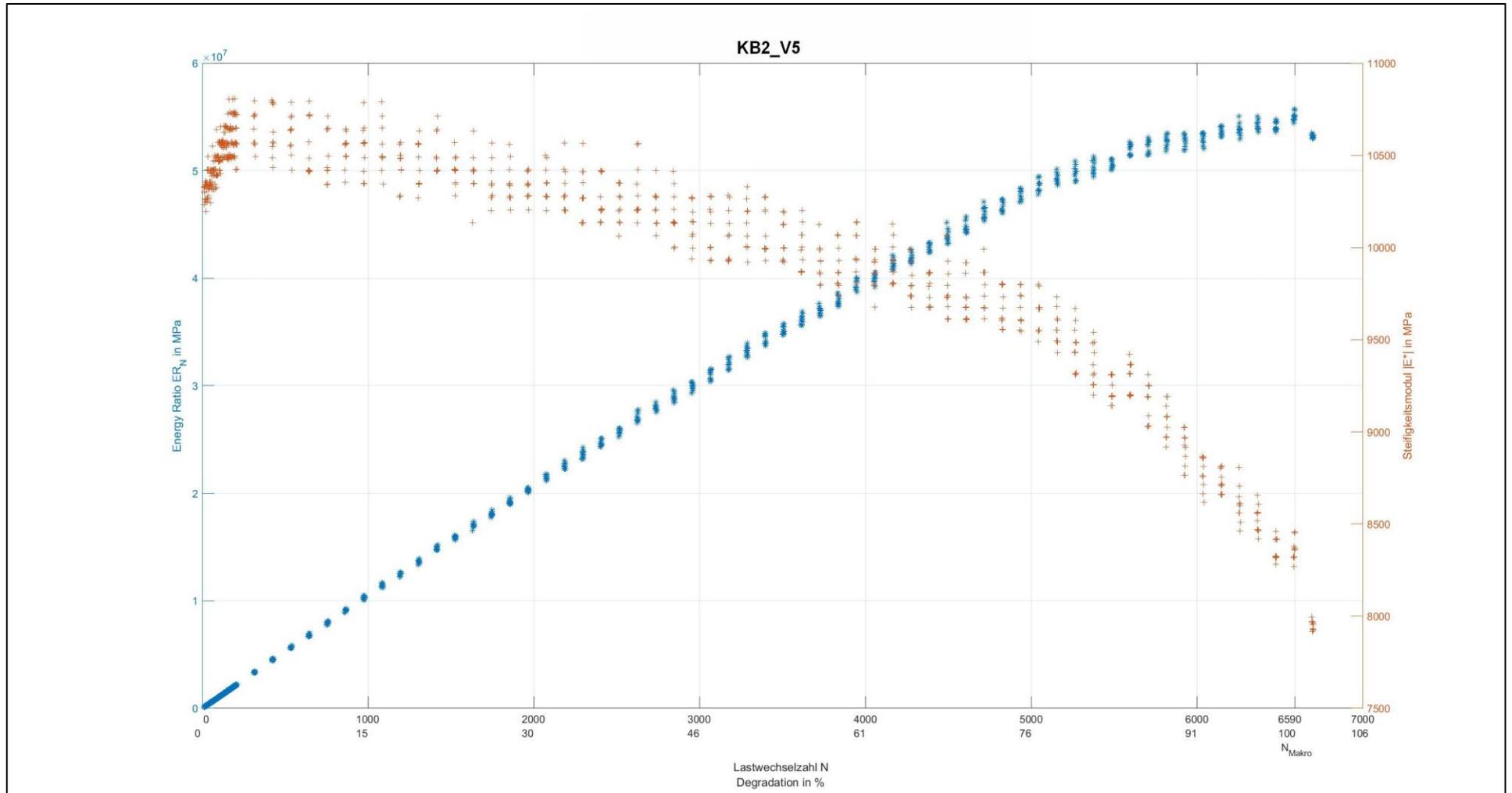
Probekörpernr.	Durchmesser d [mm]	Höhe h [mm]	Temperatur t [°C]	Frequenz f [Hz]	Oberspannung σ_o [MPa]	Unterspannung σ_u [MPa]	Elastische Anfangsdehnung $E_{el,anf}$ [‰]	Lastwechselzahl N_{Makro} [-]
1	100	40	20	0,5	1,5	0,3	0,3727	1361
2	100	40	20	0,5	1,5	0,3	0,2520	31239
3	100	42	20	0,5	1,5	0,3	0,2804	7573
4	100	40	20	0,5	1,5	0,3	0,3400	4364
5	100	42	20	0,5	1,7	0,3	0,3000	6590
6	100	40	20	0,5	1,7	0,3	0,3856	300
7	100	40	20	0,5	1,7	0,3	0,3974	454
8	100	42	20	0,5	1,7	0,3	0,2824	42666
9	100	40	20	0,5	1,7	0,3	0,3727	1356
10	100	40	20	0,5	1,9	0,3	0,4218	35
11	100	40	20	0,5	1,9	0,3	0,4696	138
12	100	40	20	0,5	1,9	0,3	0,4378	84
13	100	40	20	0,5	1,9	0,3	0,4030	167

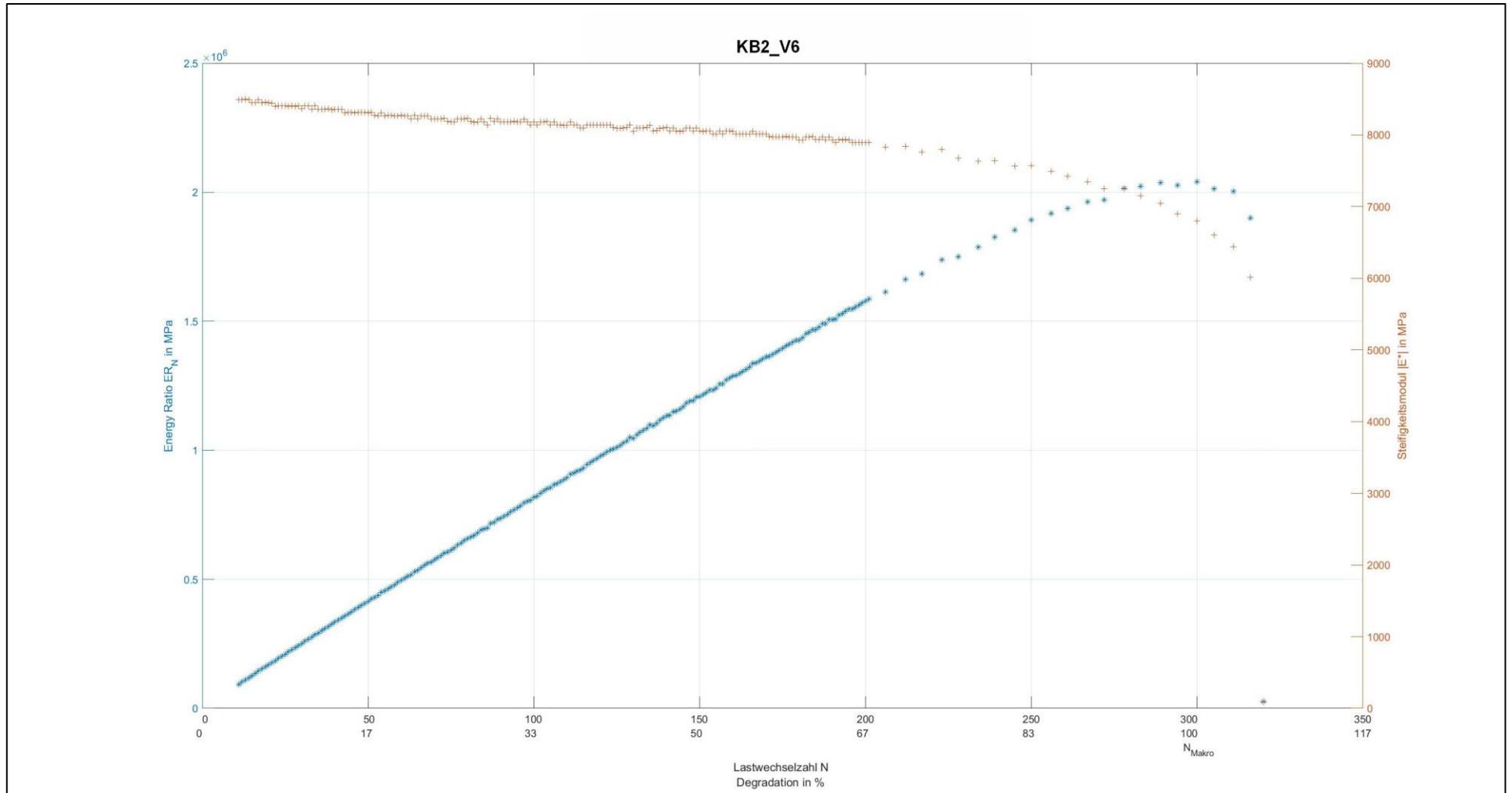


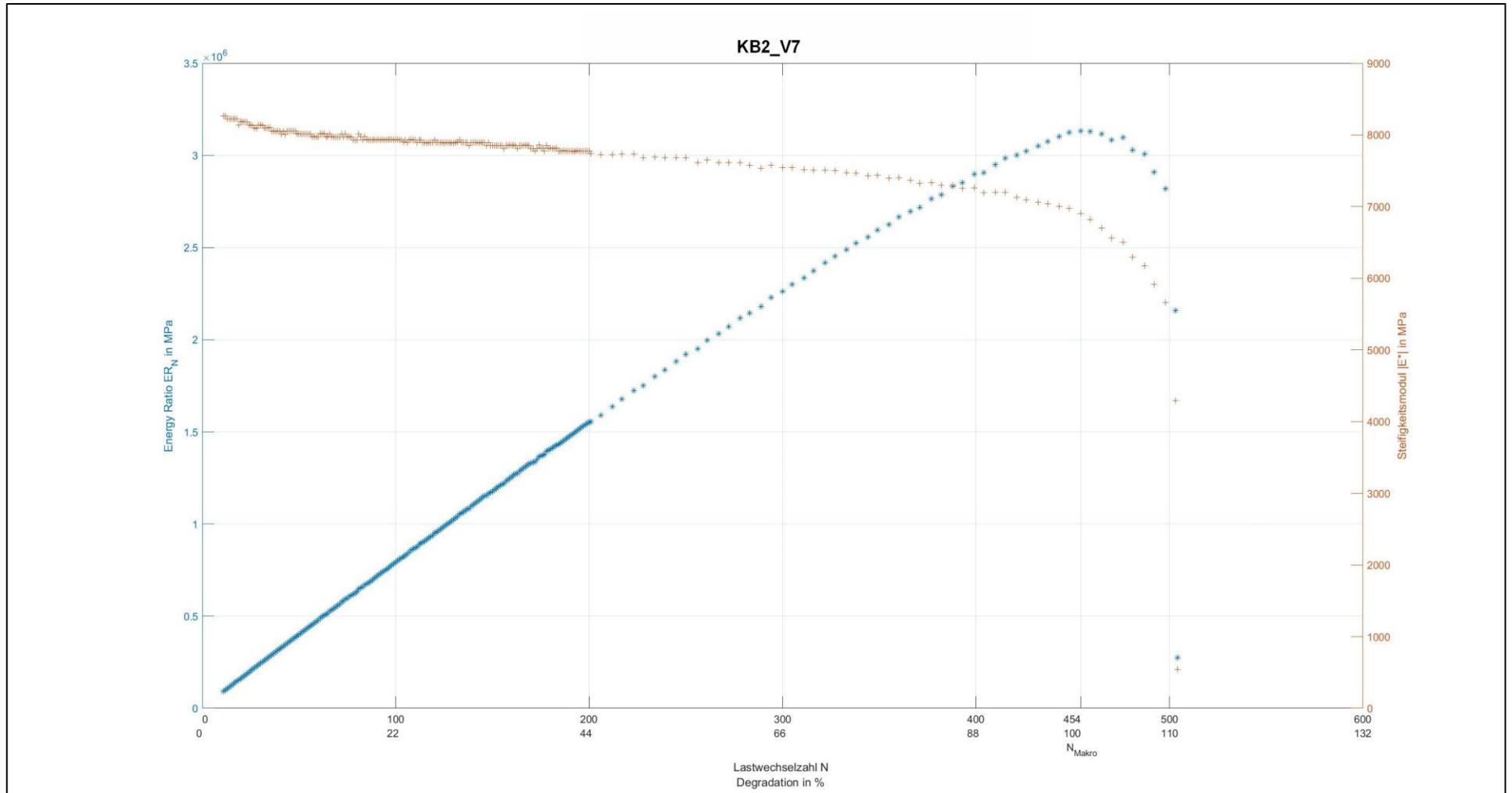


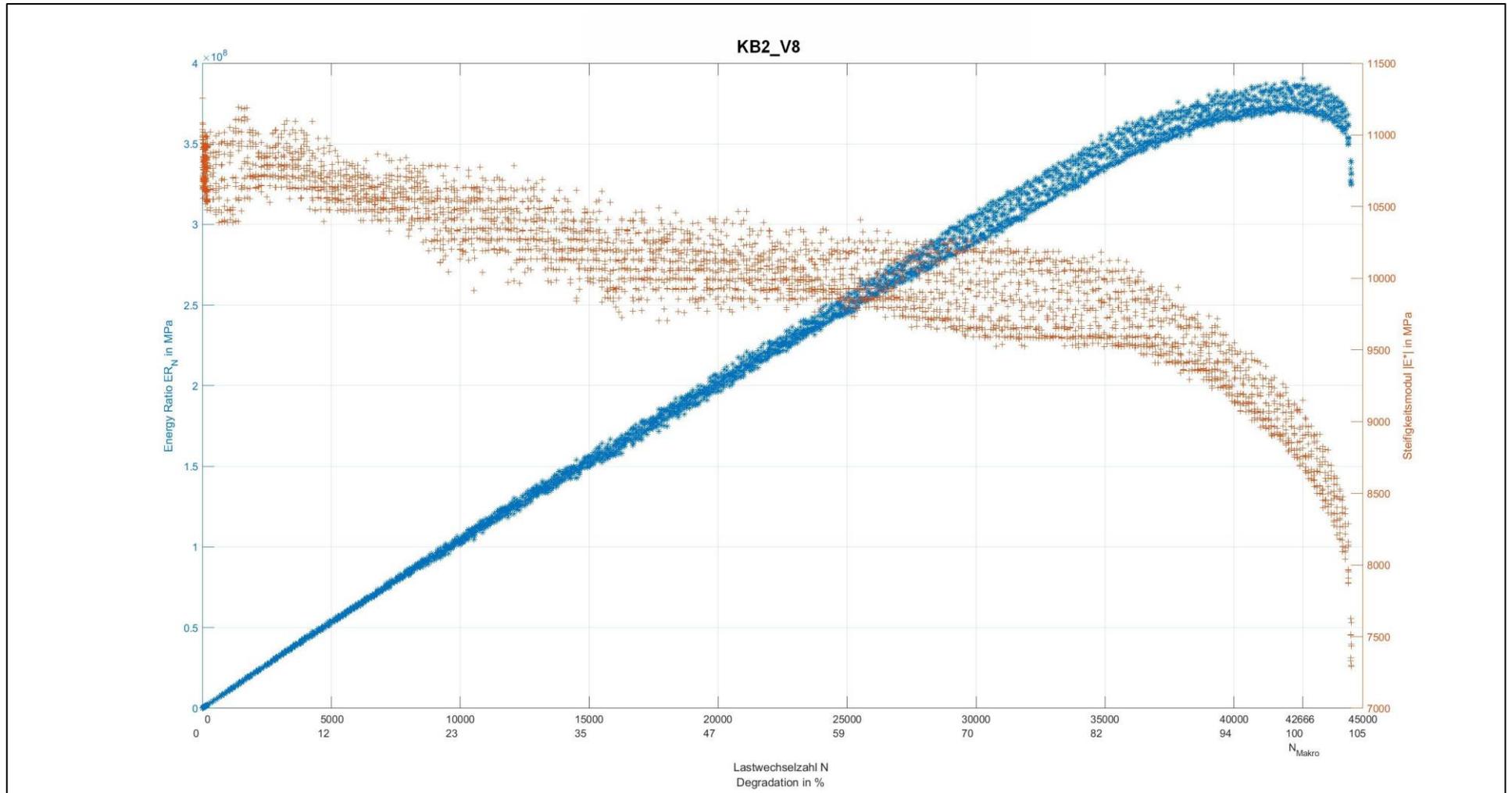


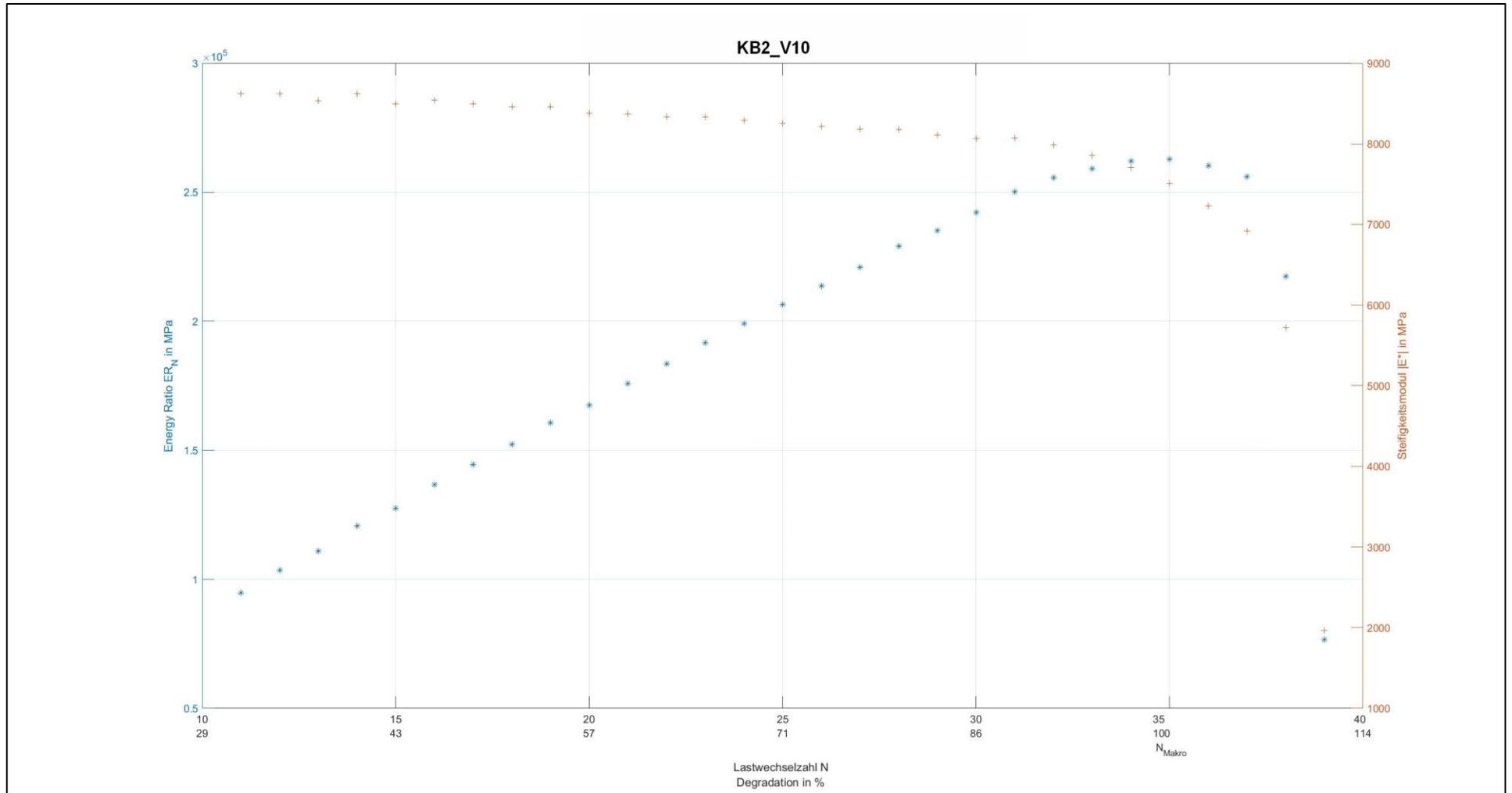


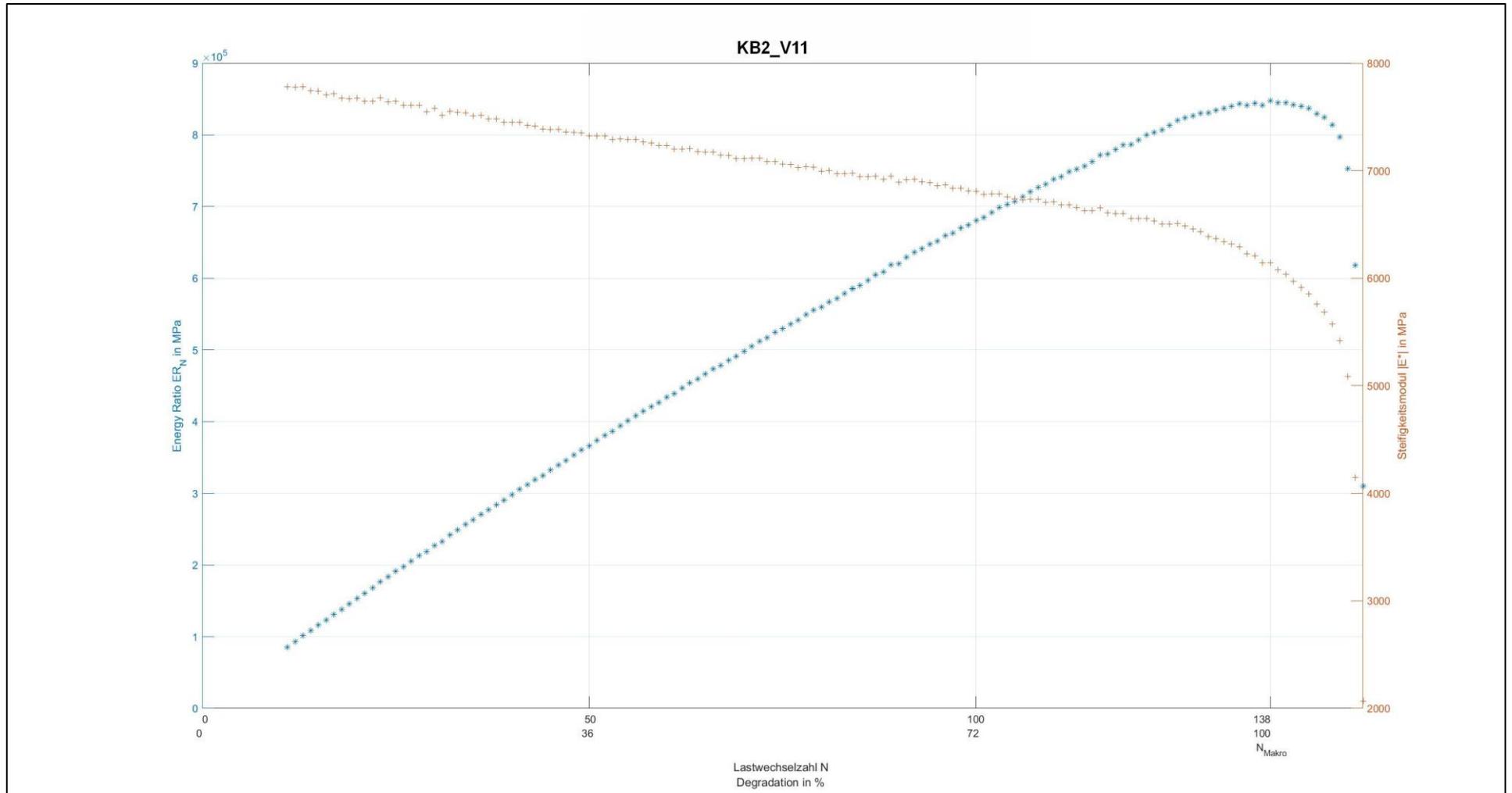


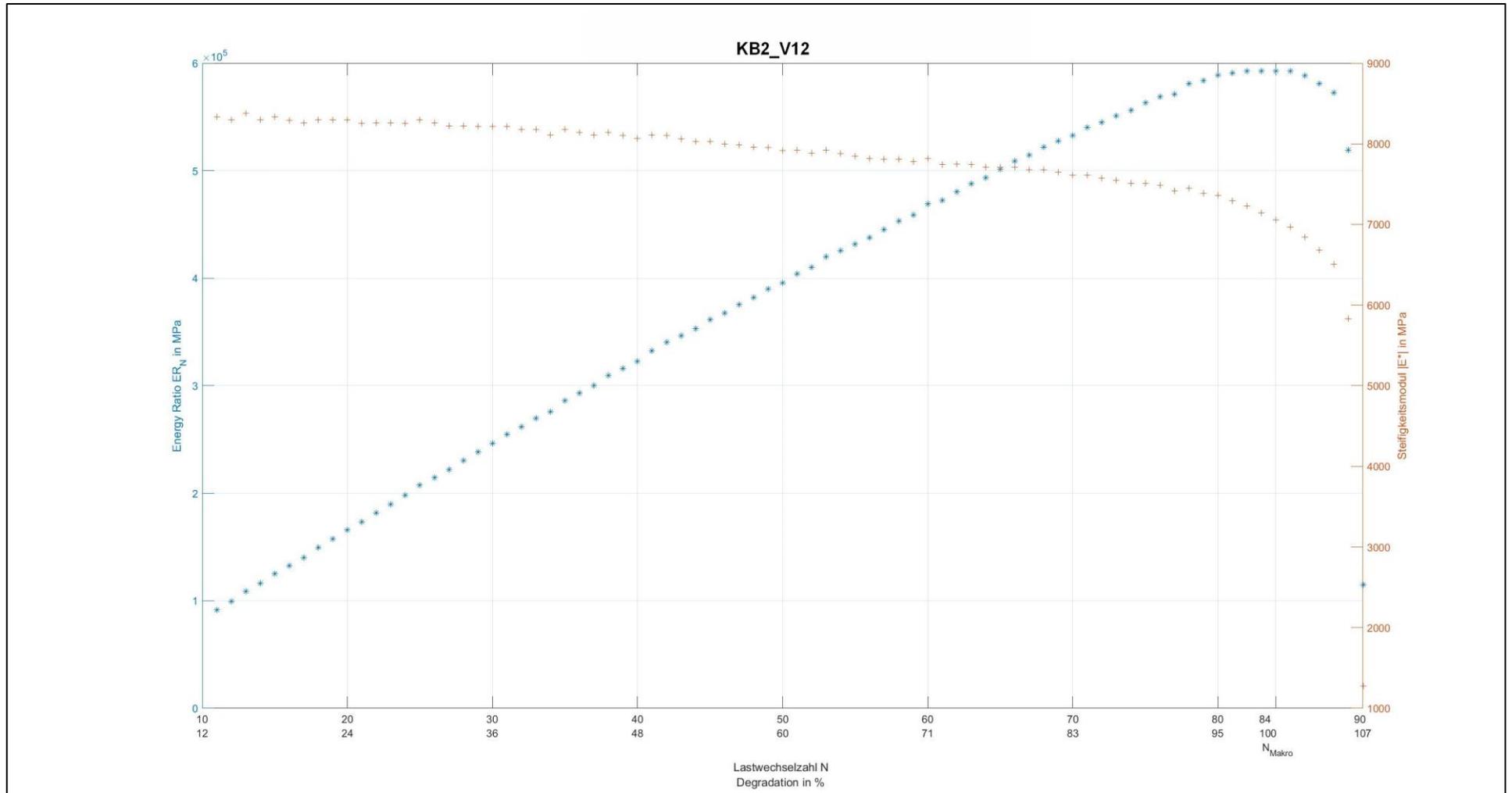


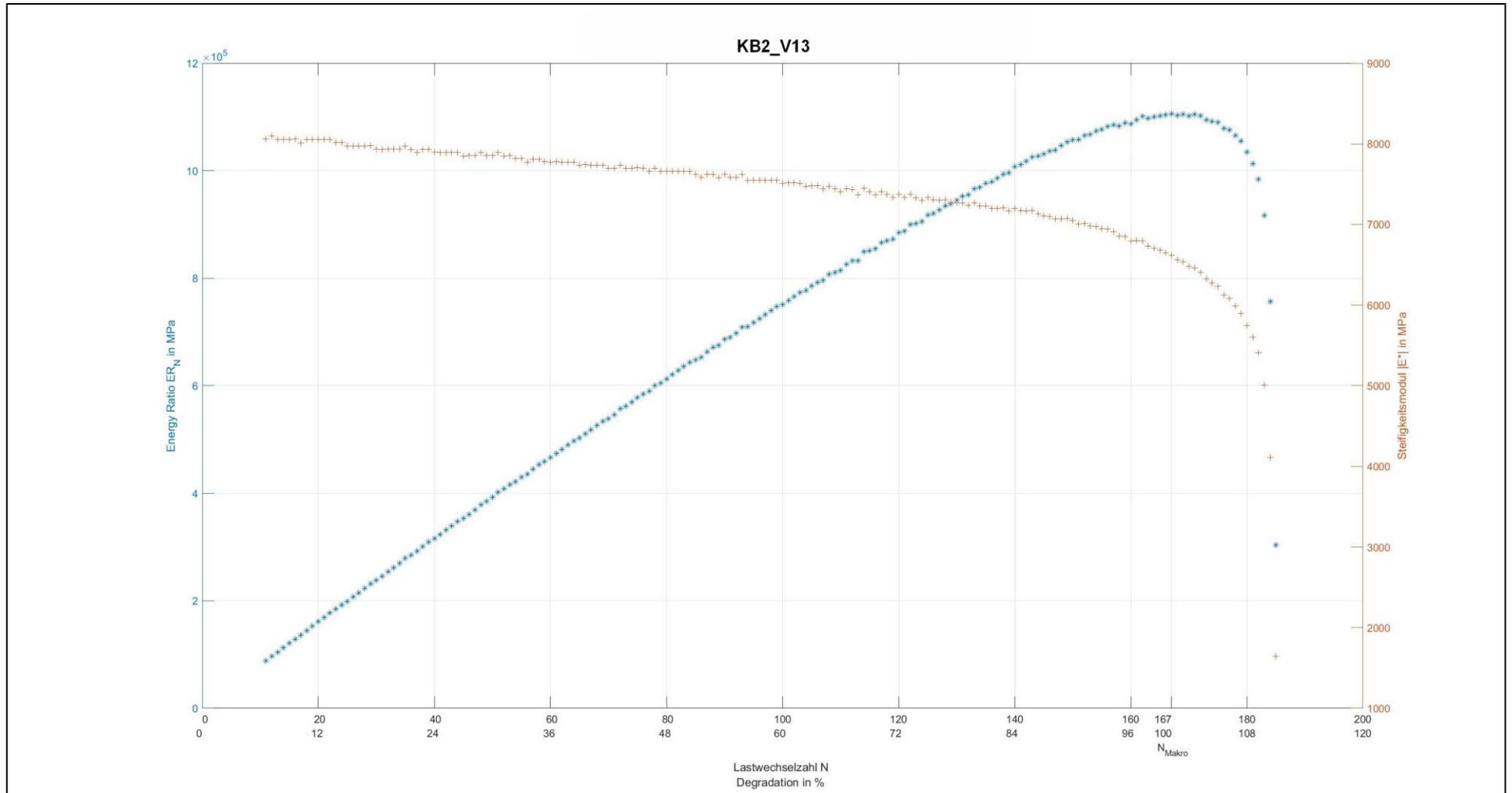












Anlage 2.5: Baustoffgemisch KB3

Zeitraffer Video als digitale Anlage:

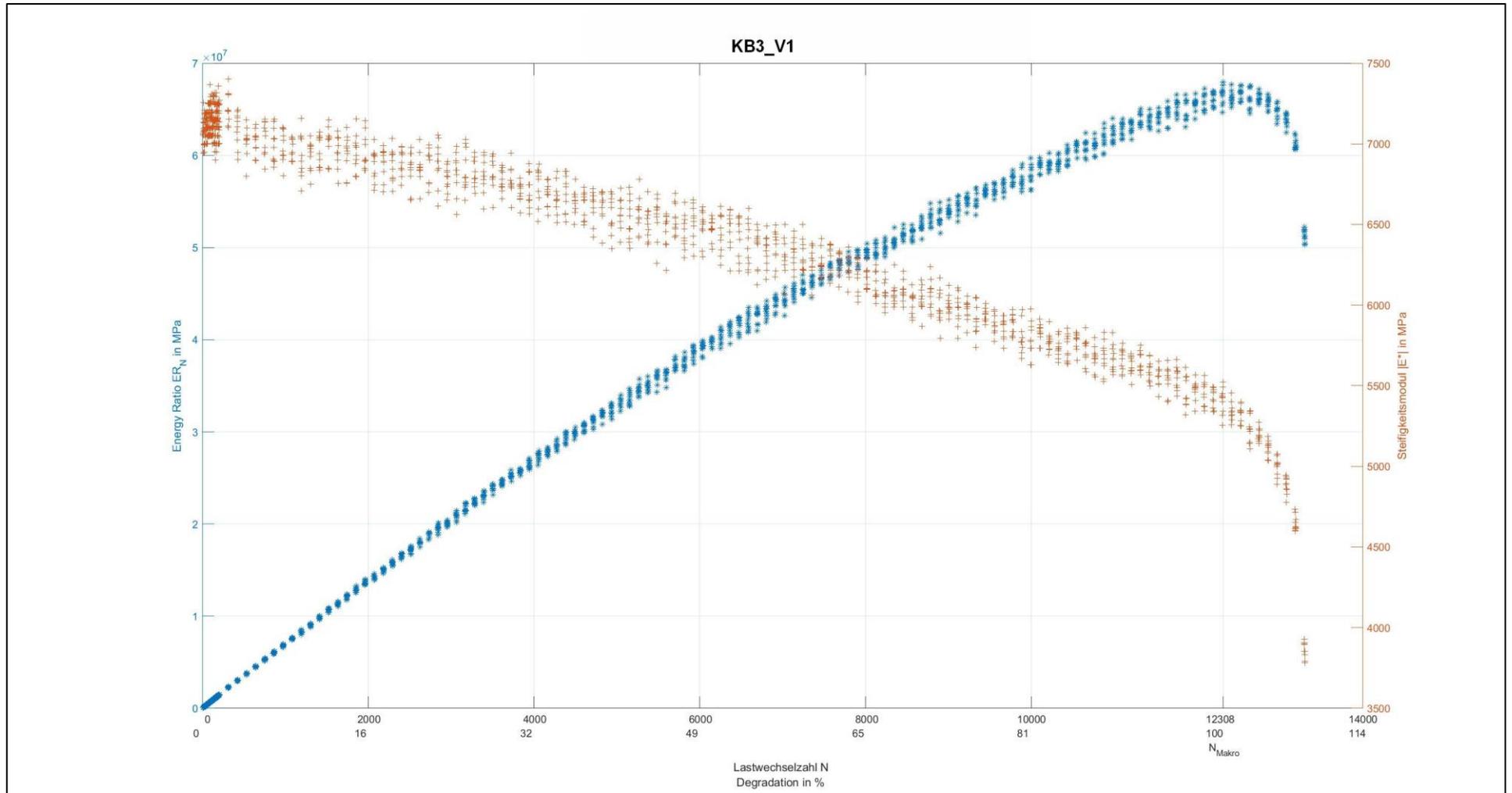
Ordner: Anlage D2 Videos Spaltzugschwellversuch_Ermuedung

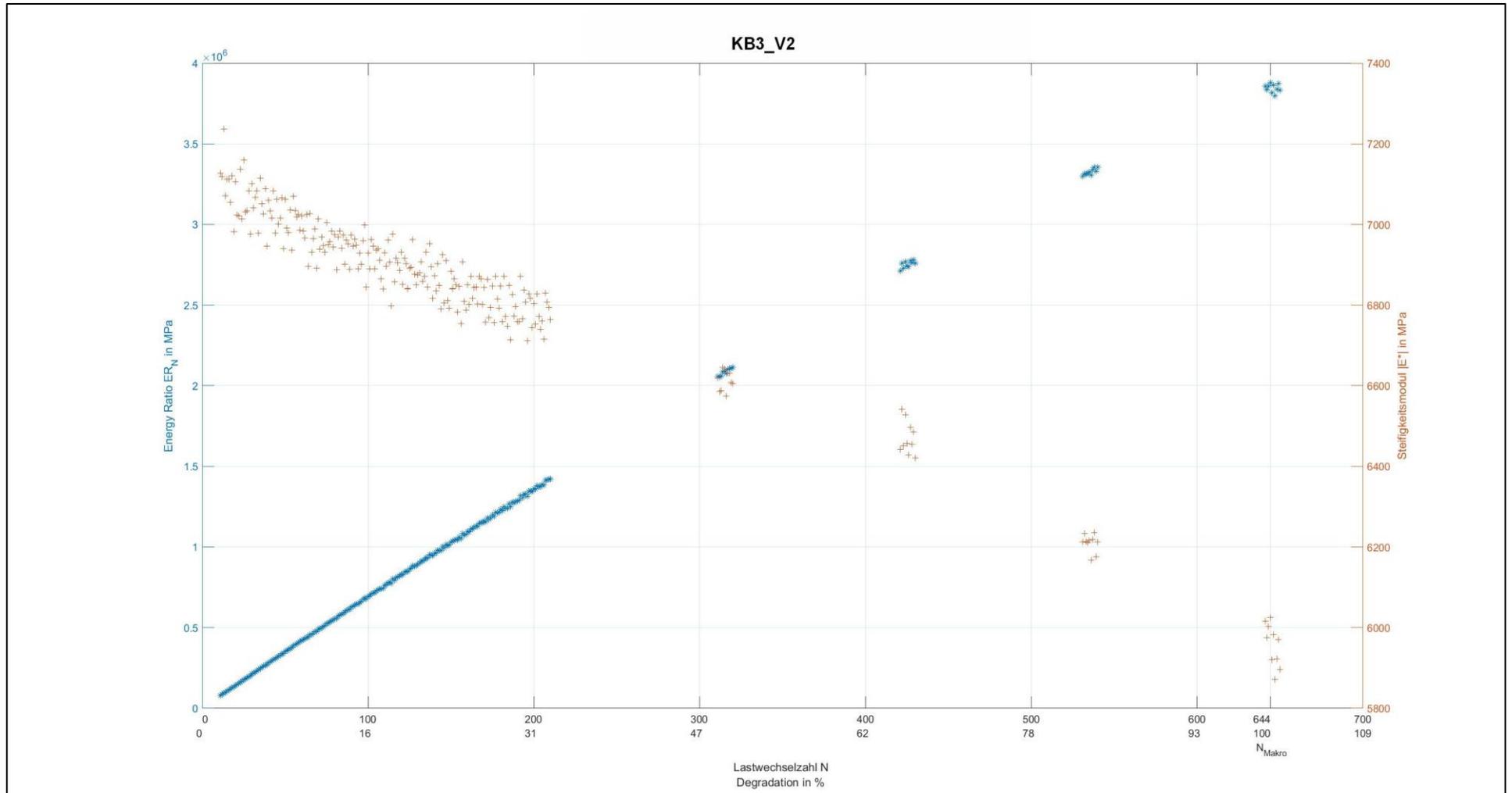
Inhalt: D2.5 Spaltzugschwellversuch_Ermuedung_KB3

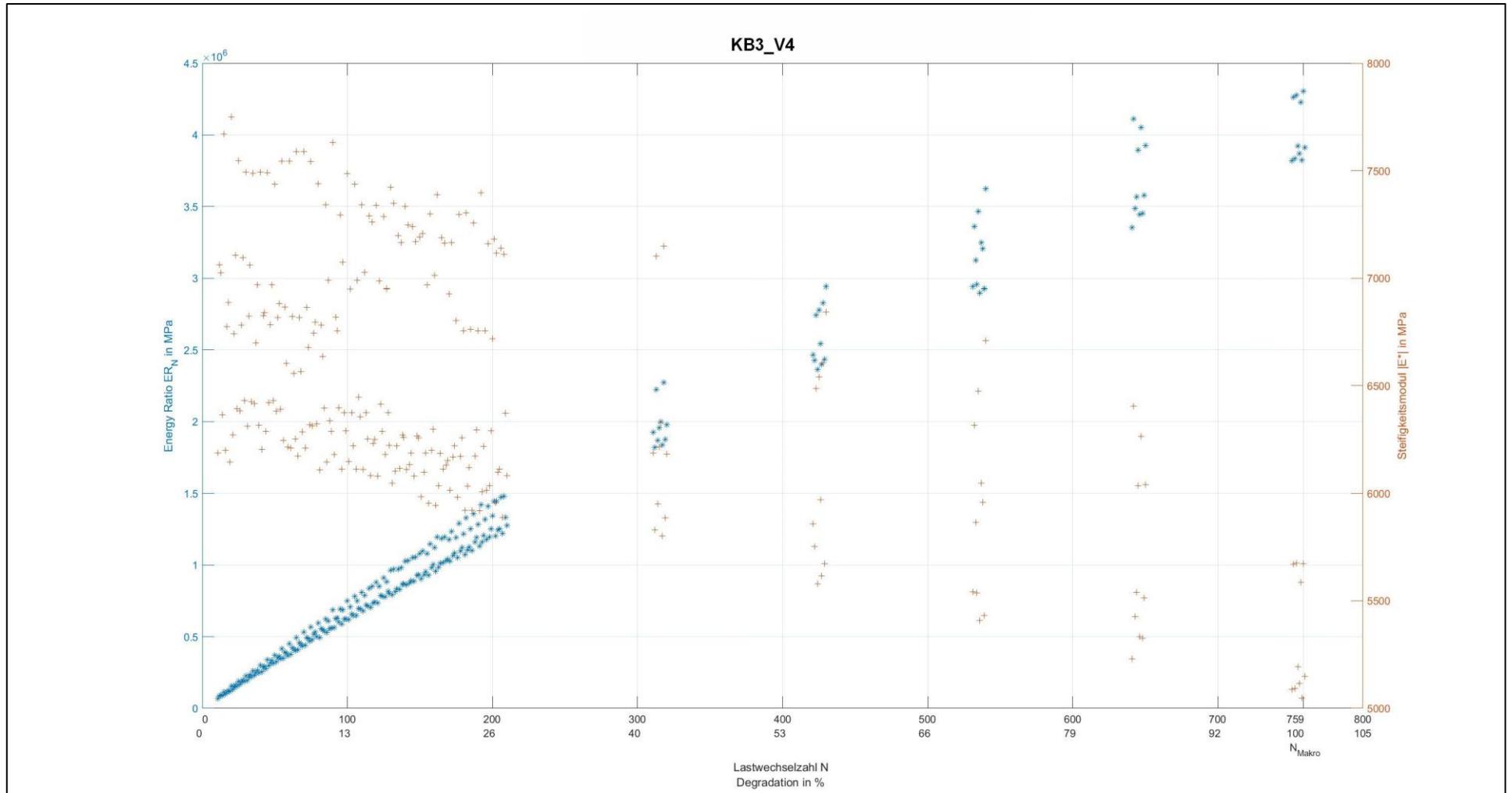
Mp4

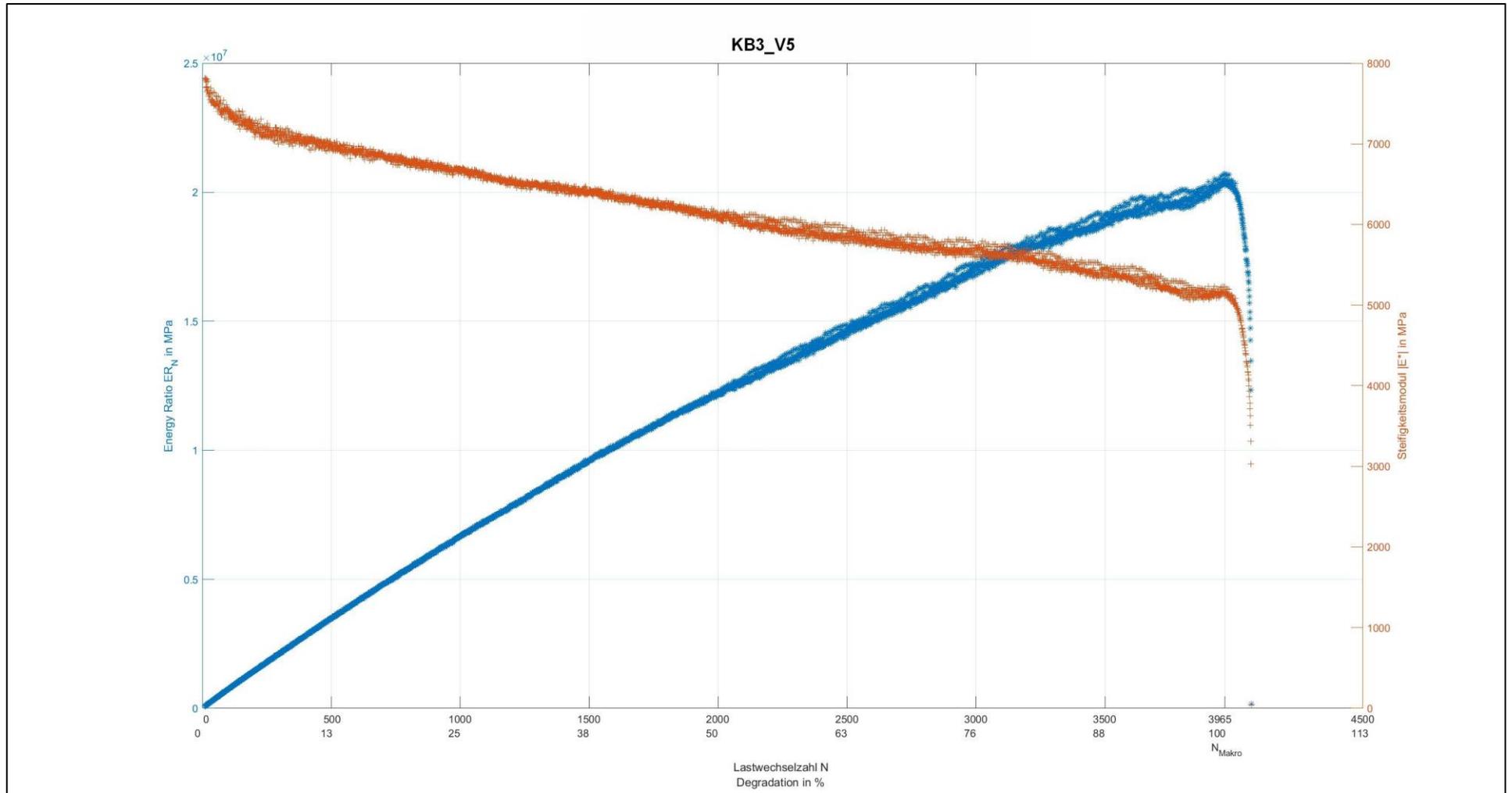
Tab. A.5: Ergebnisse der Versuche zum Ermüdungsverhalten des Baustoffgemisches KB3

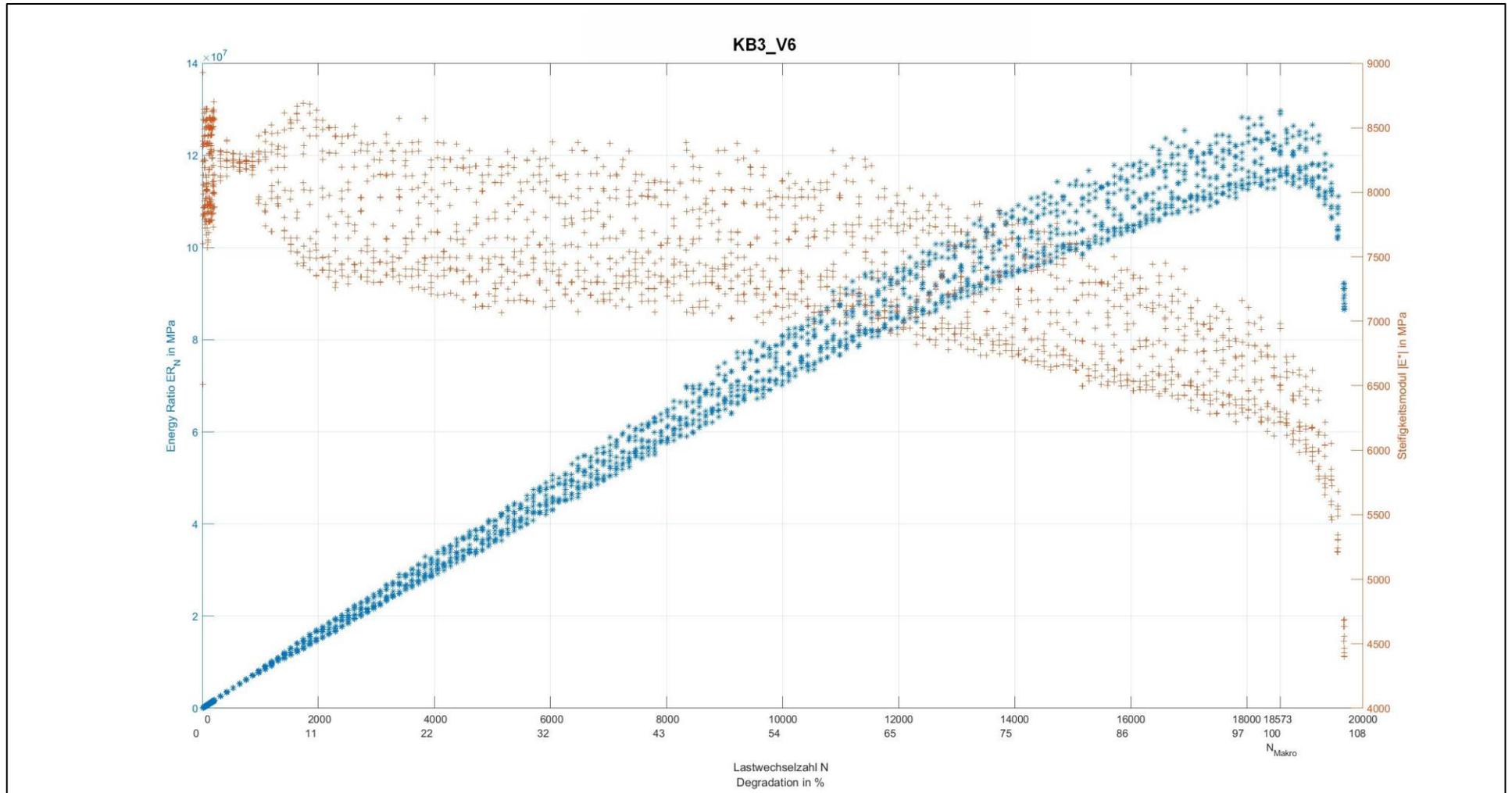
Probekörpernr.	Durchmesser d [mm]	Höhe h [mm]	Temperatur t [°C]	Frequenz f [Hz]	Oberspannung σ_o [MPa]	Unterspannung σ_u [MPa]	Elastische Anfangsdehnung $E_{el,anf}$ [‰]	Lastwechselzahl N_{Makro} [-]
1	100	39	20	0,5	1,2	0,3	0,2771	12308
2	100	40	20	0,5	1,2	0,3	0,3020	644
3	100	40	20	0,5	1,2	0,3	0,0912	41232
4	100	38	20	0,5	1,3	0,3	0,3310	759
5	100	38	20	0,5	1,3	0,3	0,2992	3965
6	100	40	20	0,5	1,3	0,3	0,2557	18573
7	100	41	20	0,5	1,5	0,3	0,3803	121
8	100	38	20	0,5	1,5	0,3	0,3523	539
9	100	38	20	0,5	1,5	0,3	0,3185	428
10	100	40	20	0,5	1,5	0,3	0,3297	756

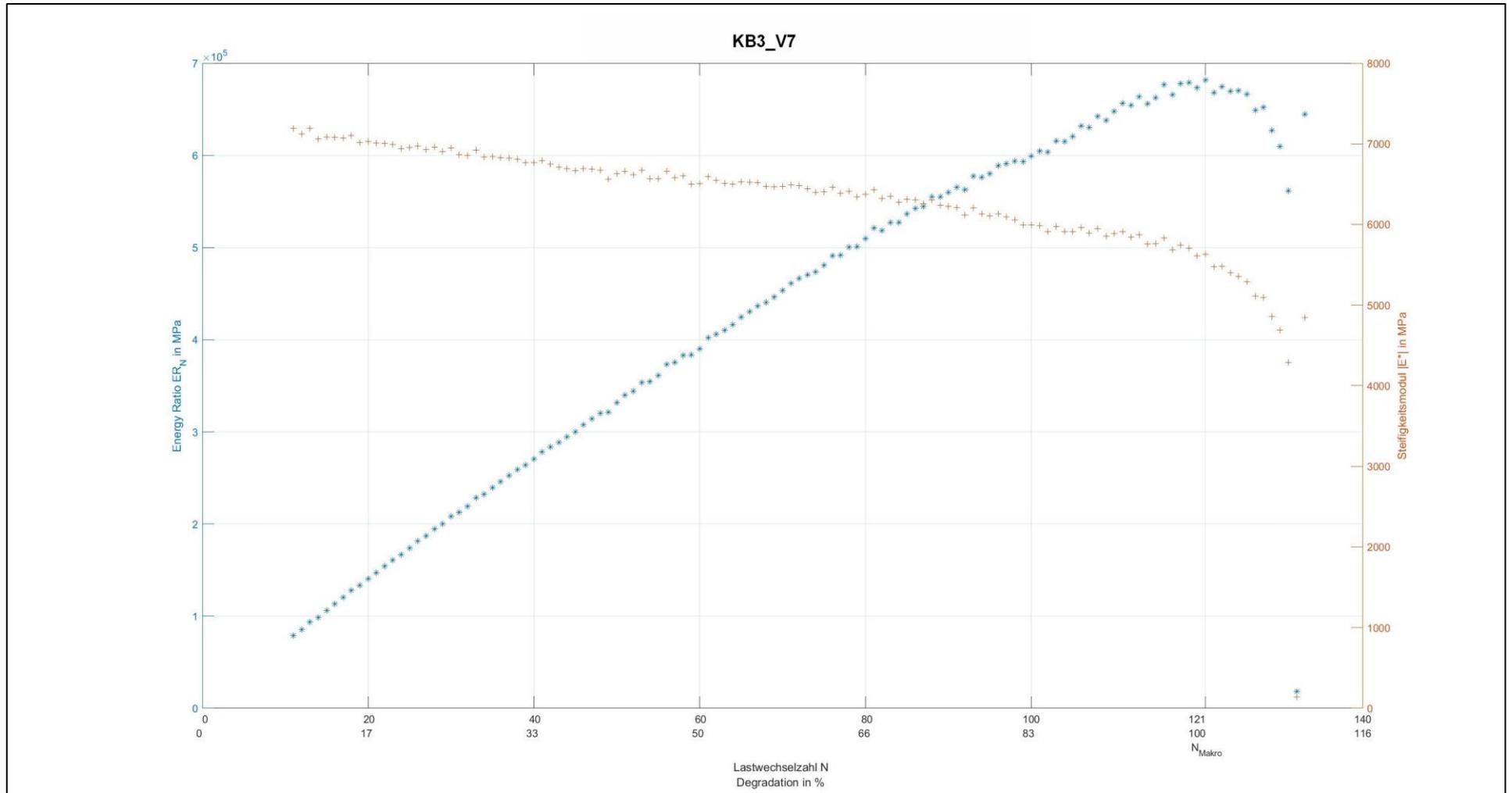


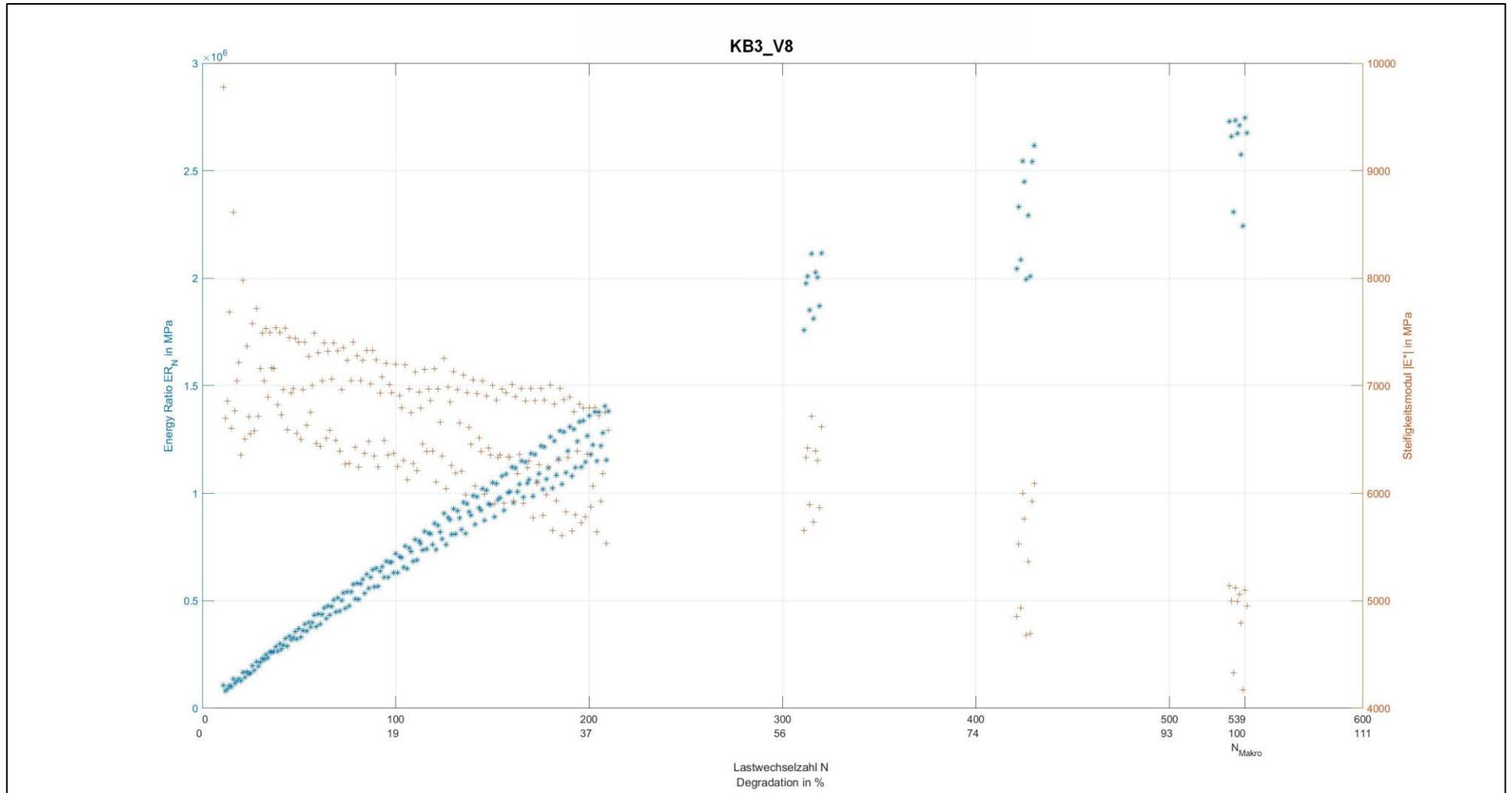


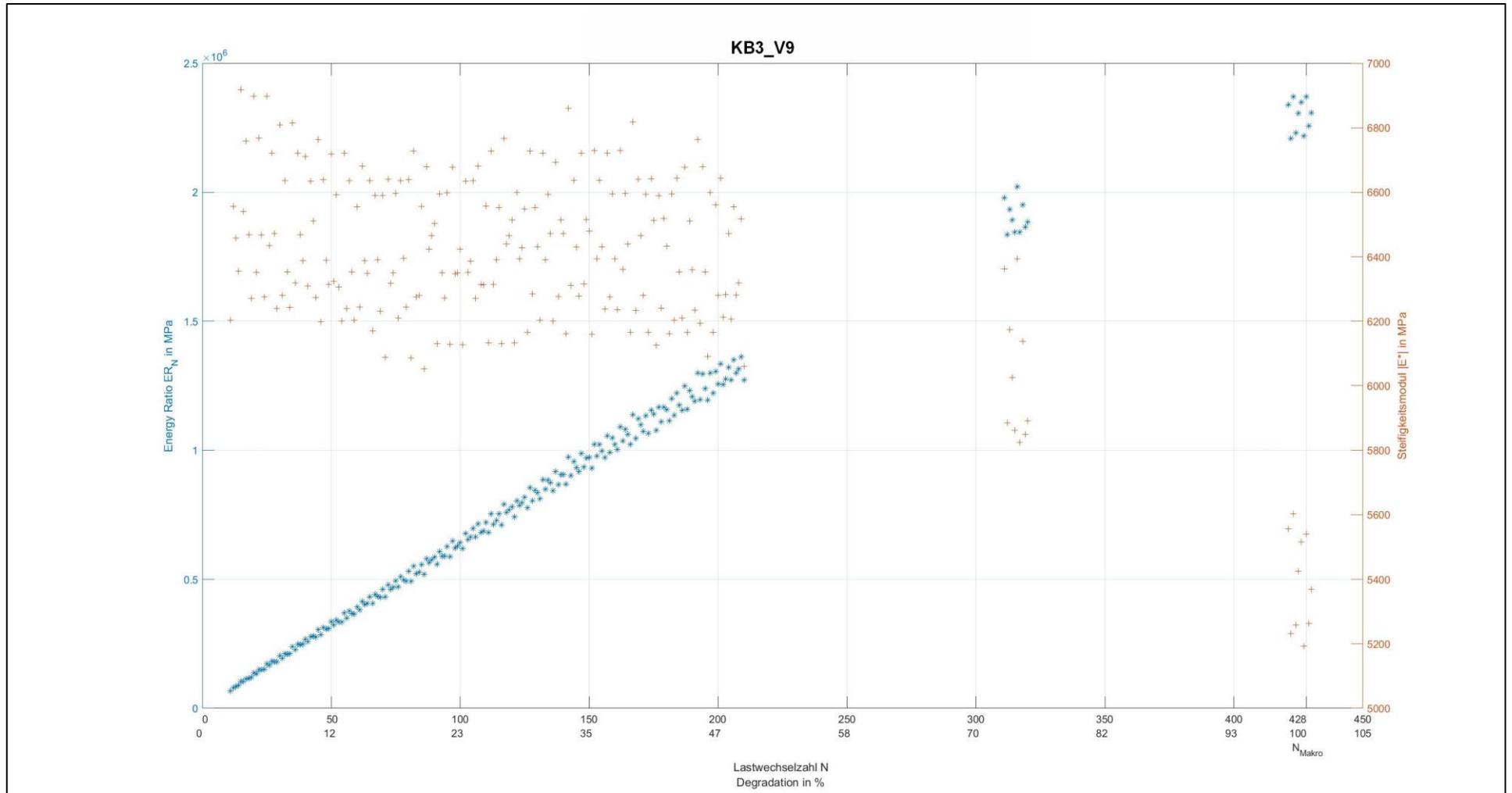


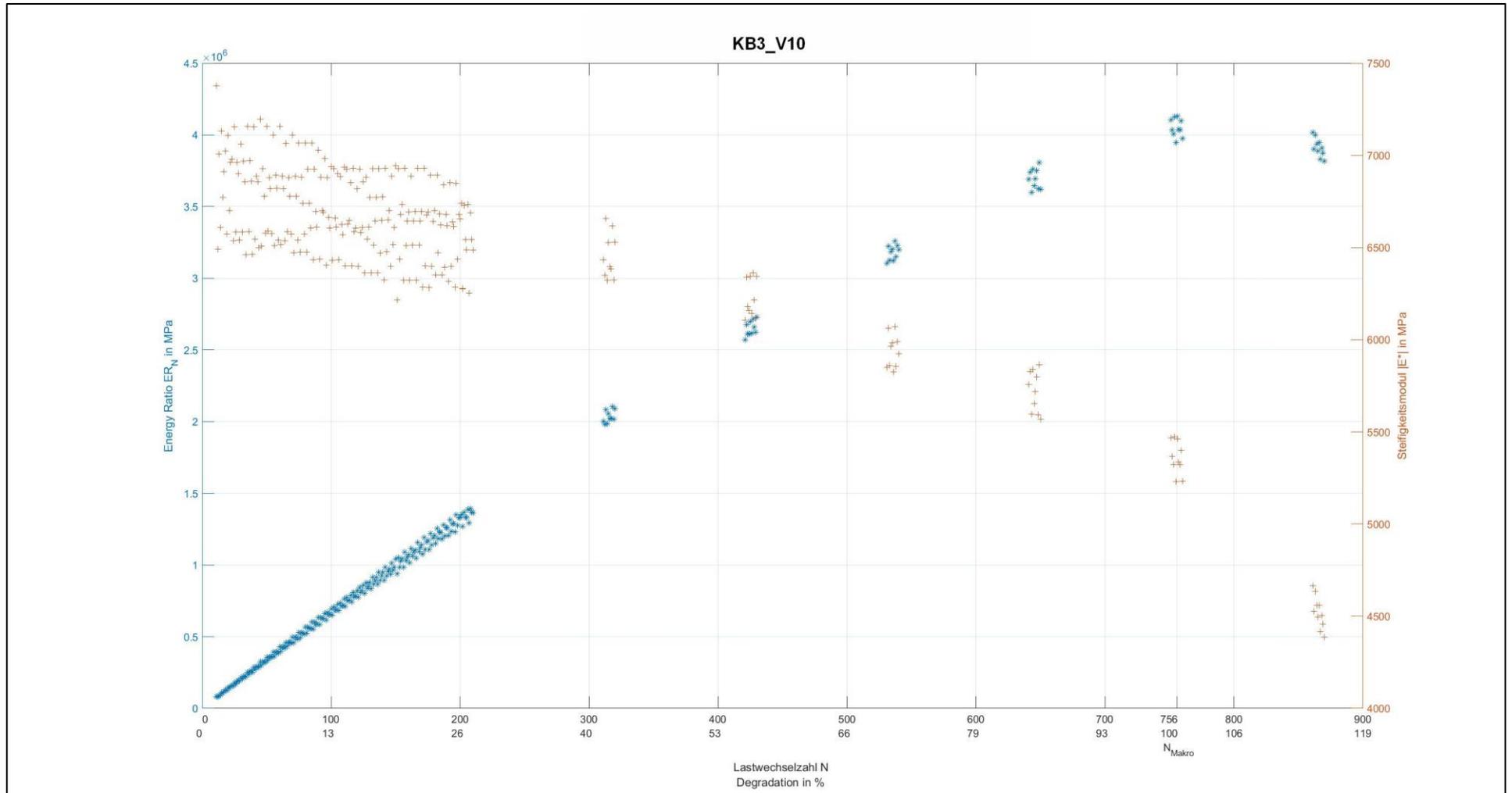










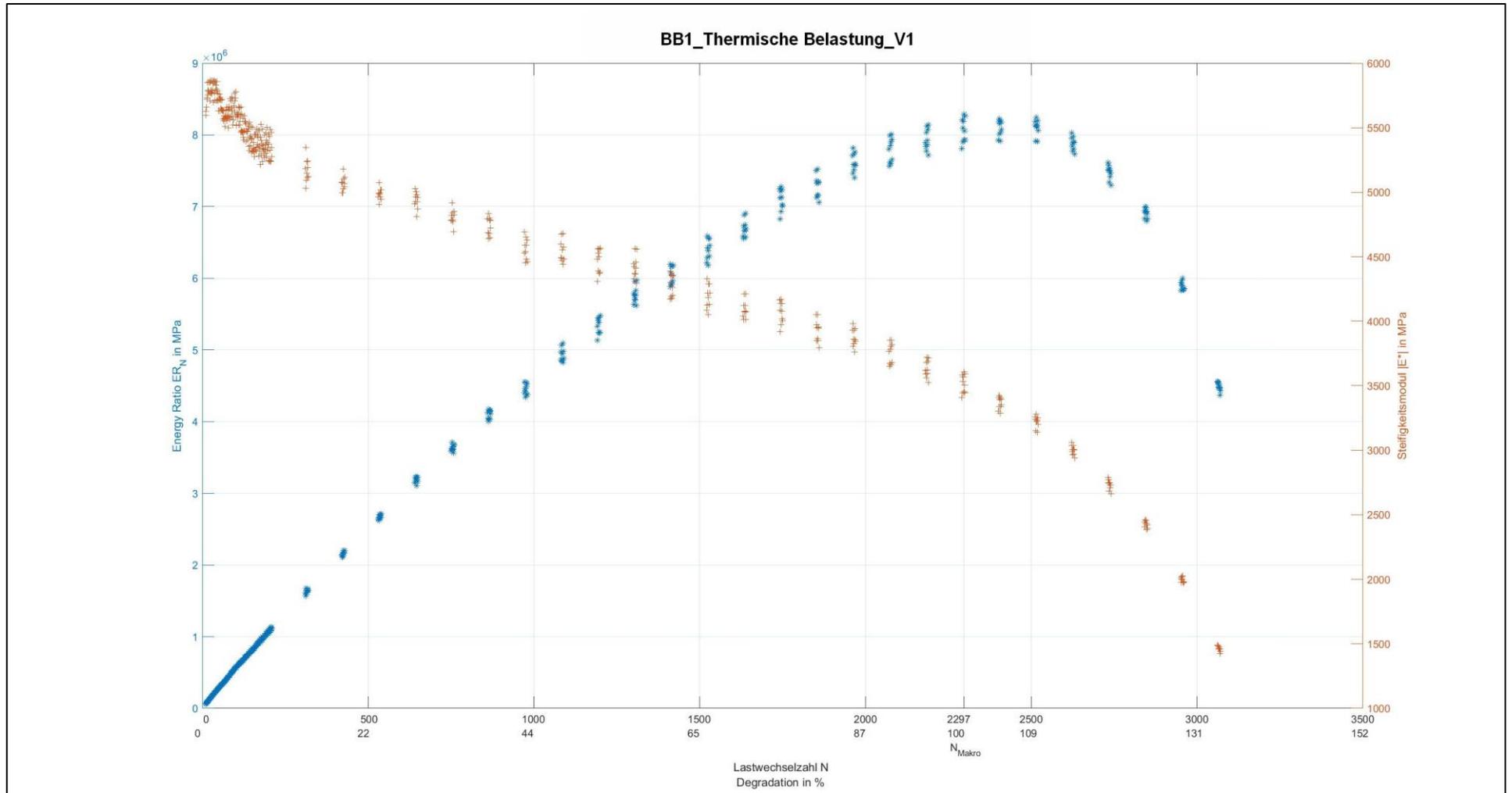


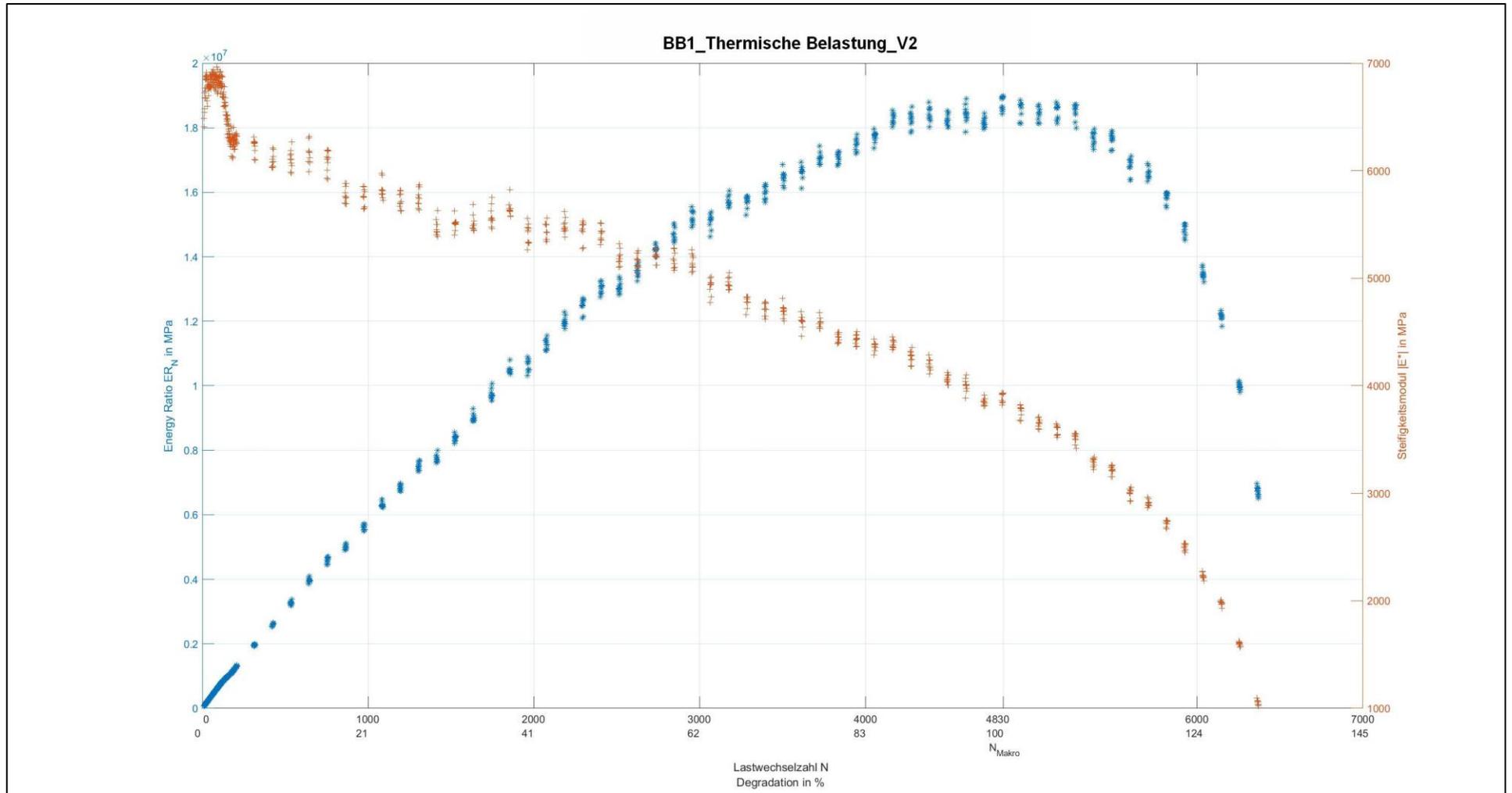
Anlage 3: Spaltzugschwellversuche nach thermischer Belastung

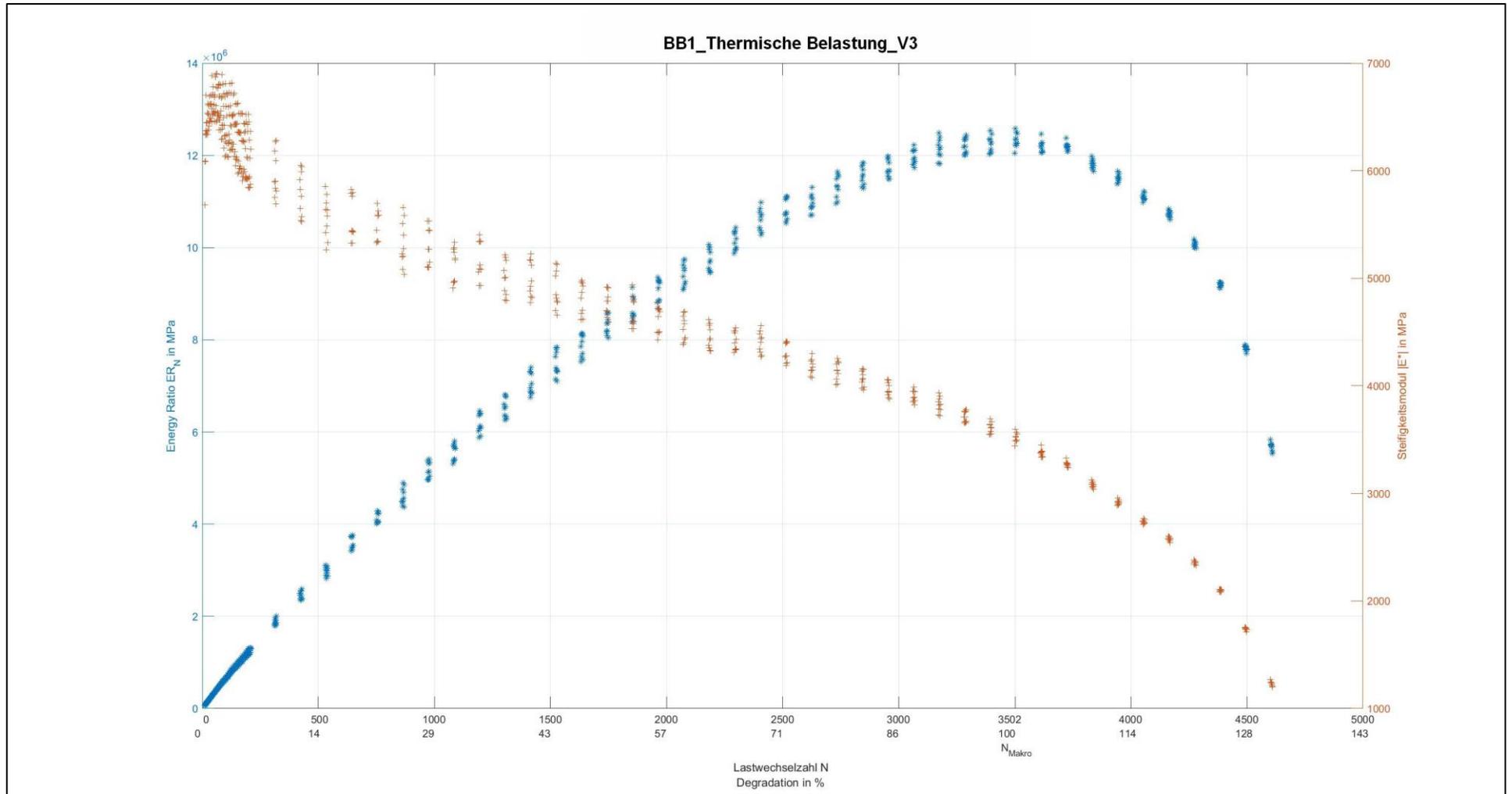
Anlage 3.1: Baustoffgemisch BB1

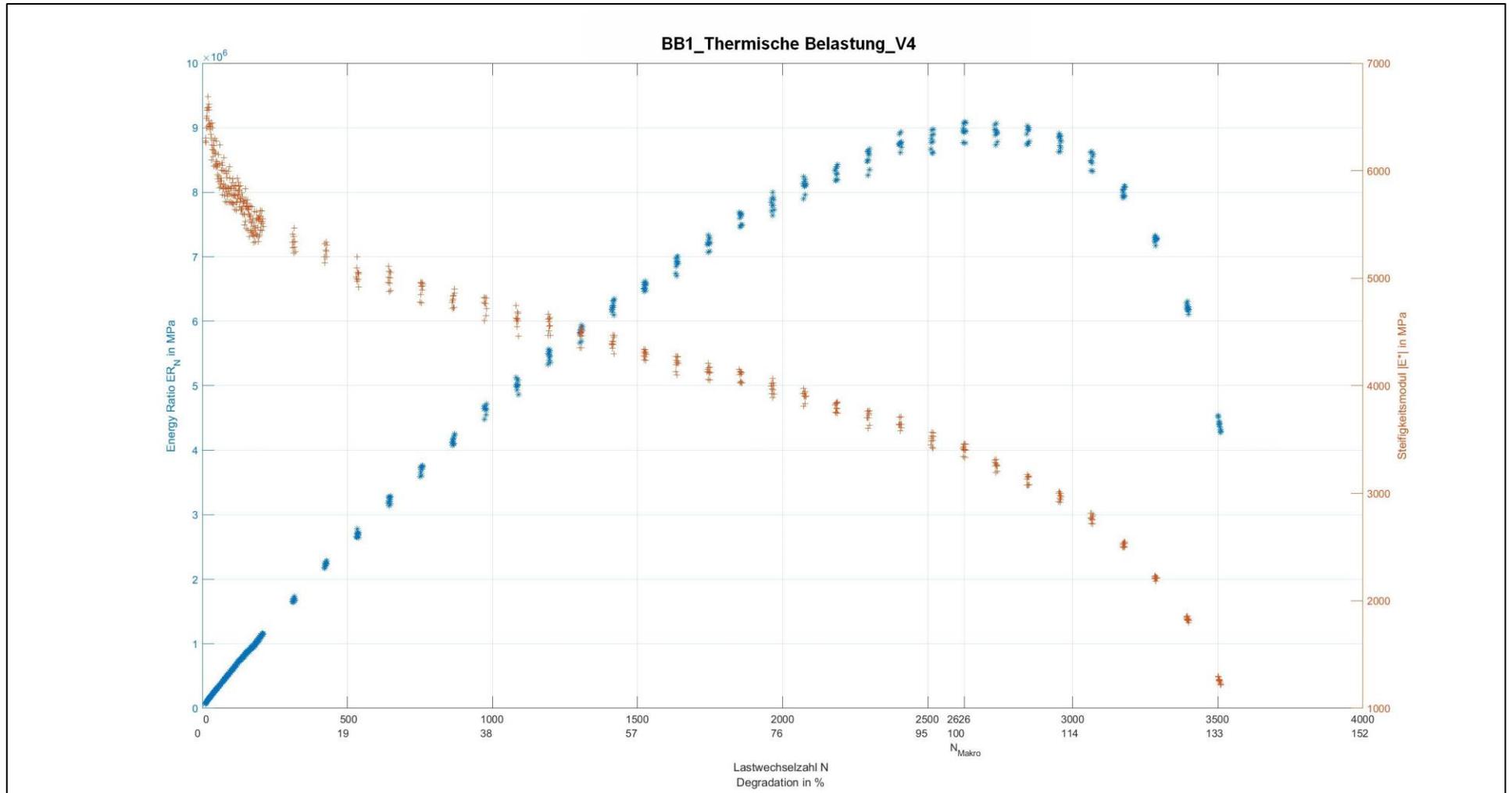
Tab. A.6: Ergebnisse zum Ermüdungsverhalten von BB1 nach Thermischer Belastung

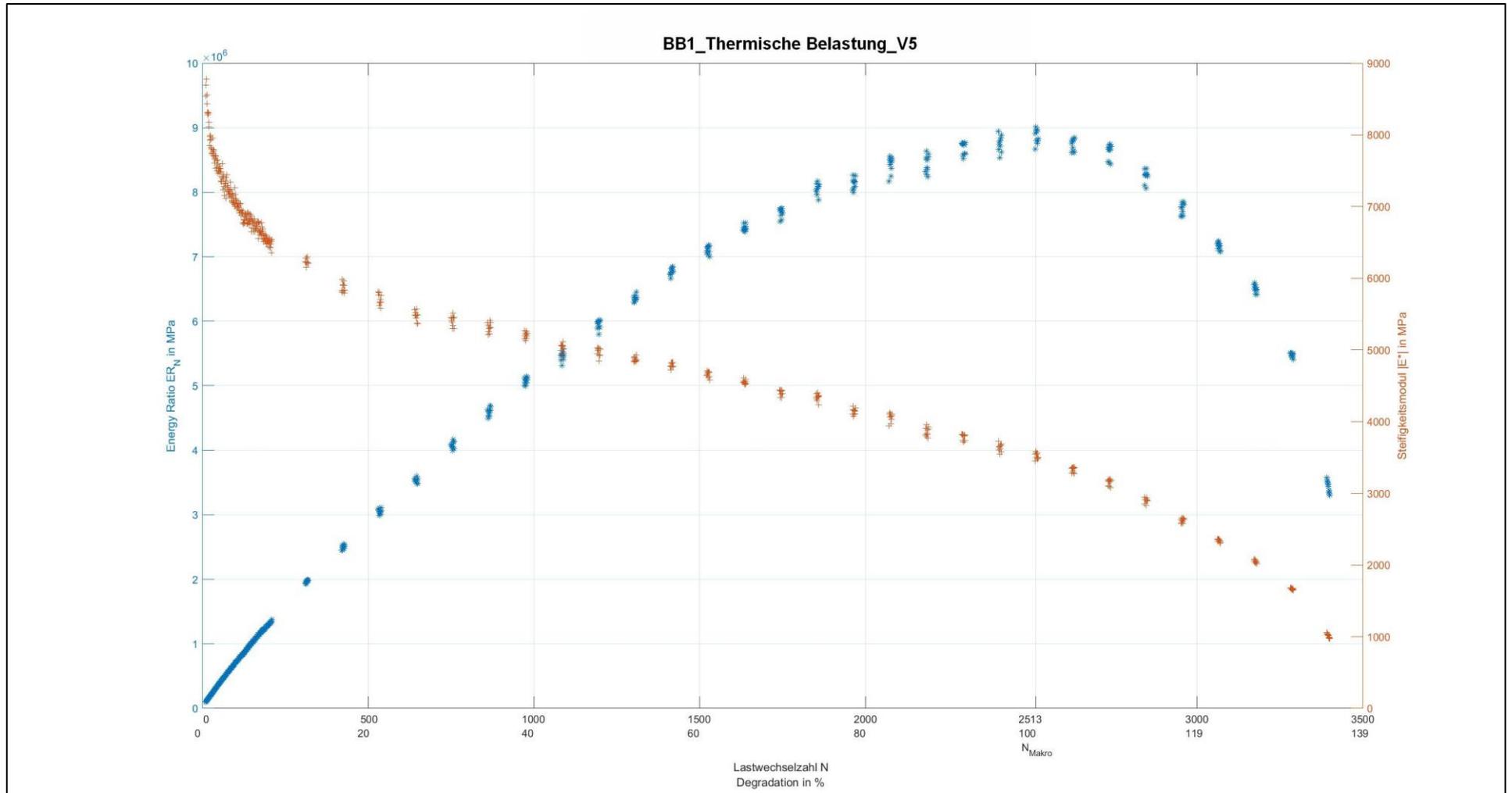
Probekörpernr.	Durchmesser	Höhe	Temperatur	Frequenz	Oberspannung	Unterspannung	Elastische Anfangsdehnung	Lastwechselzahl
	d [mm]	h [mm]	t [°C]	f [Hz]	σ_o [MPa]	σ_u [MPa]	$E_{el, anf}$ [‰]	N_{Makro} [-]
1	100	39	20	0,5	0,6	0,3	0,1763	2297
2	100	39	20	0,5	0,6	0,3	0,1567	4830
3	100	39	20	0,5	0,6	0,3	0,1644	3502
4	100	39	20	0,5	0,6	0,3	0,1613	2626
5	100	39	20	0,5	0,6	0,3	0,1187	2513







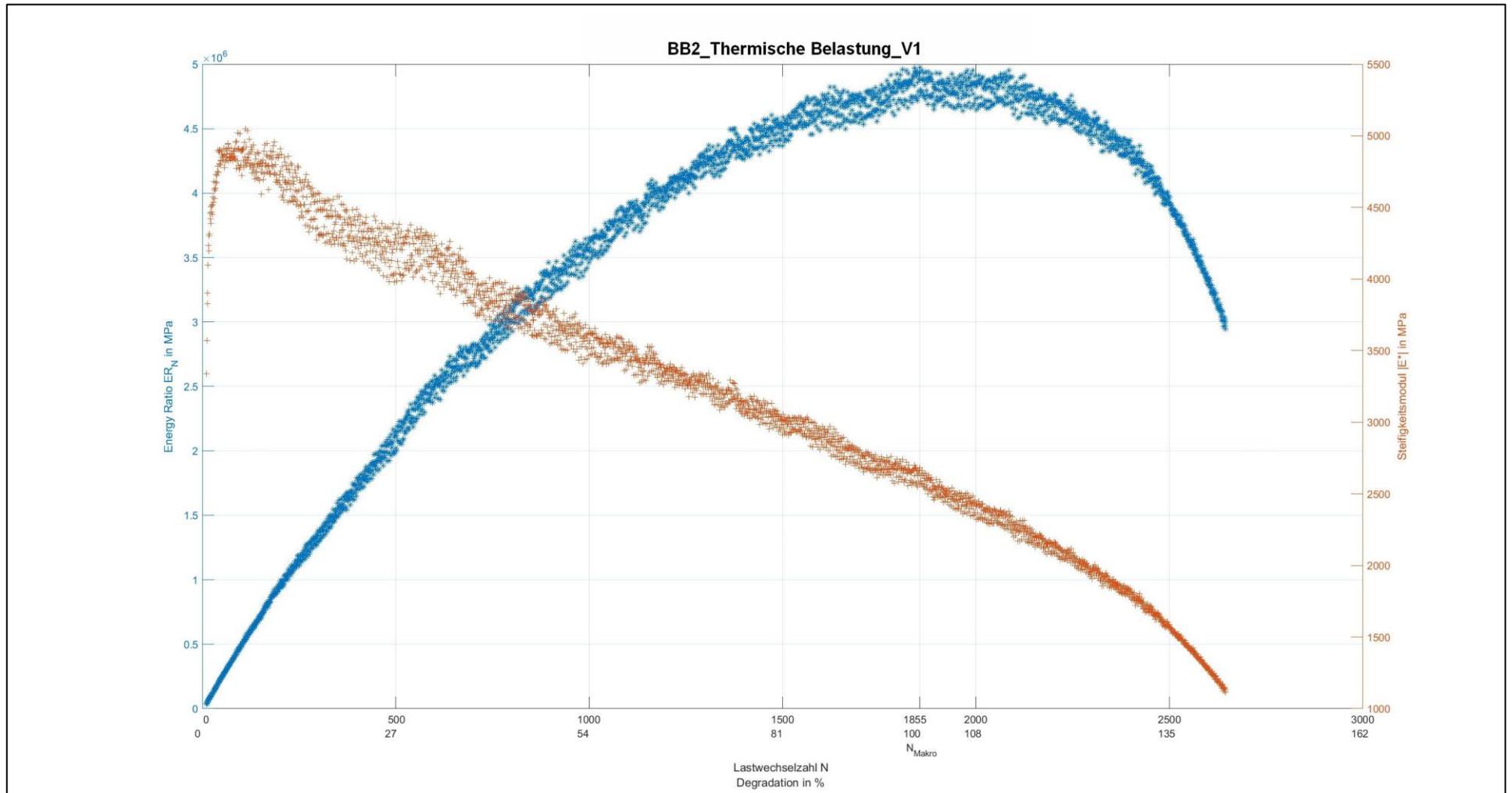


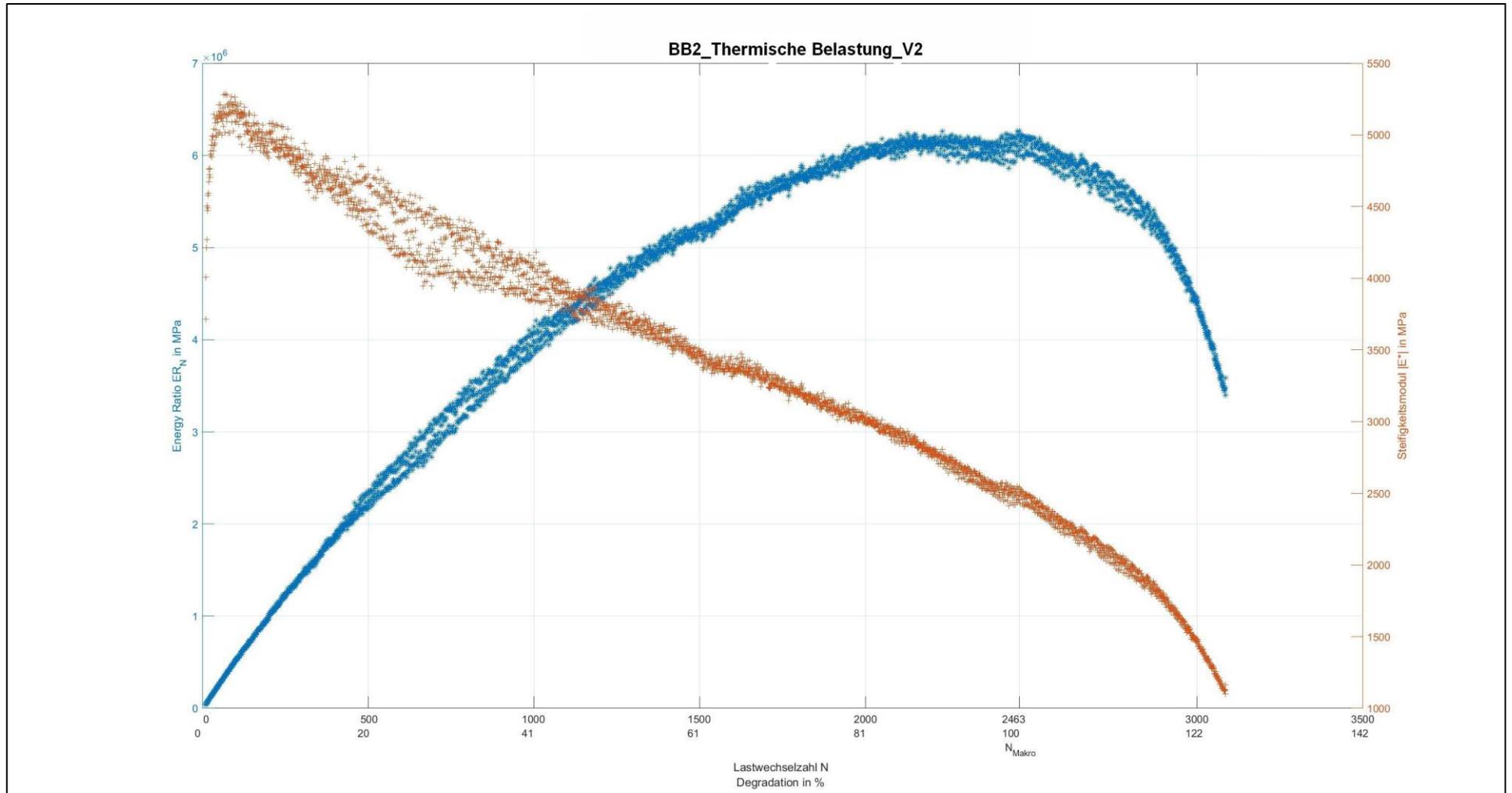


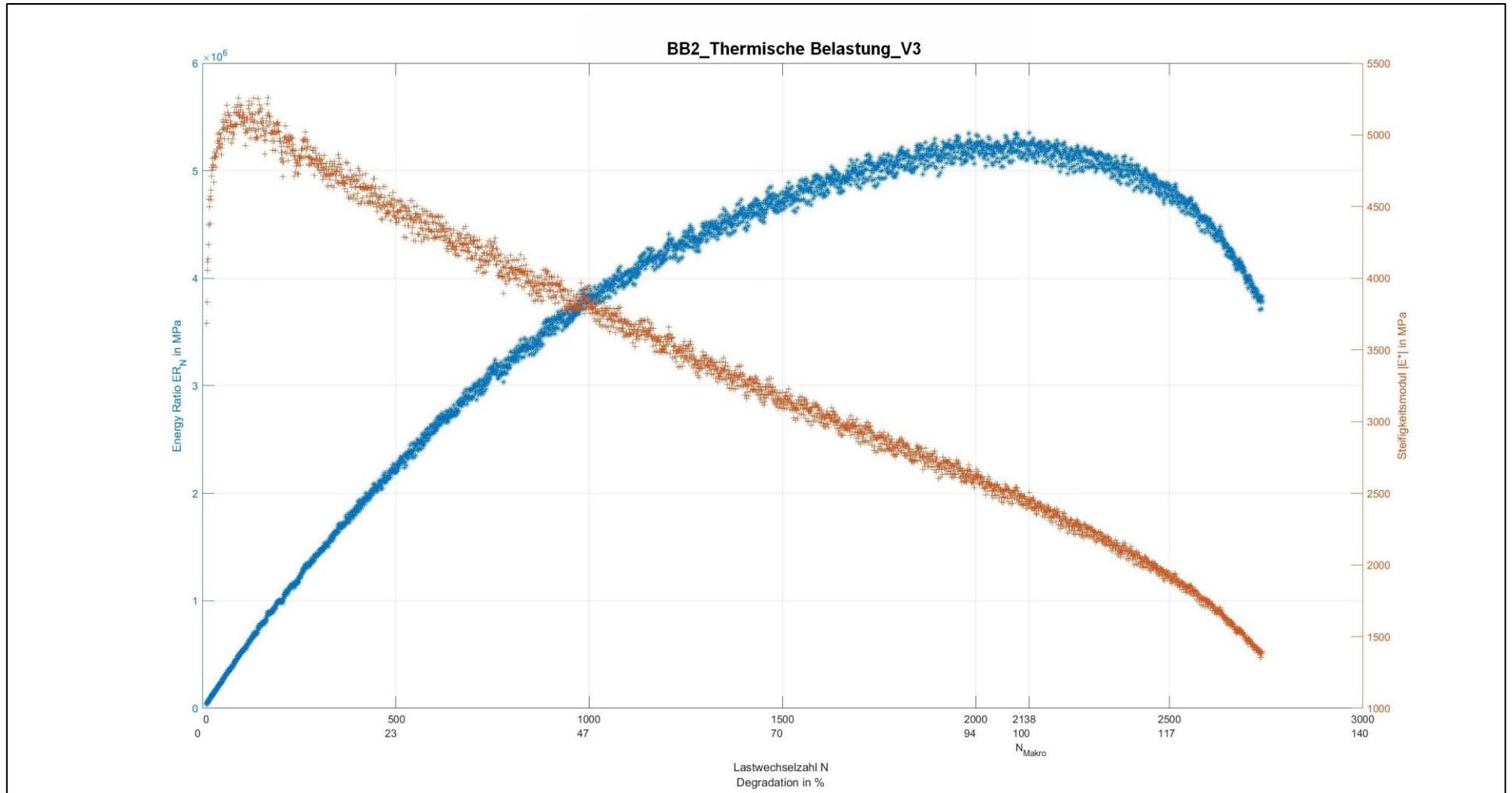
Anlage 3.2: Baustoffgemisch BB2

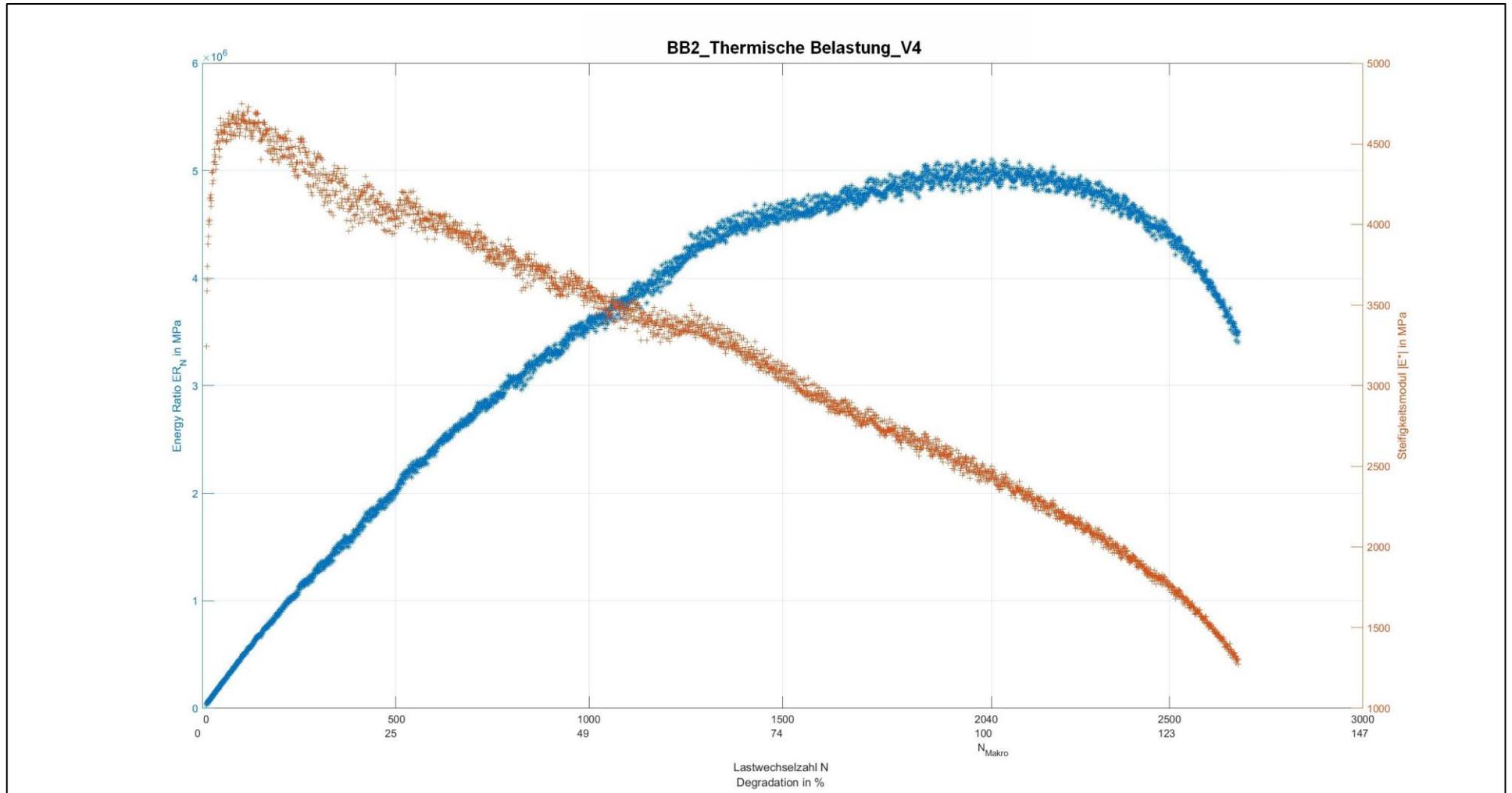
Tab. A.7: Ergebnisse zum Ermüdungsverhalten von BB2 nach Thermischer Belastung

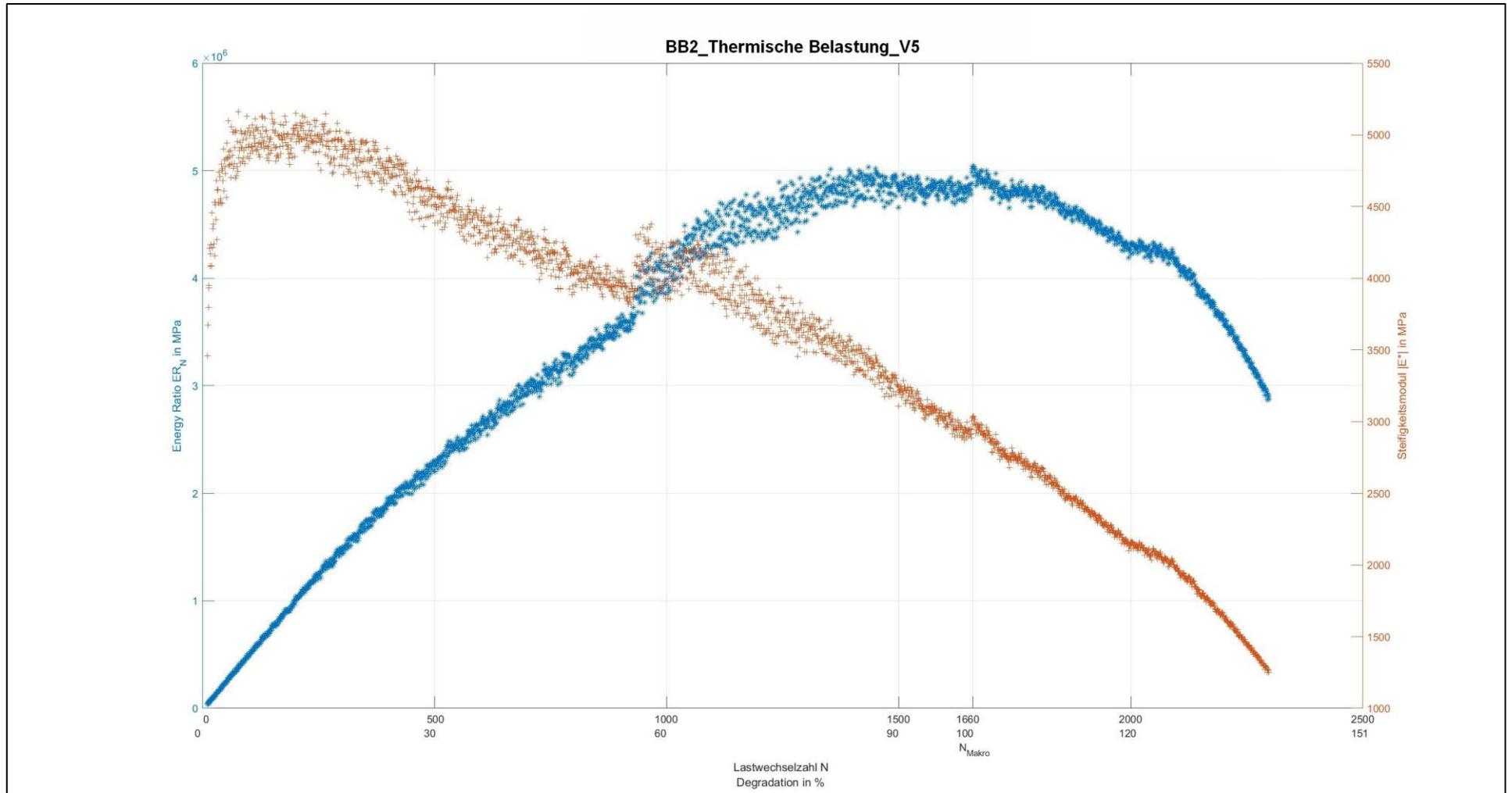
Probe- körperrn.	Durch- messer d [mm]	Höhe h [mm]	Tem- pera- tur t [°C]	Fre- quenz f [Hz]	Ober- span- nung σ_o [MPa]	Unter- span- nung σ_u [MPa]	Elastische An- fangsdehnung $E_{el, anf}$ [‰]	Lastwech- selzahl N_{Makro} [-]
1	100	40	20	0,5	0,4	0,3	0.1924	1855
2	100	39	20	0,5	0,4	0,3	0.1763	2463
3	100	40	20	0,5	0,4	0,3	0.1791	2138
4	100	38	20	0,5	0,4	0,3	0.1933	2040
5	100	40	20	0,5	0,4	0,3	0.1842	1660







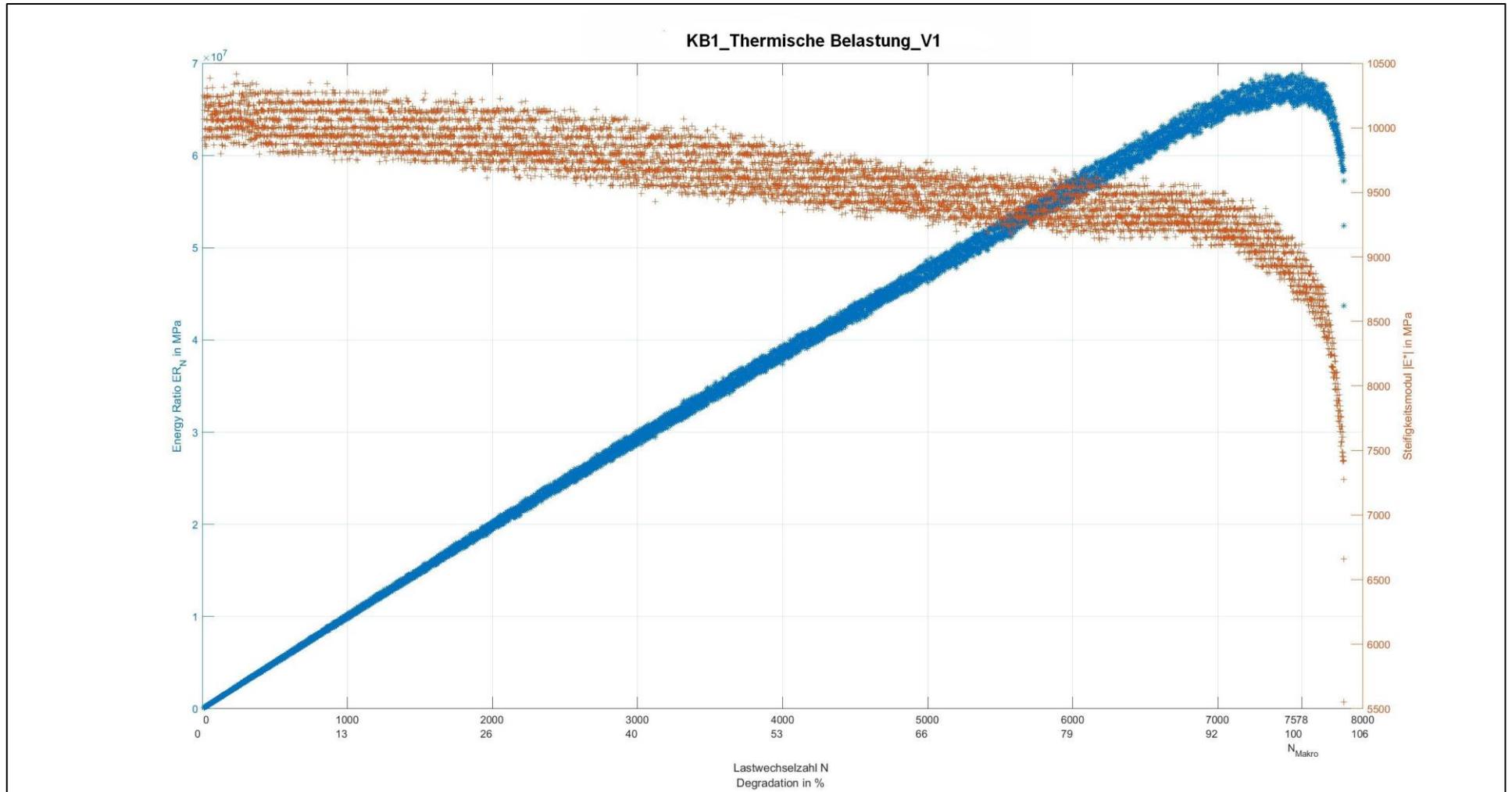


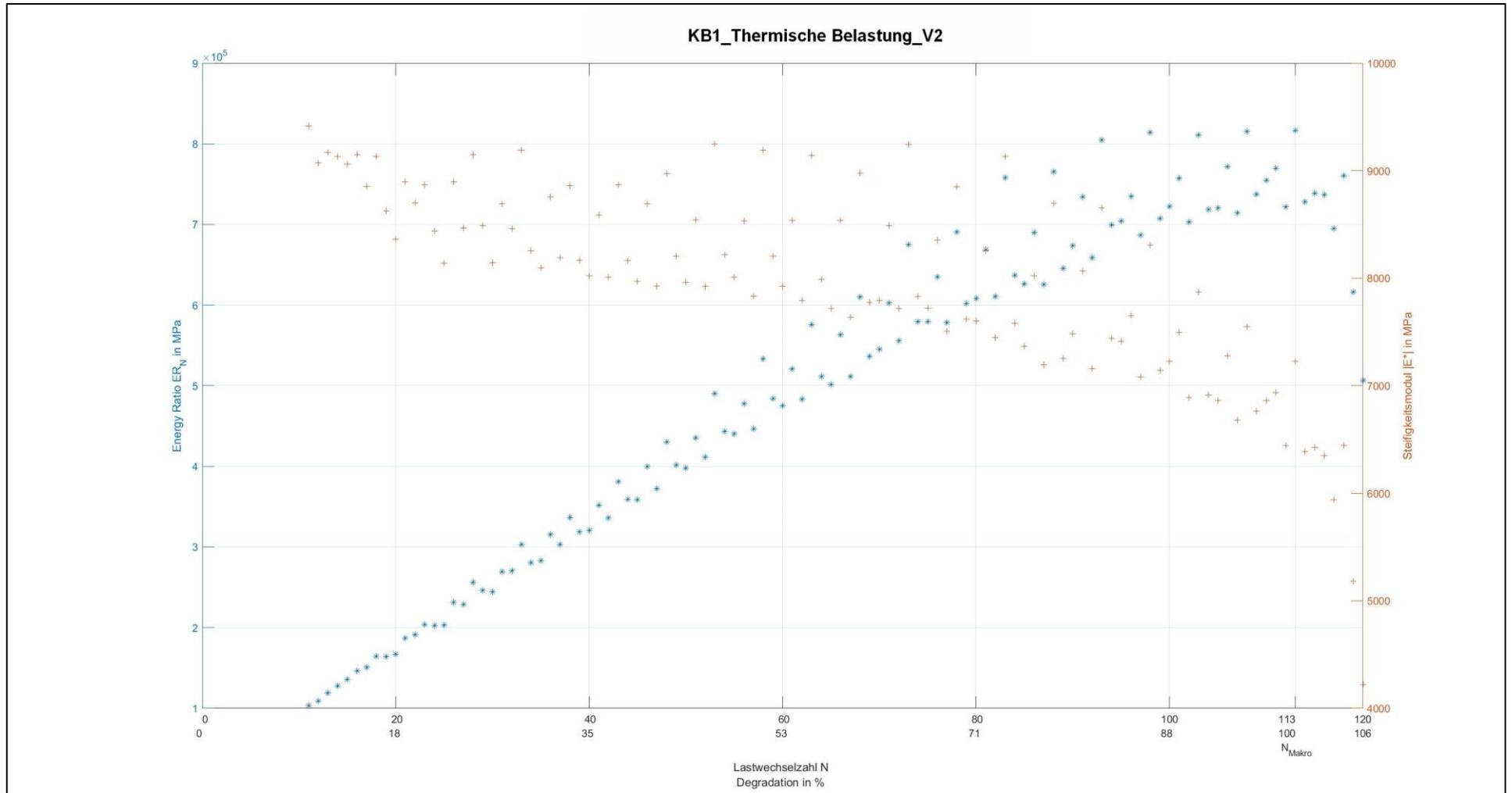


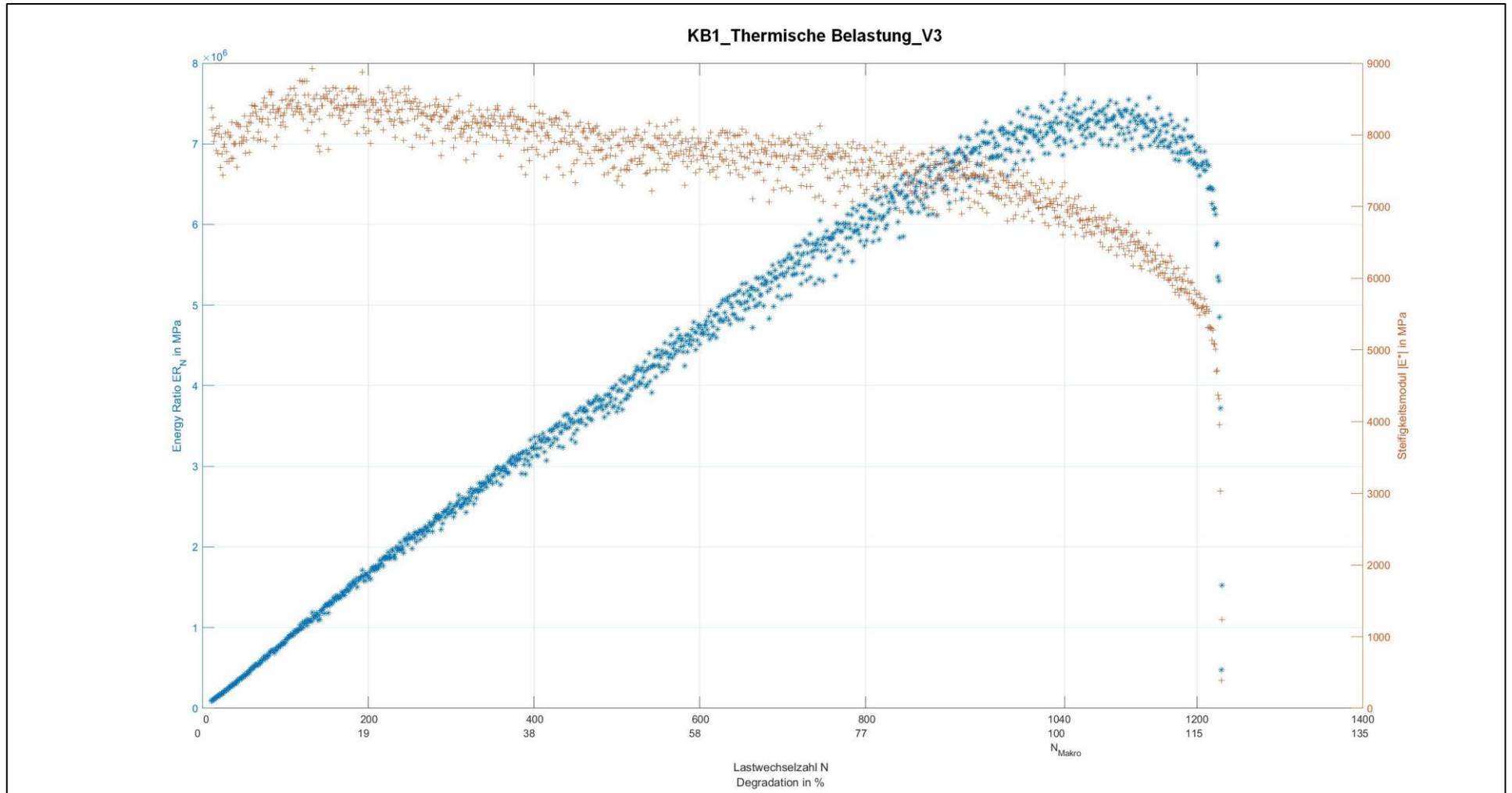
Anlage 3.3: Baustoffgemisch KB1

Tab. A.8: Ergebnisse zum Ermüdungsverhalten von KB1 nach Thermischer Belastung

Probekörpernr.	Durchmesser d [mm]	Höhe h [mm]	Temperatur t [°C]	Frequenz f [Hz]	Oberspannung σ_o [MPa]	Unterspannung σ_u [MPa]	Elastische Anfangsdehnung $E_{el, anf}$ [‰]	Lastwechselzahl N_{Makro} [-]
1	100	40	20	0,5	1,7	0,3	0,3353	4279
2	100	40	20	0,5	1,7	0,3	0,3375	113
3	100	40	20	0,5	1,7	0,3	0,3756	1040



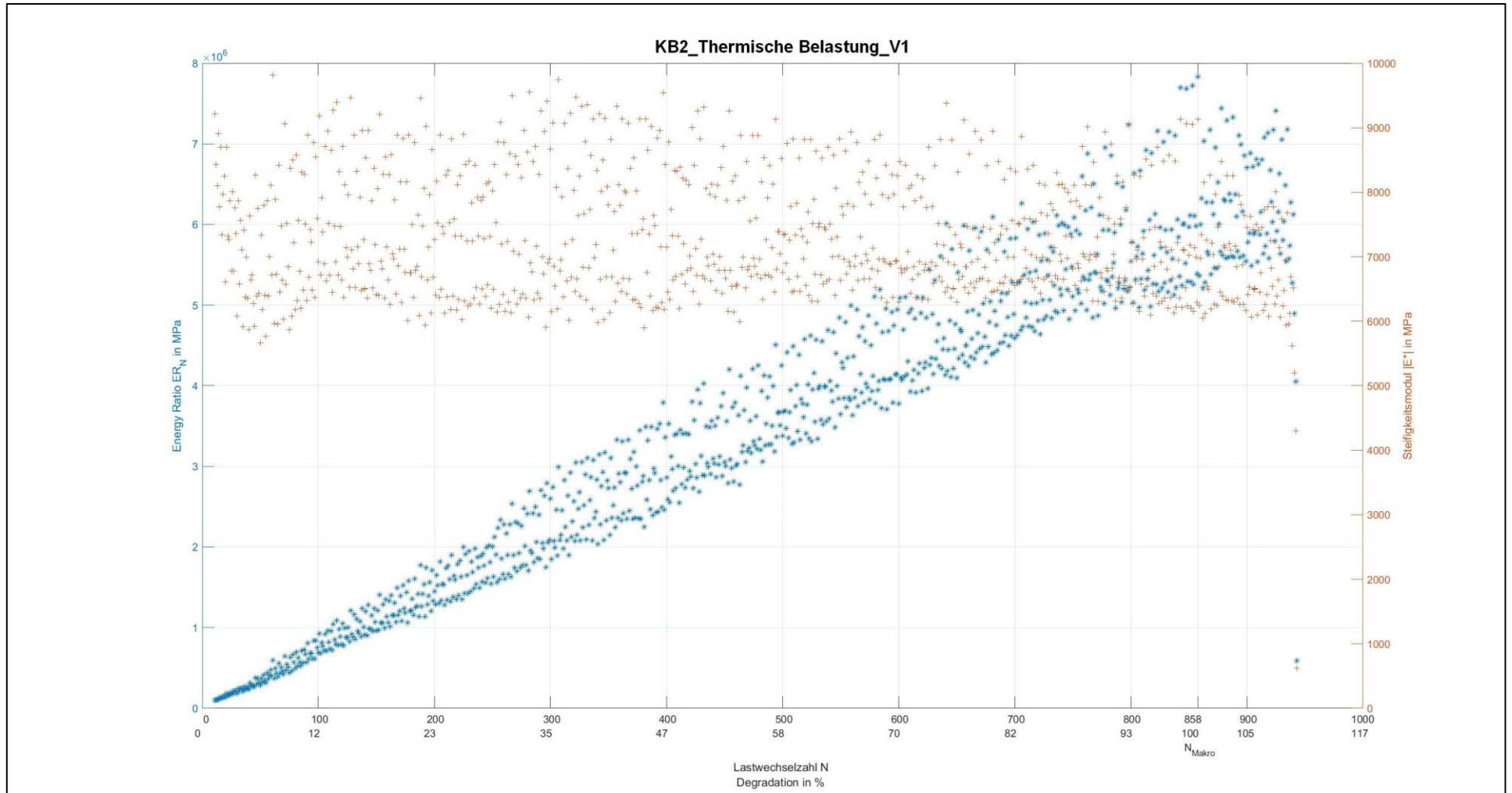


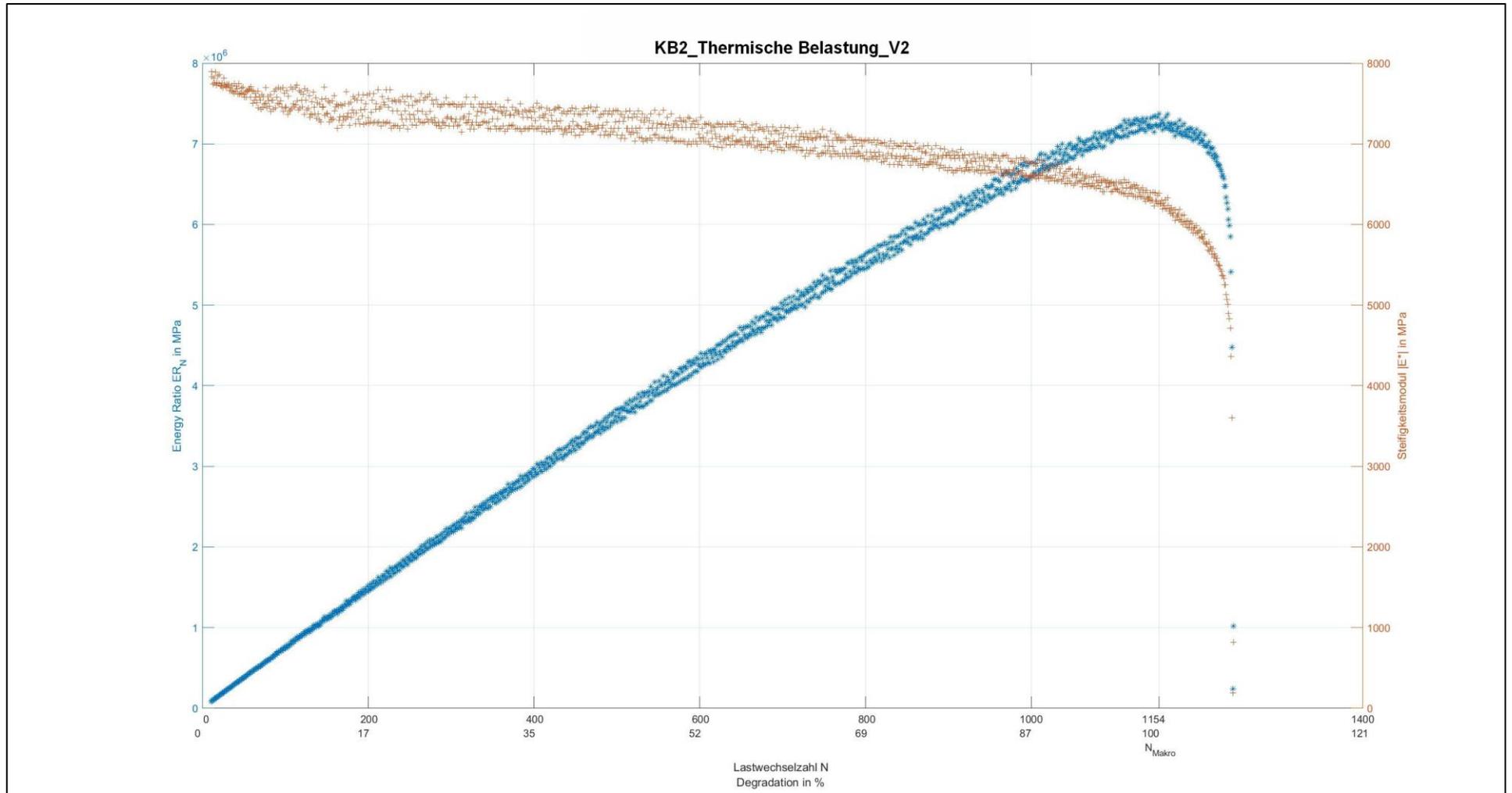


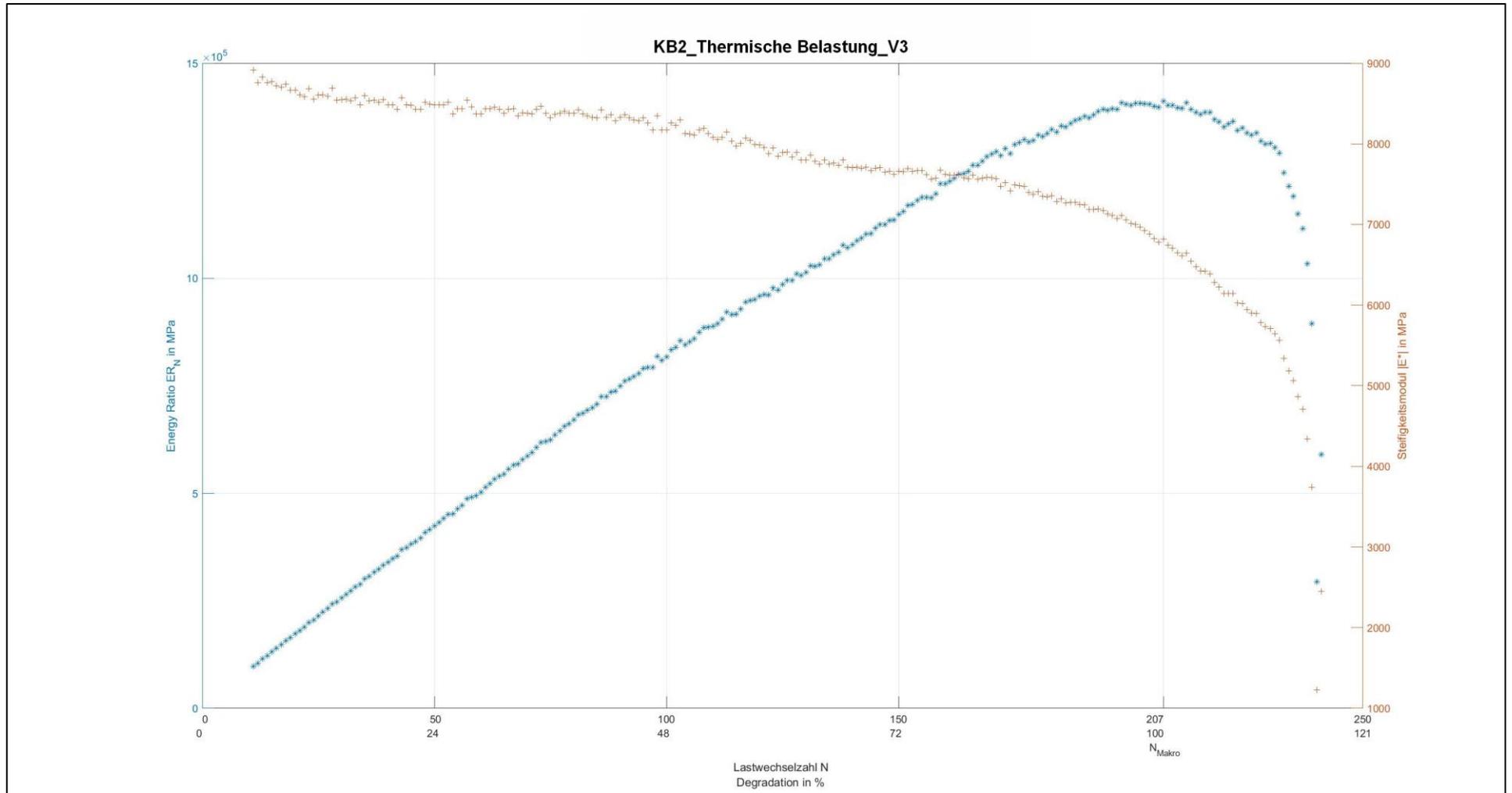
Anlage 3.4: Baustoffgemisch KB2

Tab. A.9: Ergebnisse zum Ermüdungsverhalten von KB2 nach Thermischer Belastung

Probekörpernr.	Durchmesser d [mm]	Höhe h [mm]	Temperatur t [°C]	Frequenz f [Hz]	Oberspannung σ_o [MPa]	Unterspannung σ_u [MPa]	Elastische Anfangsdehnung $E_{el, anf}$ [‰]	Lastwechselzahl N_{Makro} [-]
1	100	42	20	0,5	1,5	0,3	0,3202	858
2	100	40	20	0,5	1,5	0,3	0,3467	1154
3	100	40	20	0,5	1,5	0,3	0,3095	207



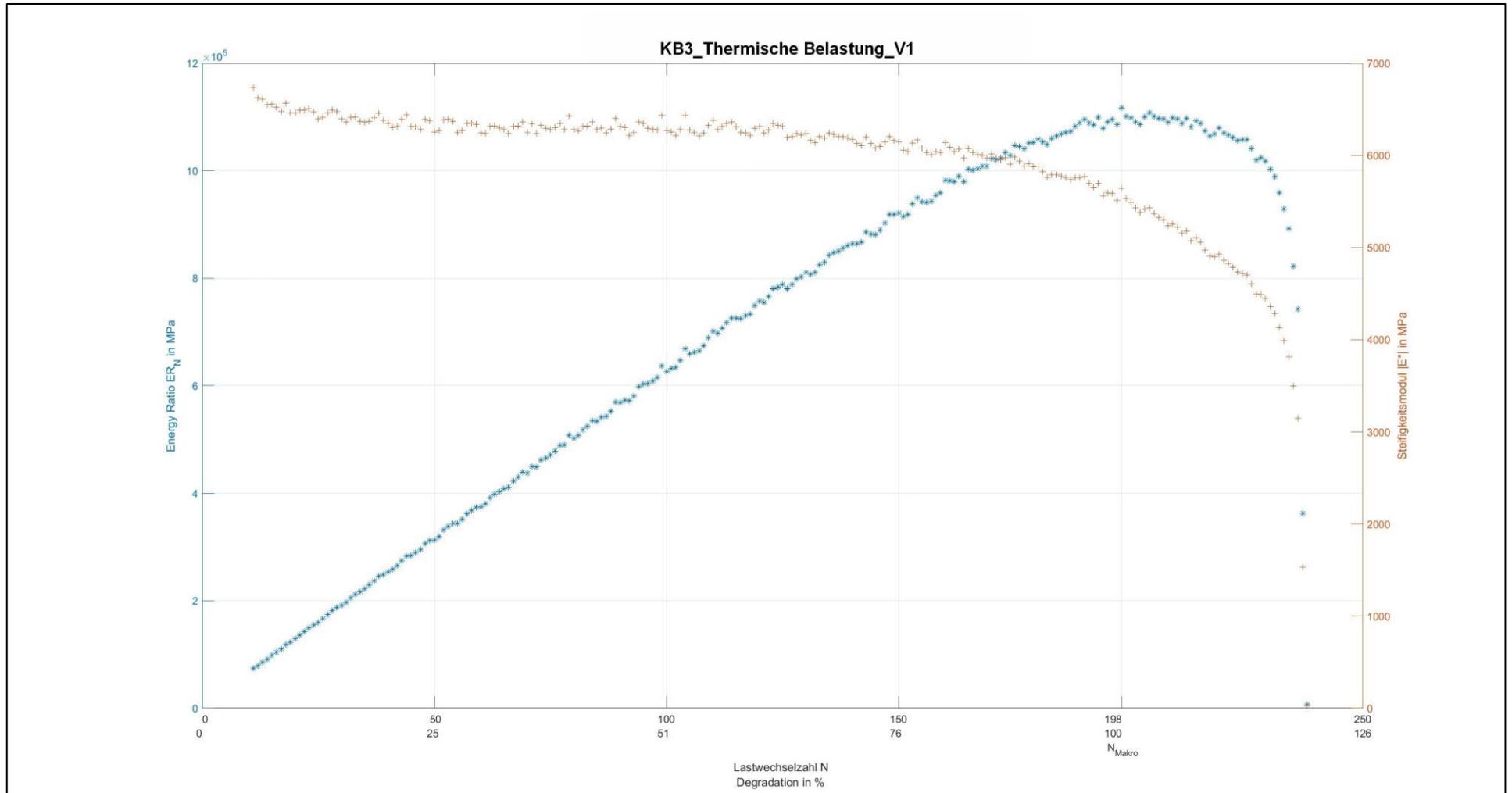


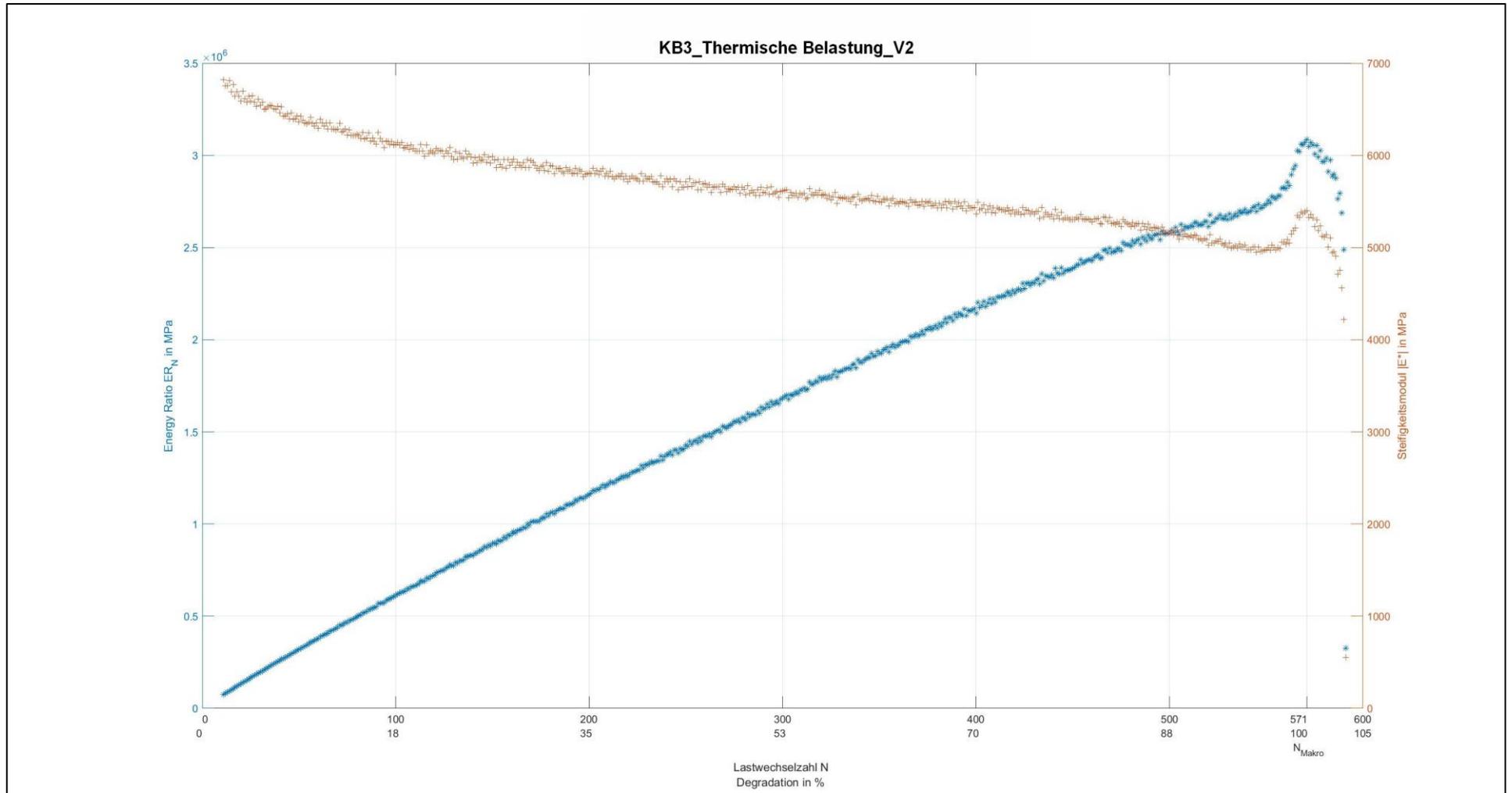


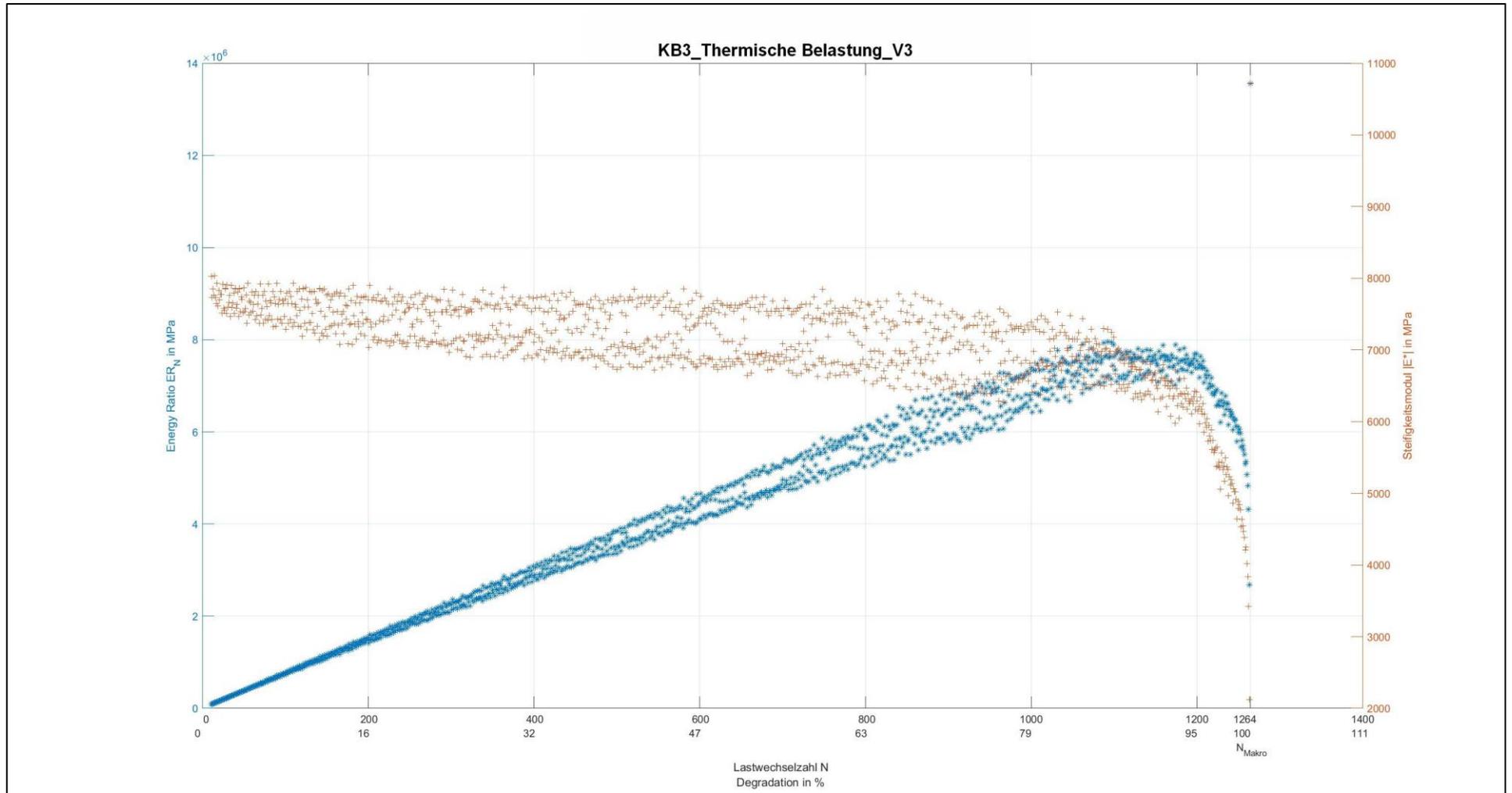
Anlage 3.5: Baustoffgemisch KB3

Tab. A.10: Ergebnisse zum Ermüdungsverhalten von KB3 nach thermischer Belastung

Probekörpernr.	Durchmesser	Höhe	Temperatur	Frequenz	Oberspannung	Unterspannung	Elastische Anfangsdehnung	Lastwechselzahl
	d [mm]	h [mm]	t [°C]	f [Hz]	σ_o [MPa]	σ_u [MPa]	$E_{el, anf}$ [‰]	N_{Makro} [-]
1	100	38	20	0,5	1,3	0,3	0,3520	198
2	100	38	20	0,5	1,3	0,3	0,3470	571
3	100	38	20	0,5	1,3	0,3	0,2968	1264





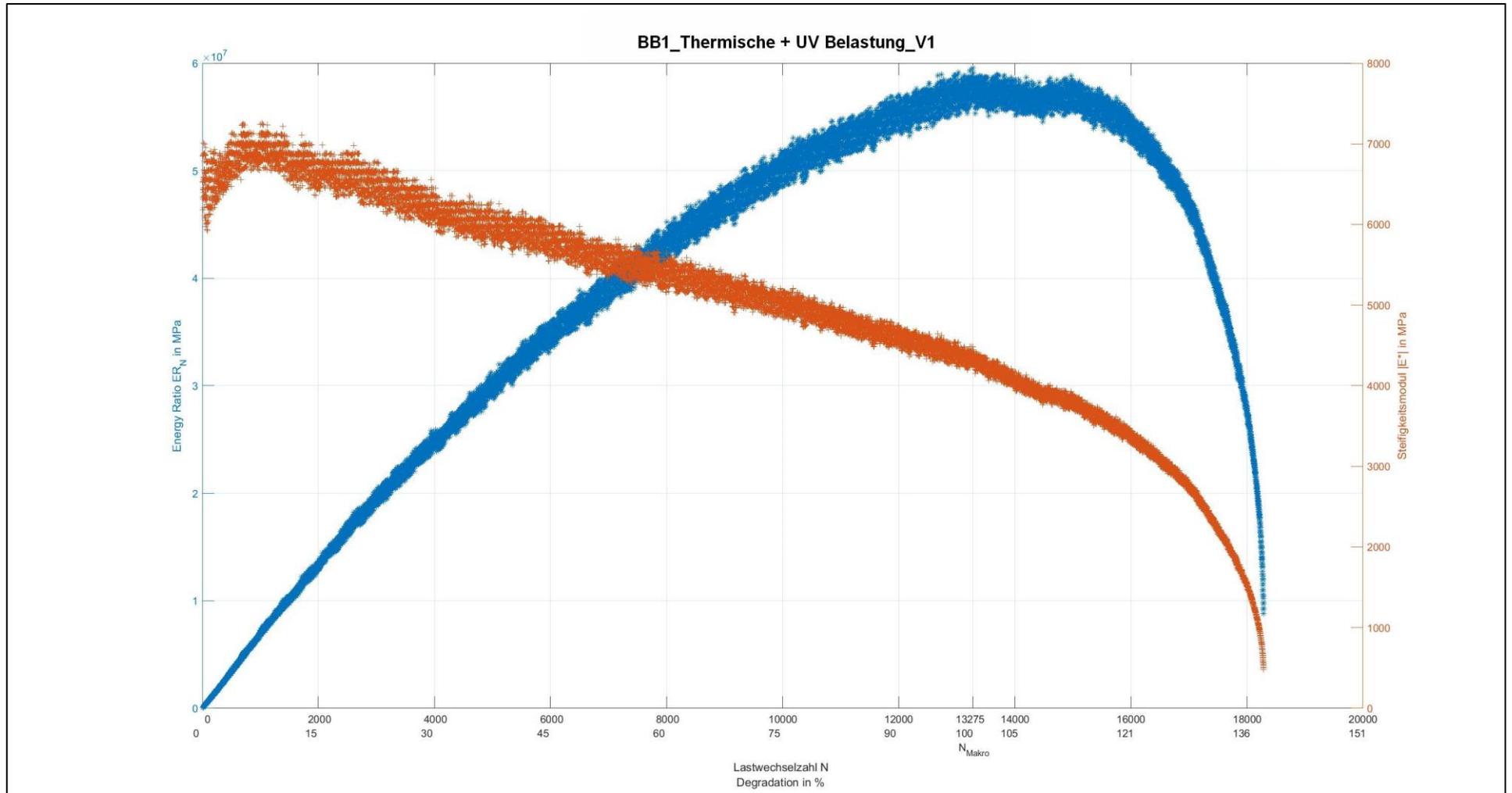


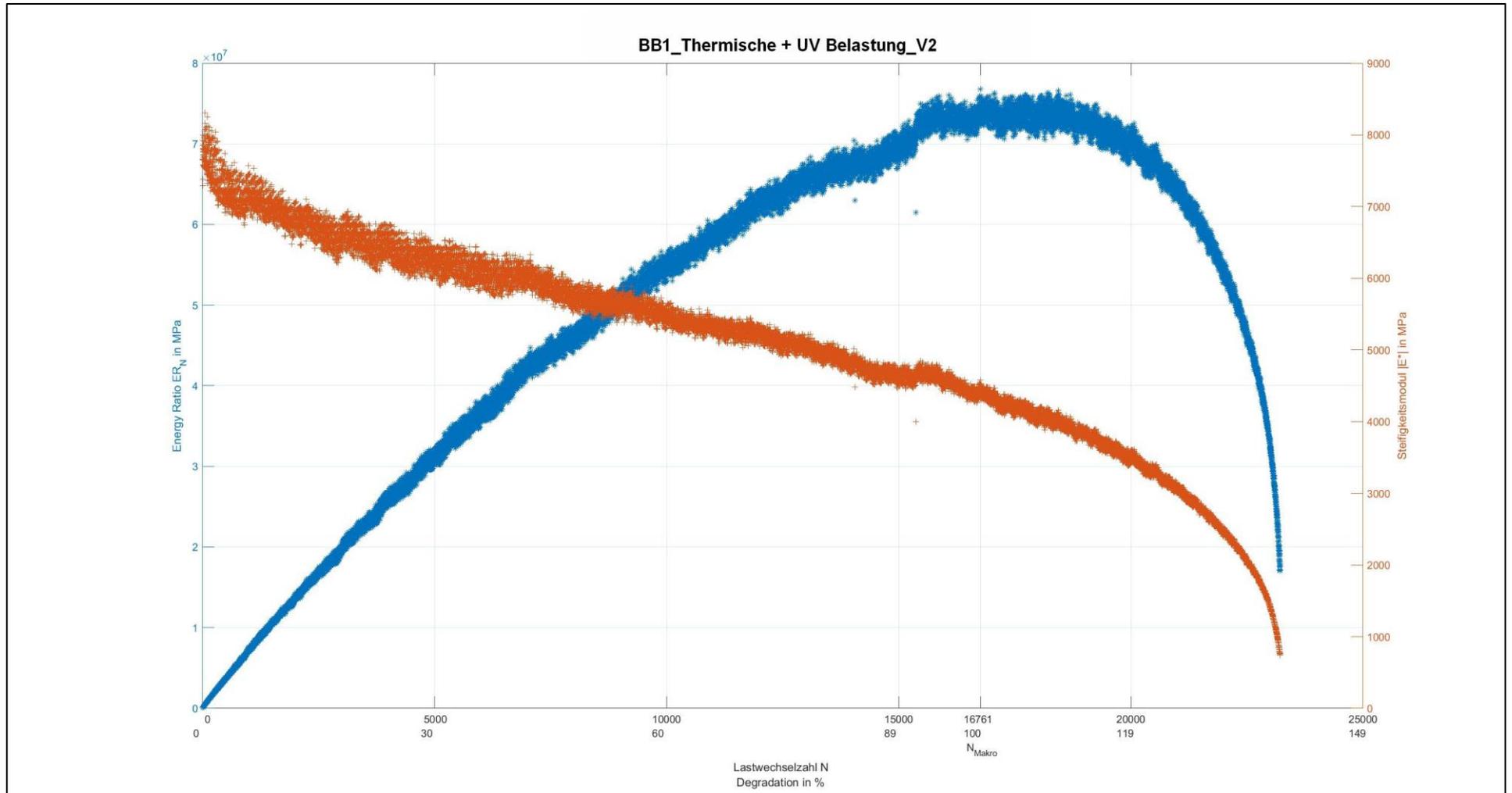
Anlage 4: Spaltzugschwellversuche nach thermischer Belastung und UV-Bestrahlung

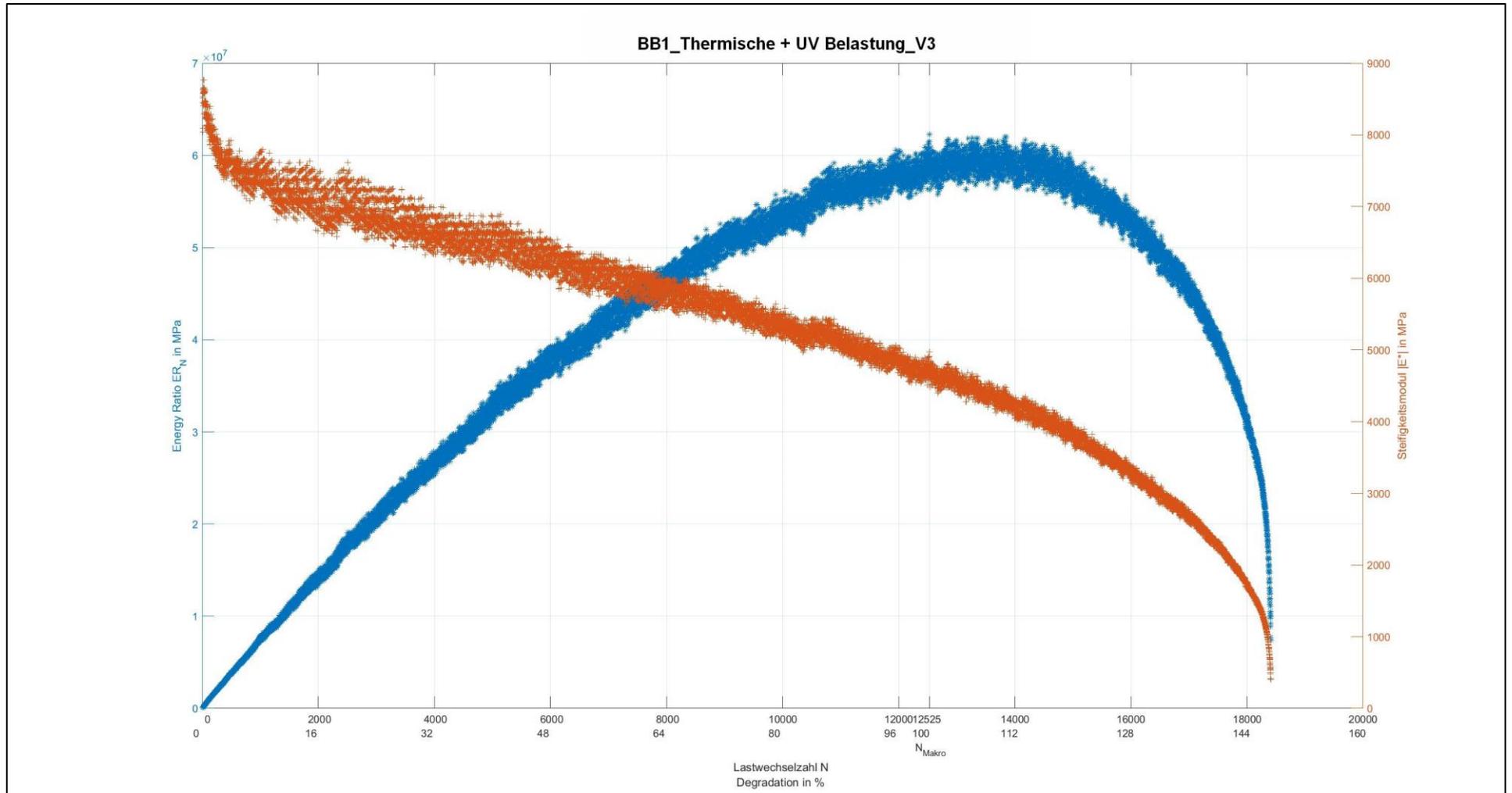
Anlage 4.1: Baustoffgemisch BB1

Tab. A.11: Ergebnisse zum Ermüdungsverhalten von BB1 nach Thermischer Belastung + UV-Bestrahlung

Probe- körperrn.	Durch- messer	Höhe	Tem- pera- tur	Fre- quenz	Ober- span- nung	Unter- span- nung	Elastische An- fangsdehnung	Lastwech- selzahl
	d	h	t	f	σ_o	σ_u	$E_{el, anf}$	N_{Makro}
	[mm]	[mm]	[°C]	[Hz]	[MPa]	[MPa]	[‰]	[-]
1	100	39	20	0,5	0,5	0,3	0,1312	13275
2	100	38	20	0,5	0,5	0,3	0,1125	16761
3	100	39	20	0,5	0,5	0,3	0,0996	12525



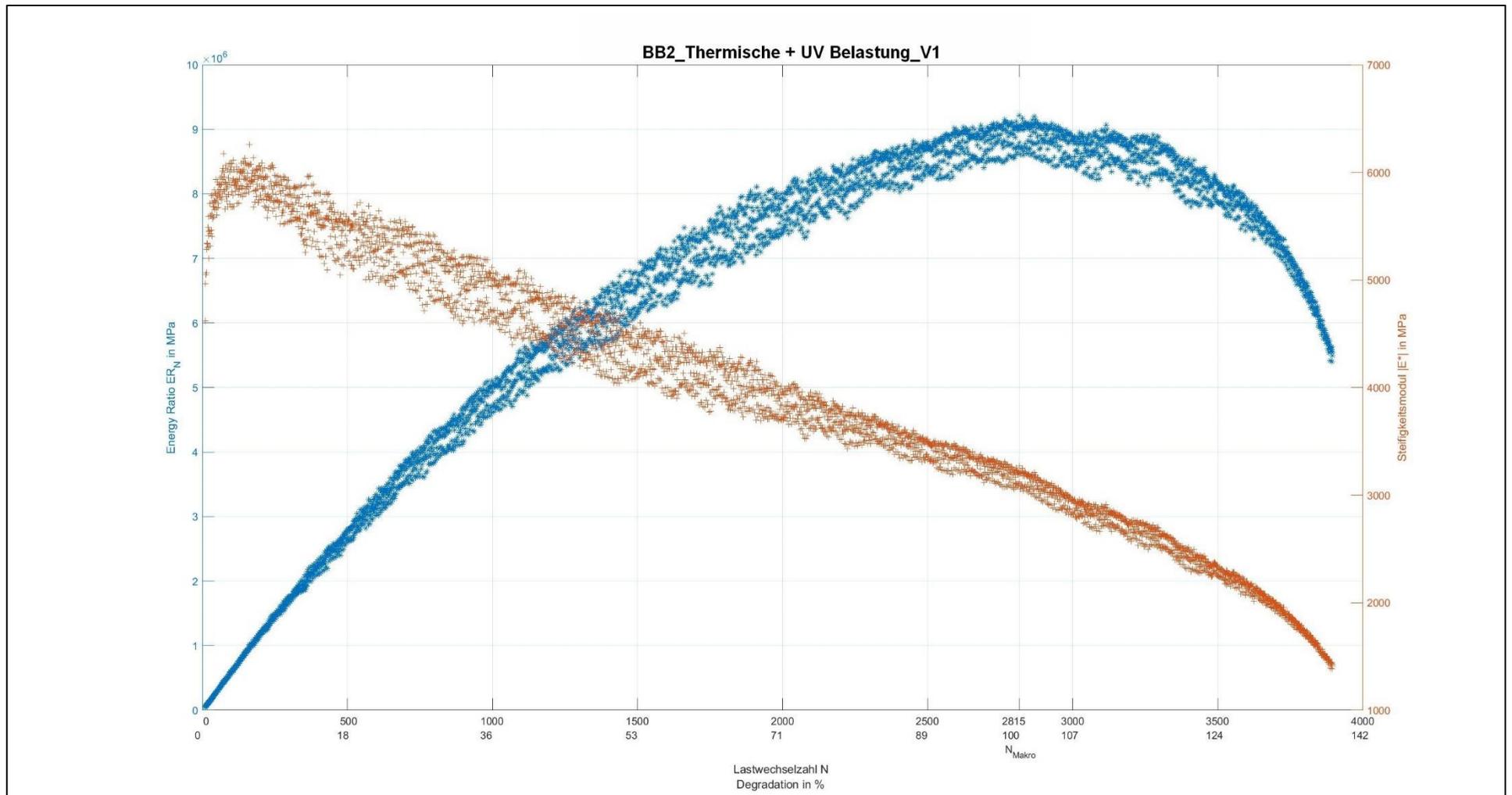


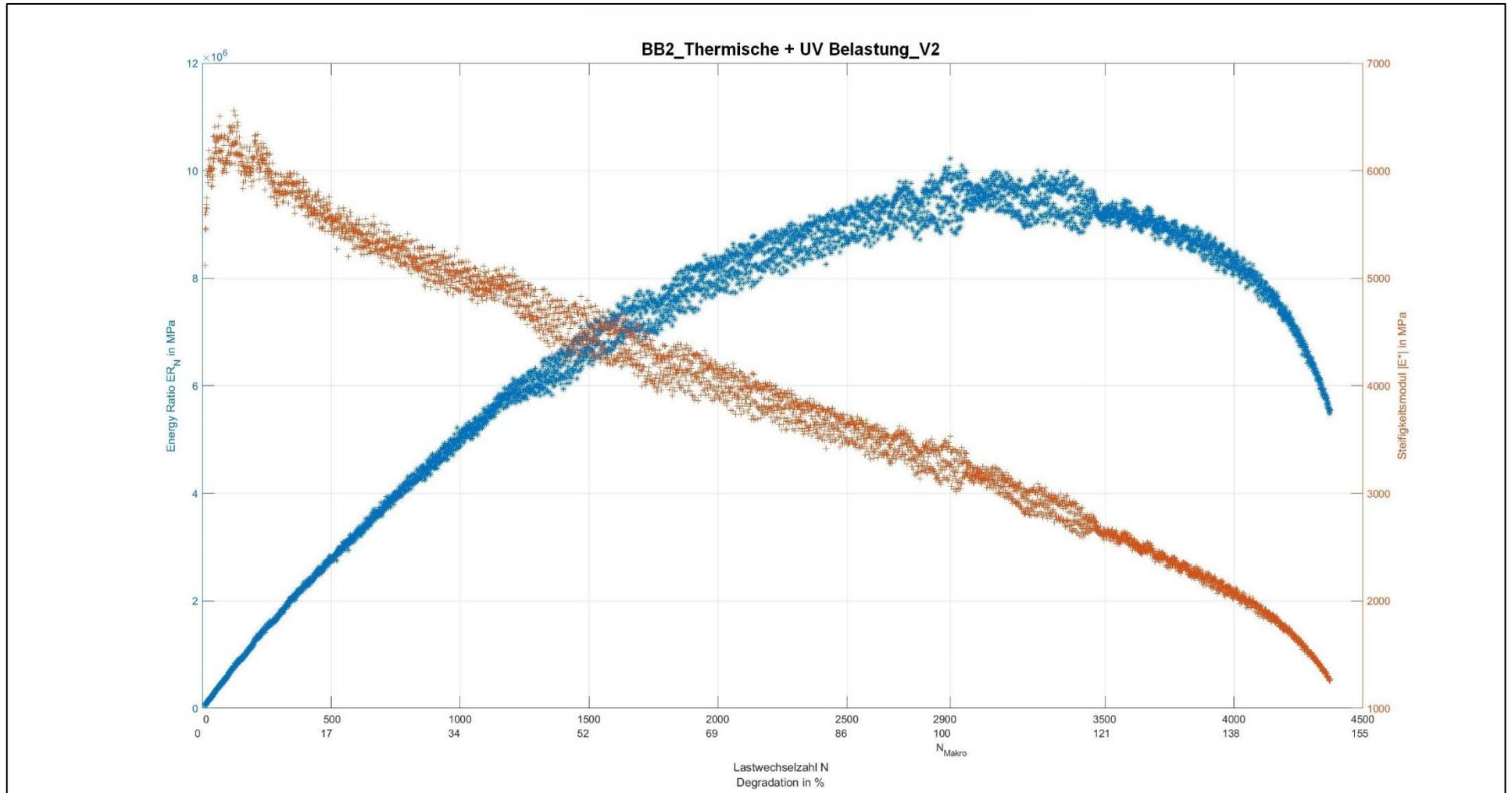


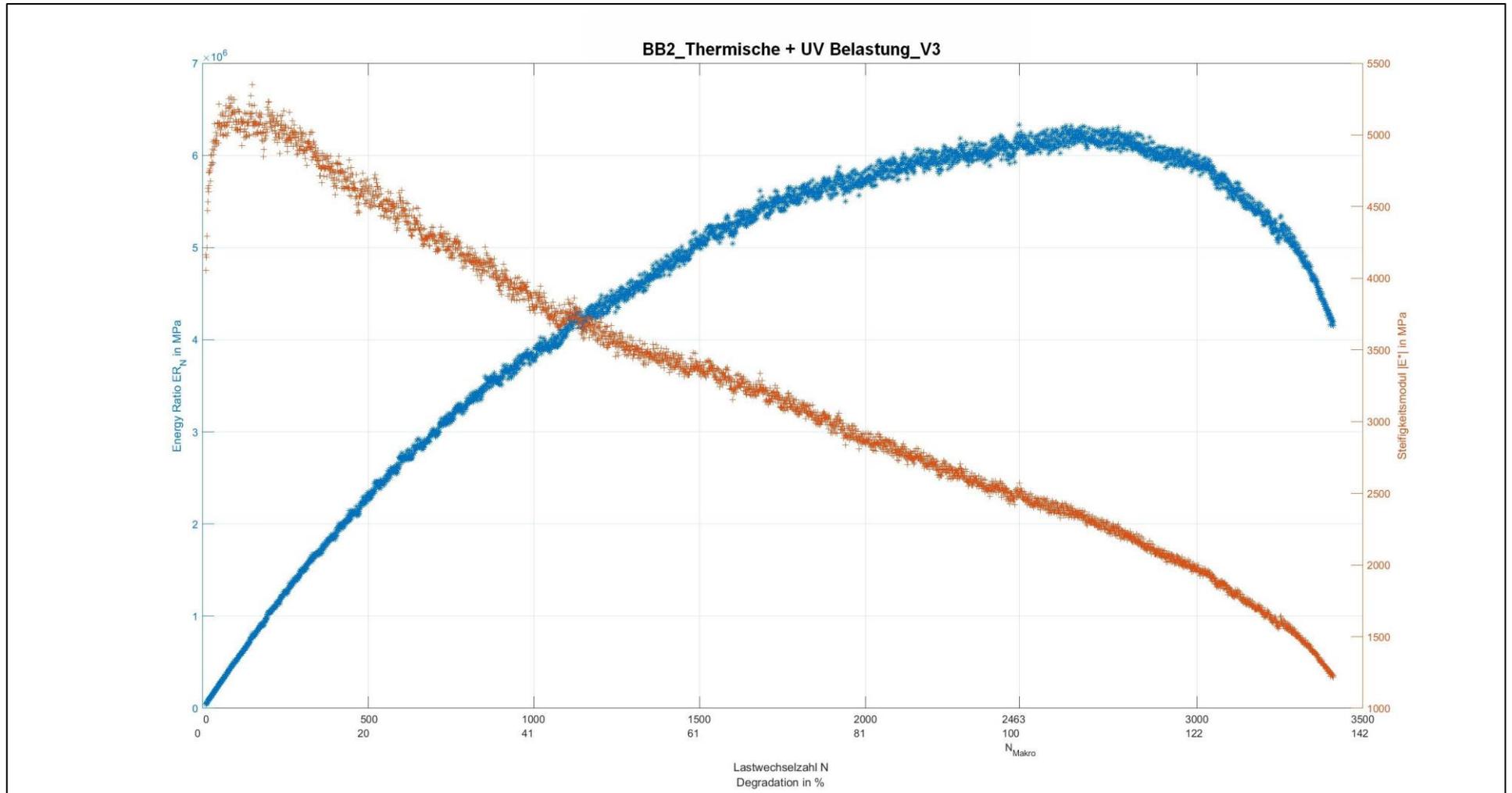
Anlage 4.2: Baustoffgemisch BB2

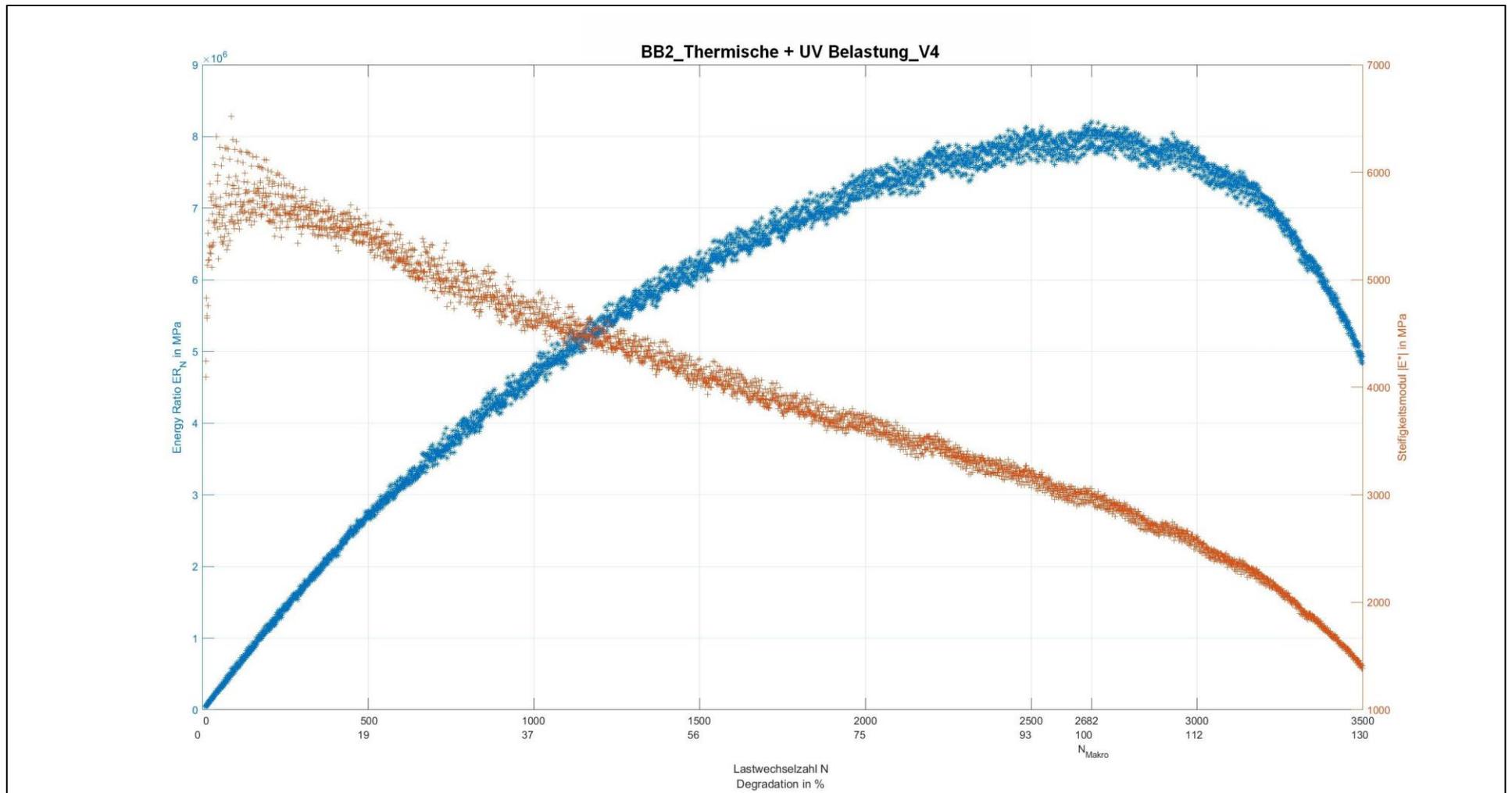
Tab. A.12: Ergebnisse zum Ermüdungsverhalten von BB1 nach Thermischer Belastung + UV-Bestrahlung

Probekörpernr.	Durchmesser d [mm]	Höhe h [mm]	Temperatur t [°C]	Frequenz f [Hz]	Oberspannung σ_o [MPa]	Unterspannung σ_u [MPa]	Elastische Anfangsdehnung $E_{el, anf}$ [‰]	Lastwechselzahl N_{Makro} [-]
1	100	39	20	0,5	0,4	0,3	0,1498	2815
2	100	40	20	0,5	0,4	0,3	0,1367	2900
3	100	41	20	0,5	0,4	0,3	0,1731	2463
4	100	39	20	0,5	0,4	0,3	0,1685	2682





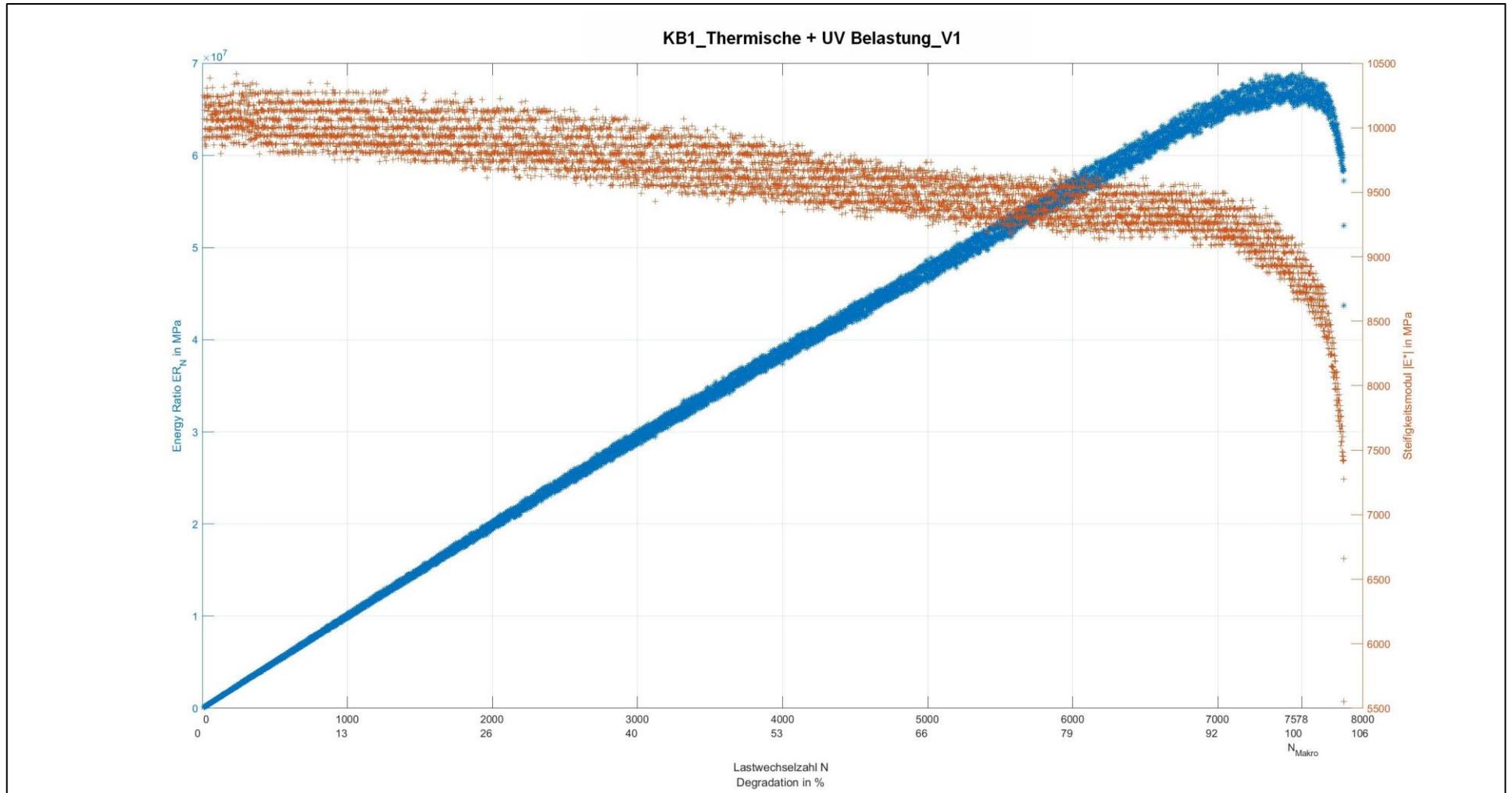


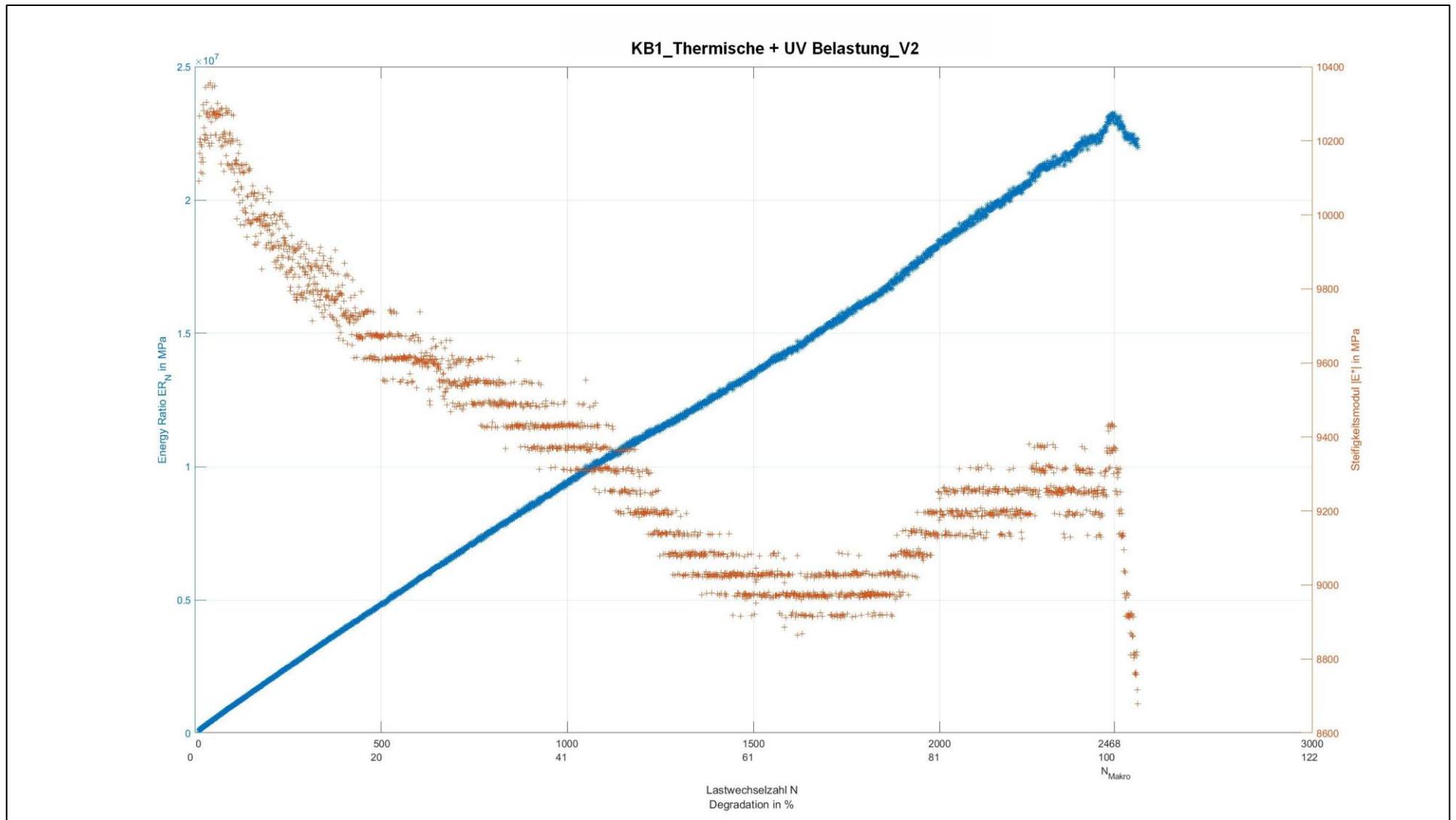


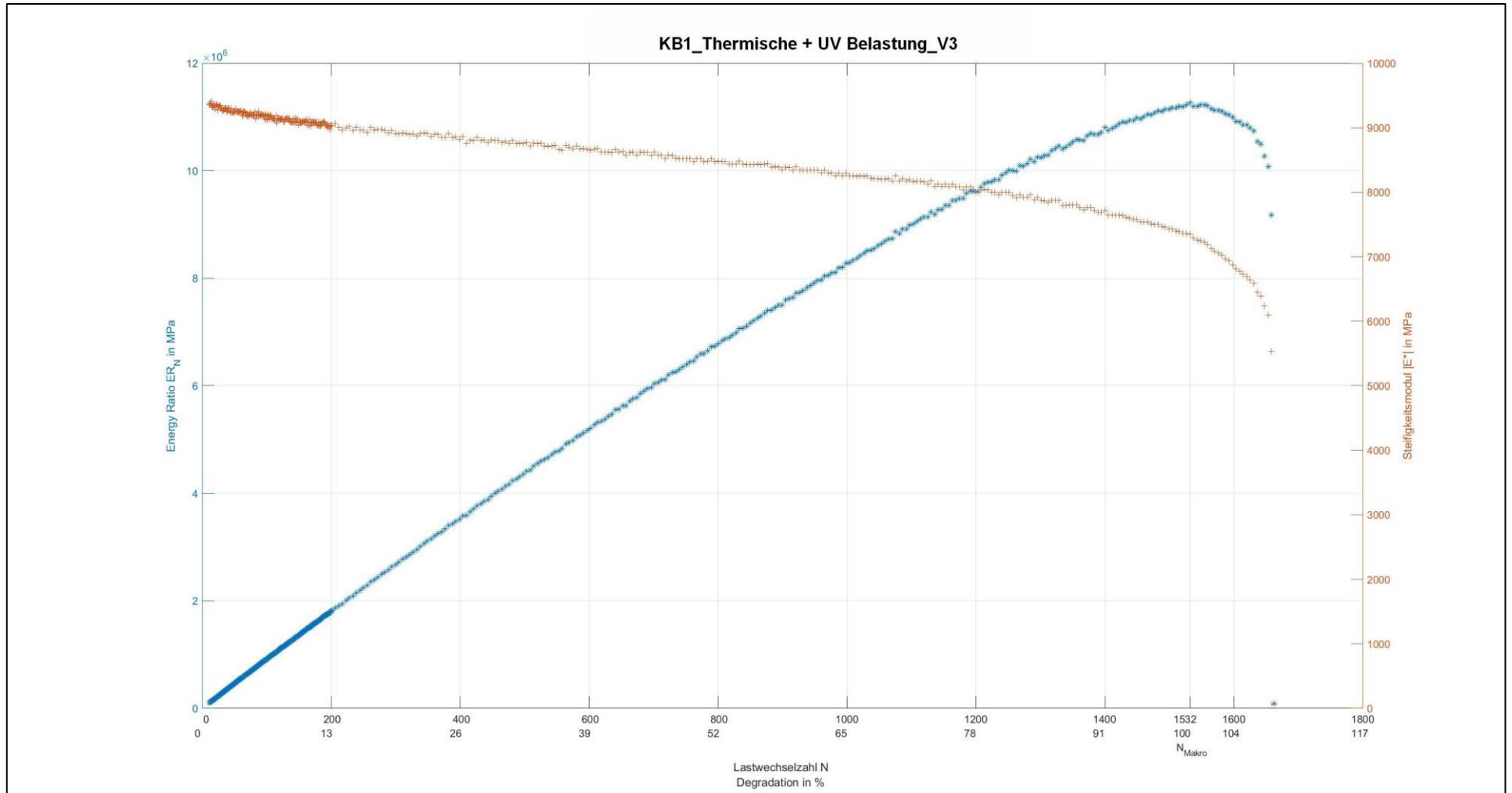
Anlage 4.3: Baustoffgemisch KB1

Tab. A.13: Ergebnisse zum Ermüdungsverhalten von KB1 nach Thermischer Belastung + UV-Bestrahlung

Probekörpernr.	Durchmesser d [mm]	Höhe h [mm]	Temperatur t [°C]	Frequenz f [Hz]	Oberspannung σ_o [MPa]	Unterspannung σ_u [MPa]	Elastische Anfangsdehnung $E_{el,anf}$ [‰]	Lastwechselzahl N_{Makro} [-]
1	100	39	20	0,5	1,7	0,3	0,3043	7580
2	100	39	20	0,5	1,7	0,3	0,3045	2468
3	100	40	20	0,5	1,7	0,3	0,3486	1532



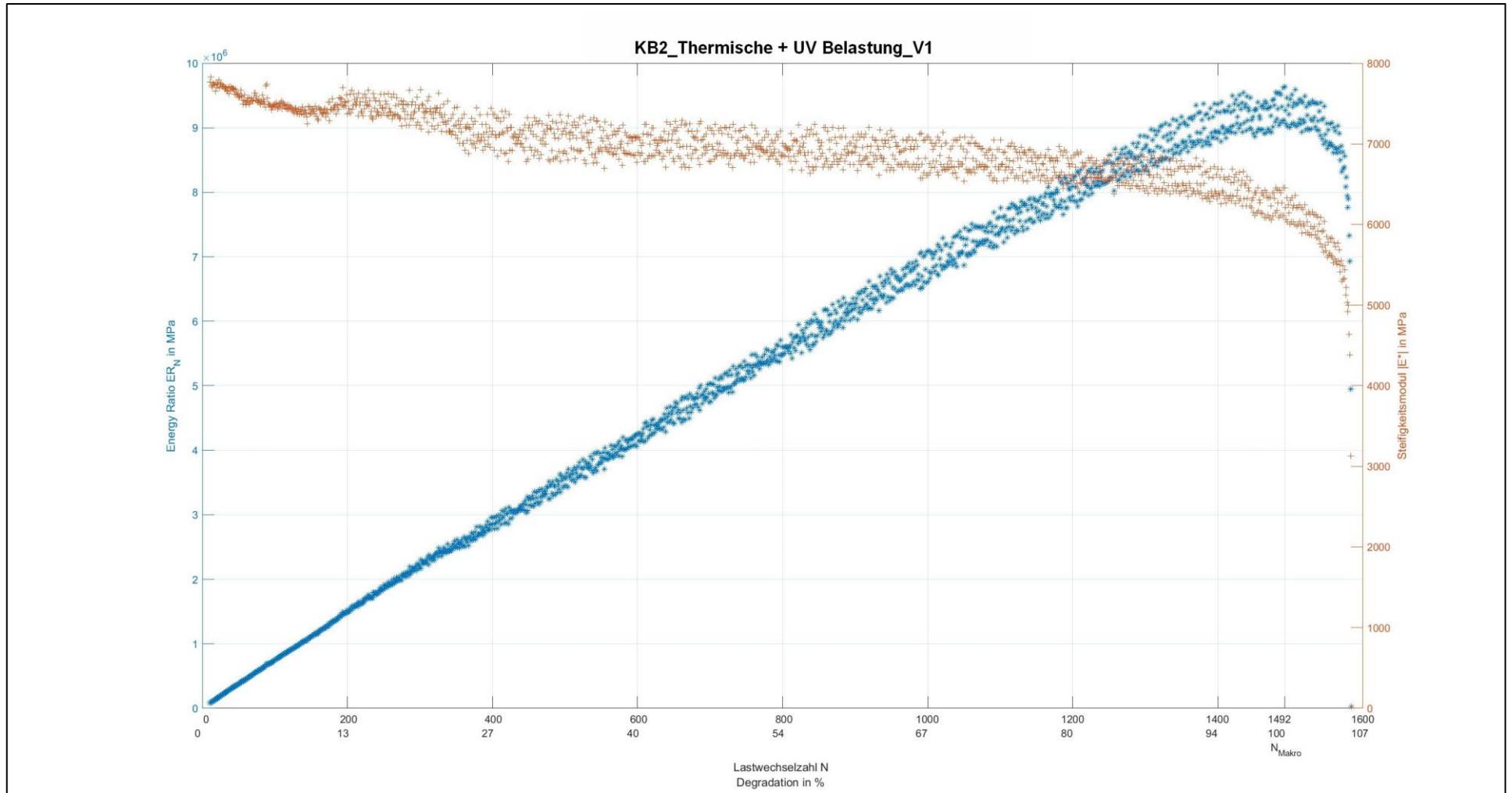


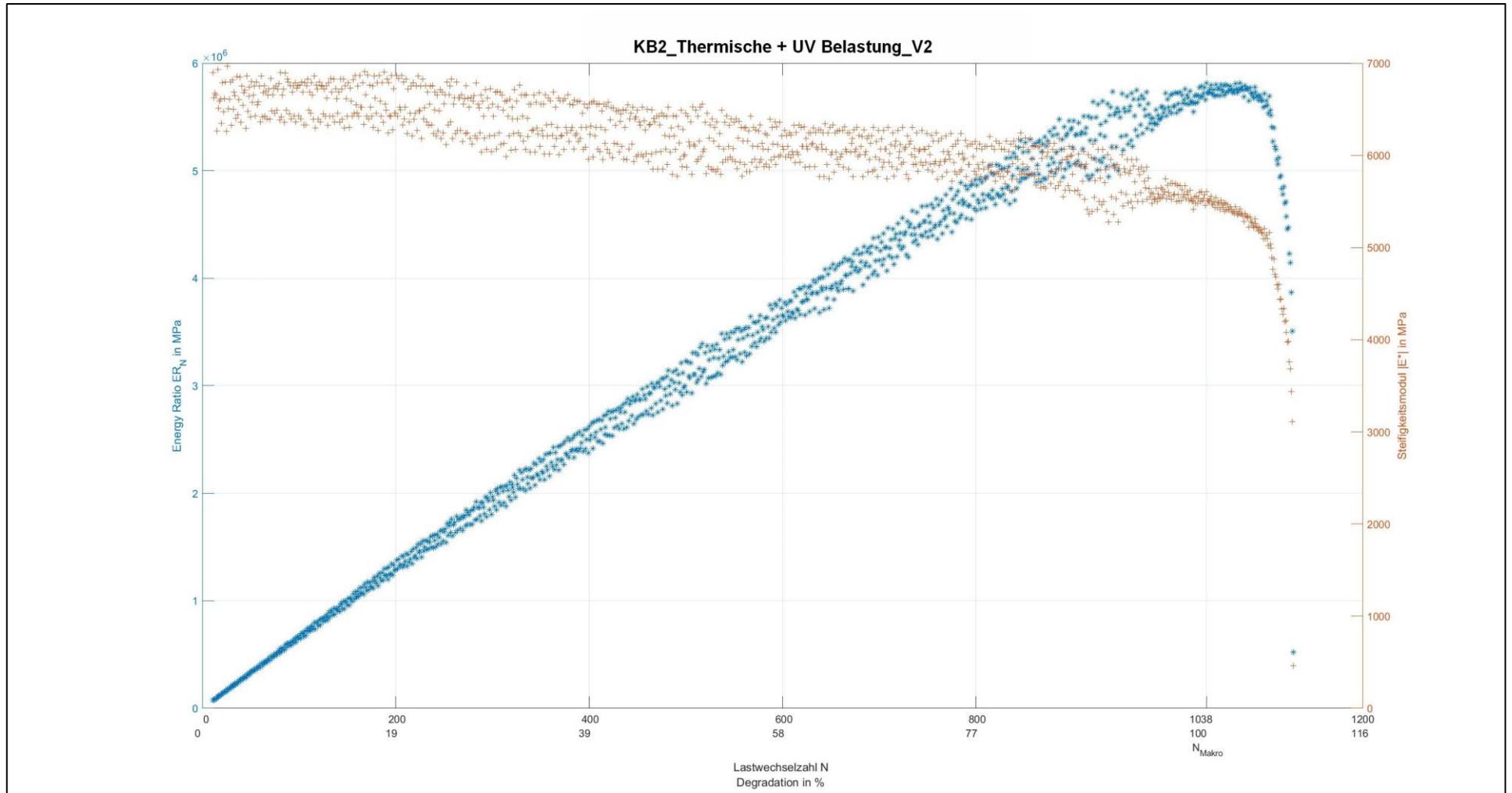


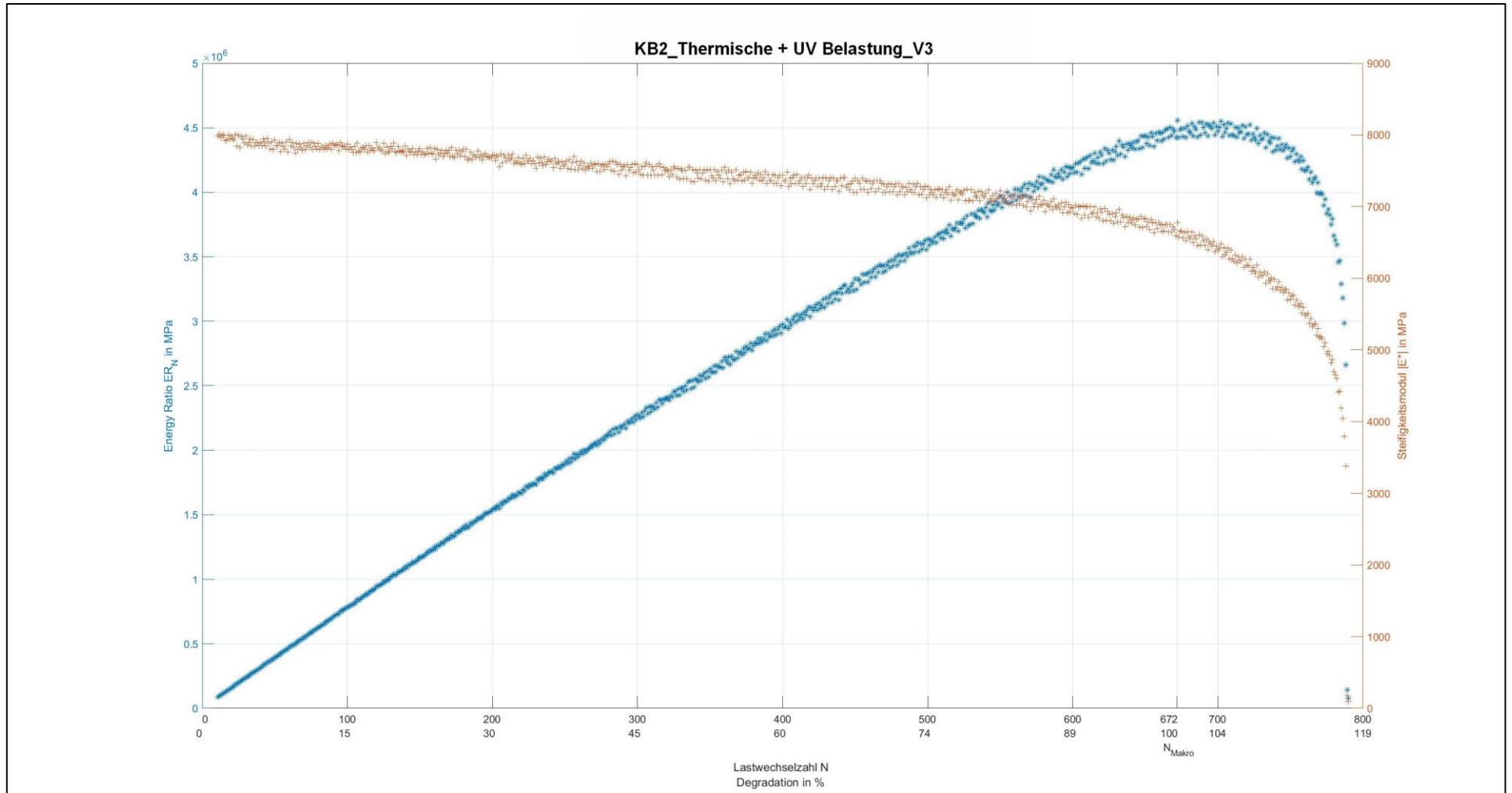
Anlage 4.4: Baustoffgemisch KB2

Tab. A.14: Ergebnisse zum Ermüdungsverhalten von KB2 nach Thermischer Belastung + UV-Bestrahlung

Probe- körpernr.	Durch- messer d [mm]	Höhe h [mm]	Tem- pera- tur t [°C]	Fre- quenz f [Hz]	Ober- span- nung σ_o [MPa]	Unter- span- nung σ_u [MPa]	Elastische An- fangsdehnung $E_{el, anf}$ [‰]	Lastwech- selzahl N_{Makro} [-]
1	100	40	20	0,5	1,5	0,3	0,3502	1492
2	100	40	20	0,5	1,5	0,3	0,4019	1038
3	100	41	20	0,5	1,5	0,3	0,3401	672



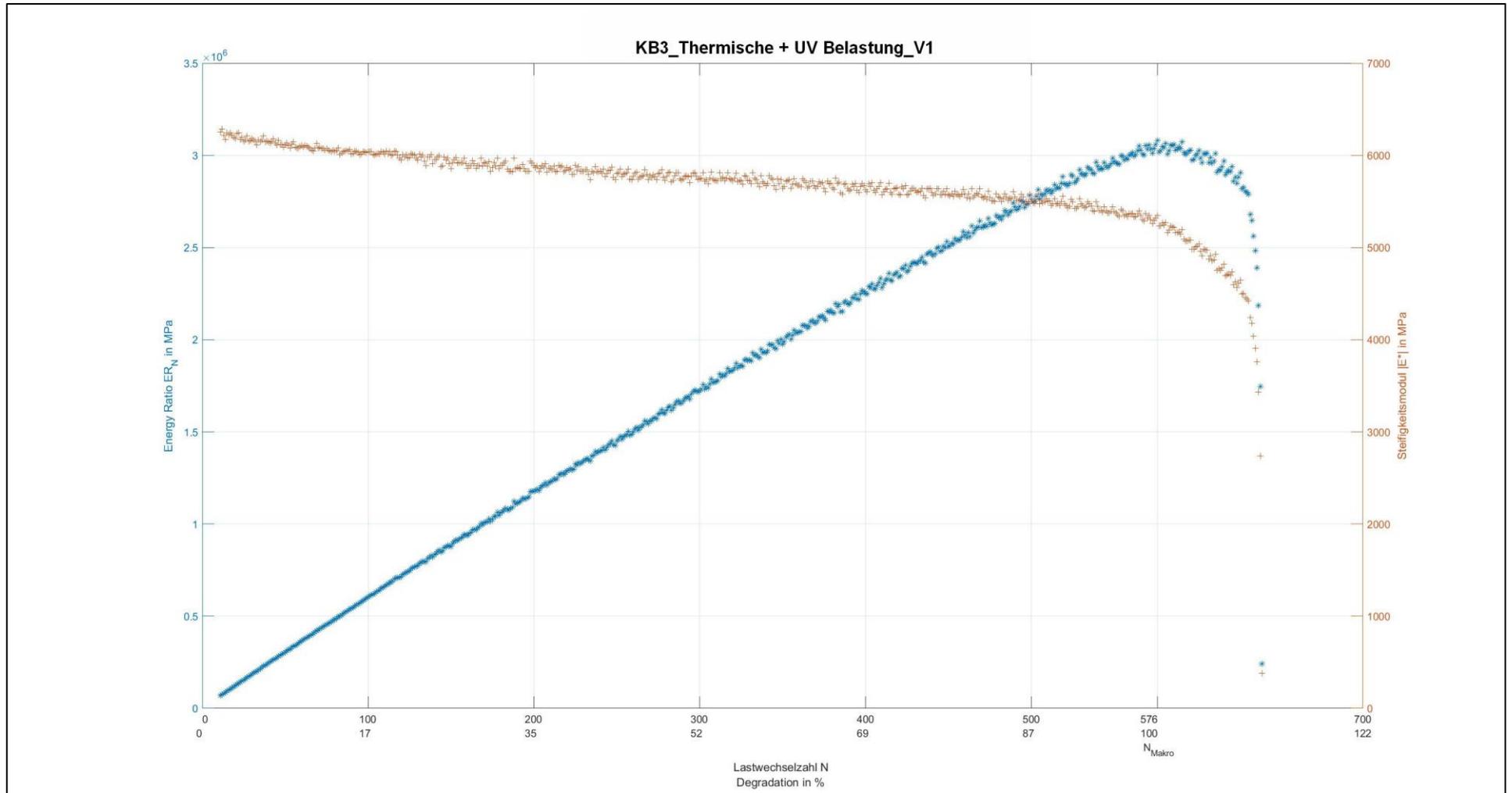


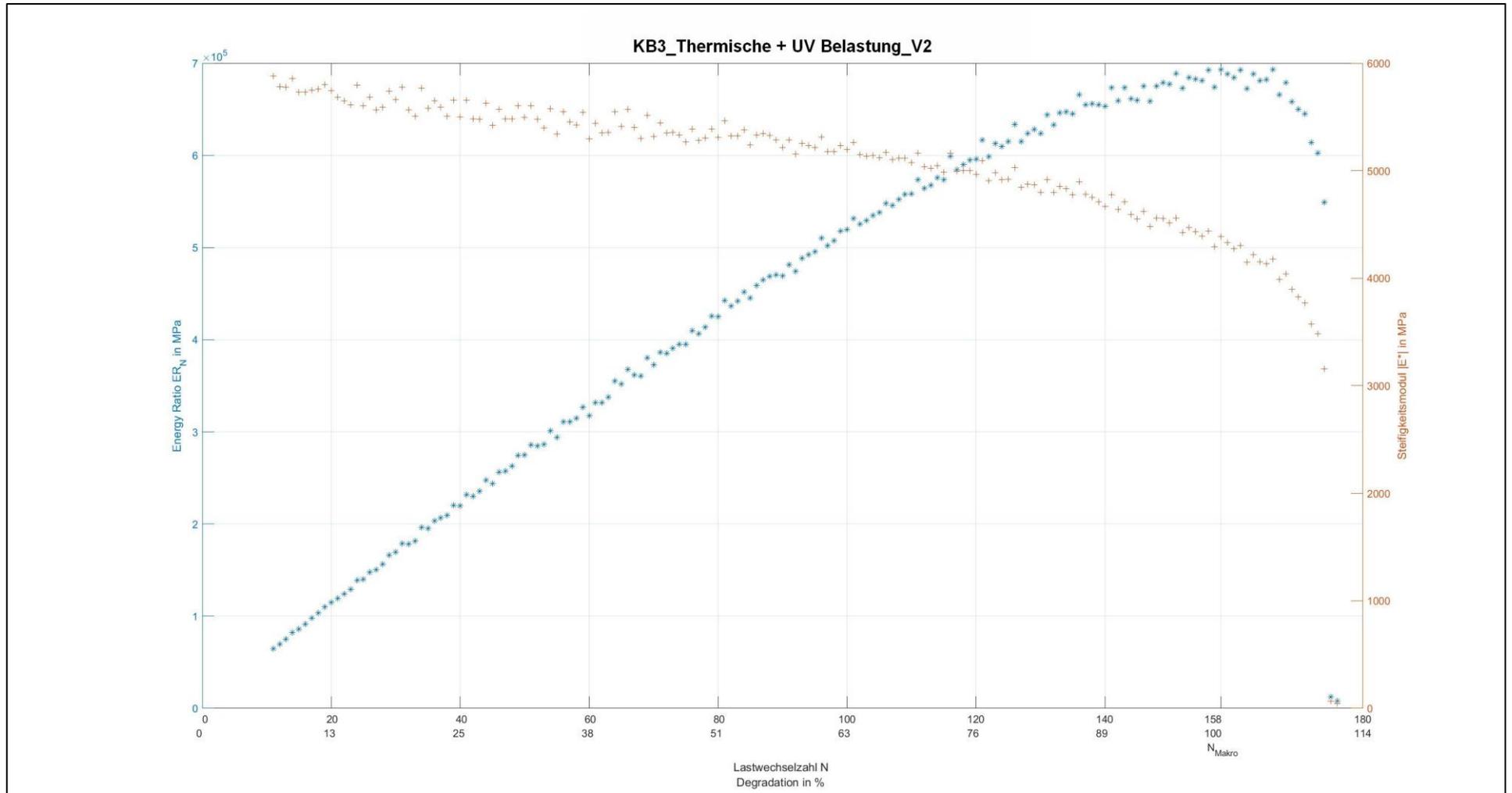


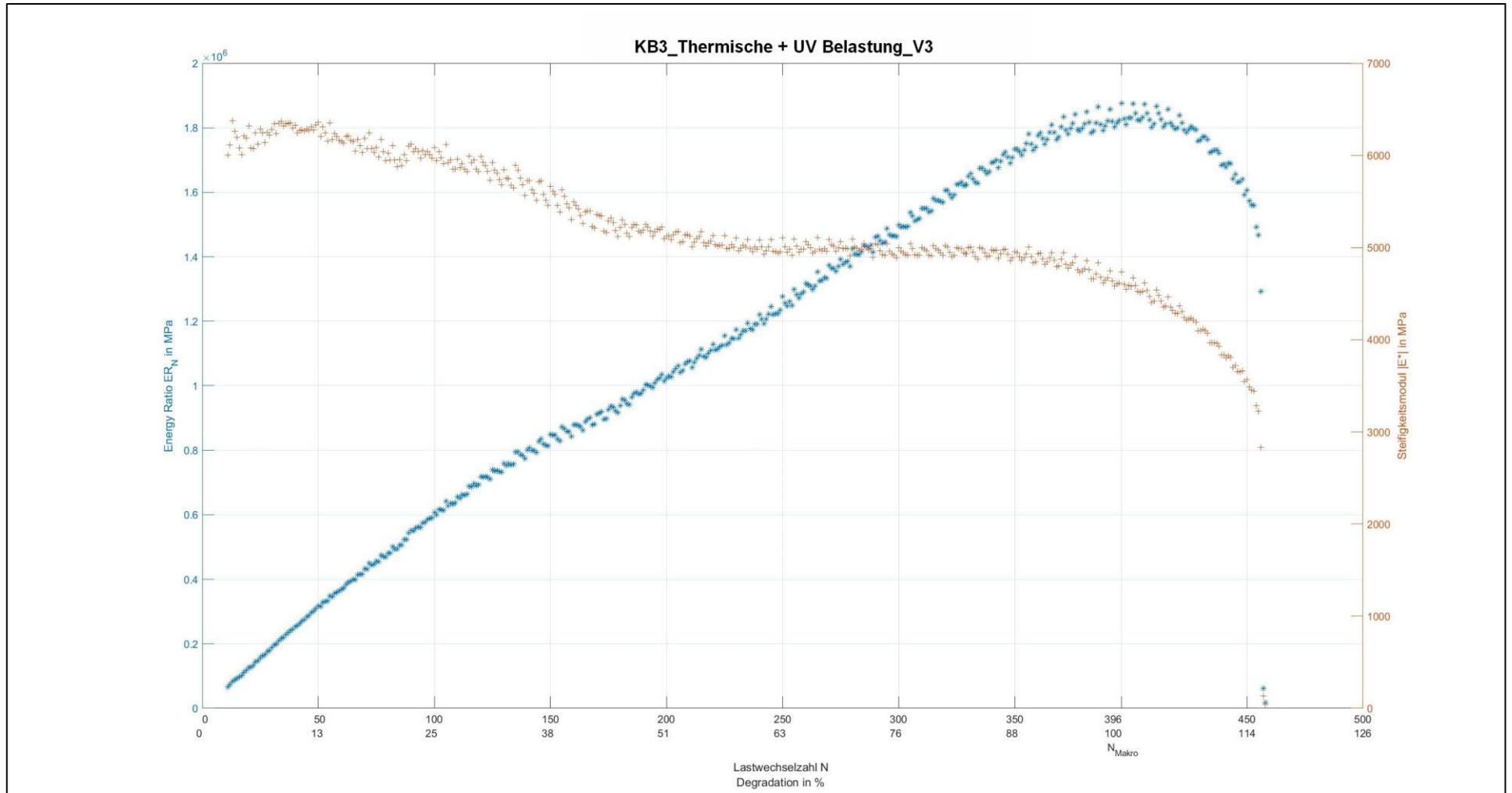
Anlage 4.5: Baustoffgemisch KB3

Tab. A.15: Ergebnisse zum Ermüdungsverhalten von KB3 nach Thermischer Belastung + UV-Bestrahlung

Probe- körperrn.	Durch- messer	Höhe	Tem- pera- tur	Fre- quenz	Ober- span- nung	Unter- span- nung	Elastische An- fangsdehnung	Lastwech- selzahl
	d [mm]	h [mm]	t [°C]	f [Hz]	σ_o [MPa]	σ_u [MPa]	$E_{el, anf}$ [‰]	N_{Makro} [-]
1	100	40	20	0,5	1,3	0,3	0,3761	576
2	100	39	20	0,5	1,3	0,3	0,4050	158
3	100	39	20	0,5	1,3	0,3	0,3718	396





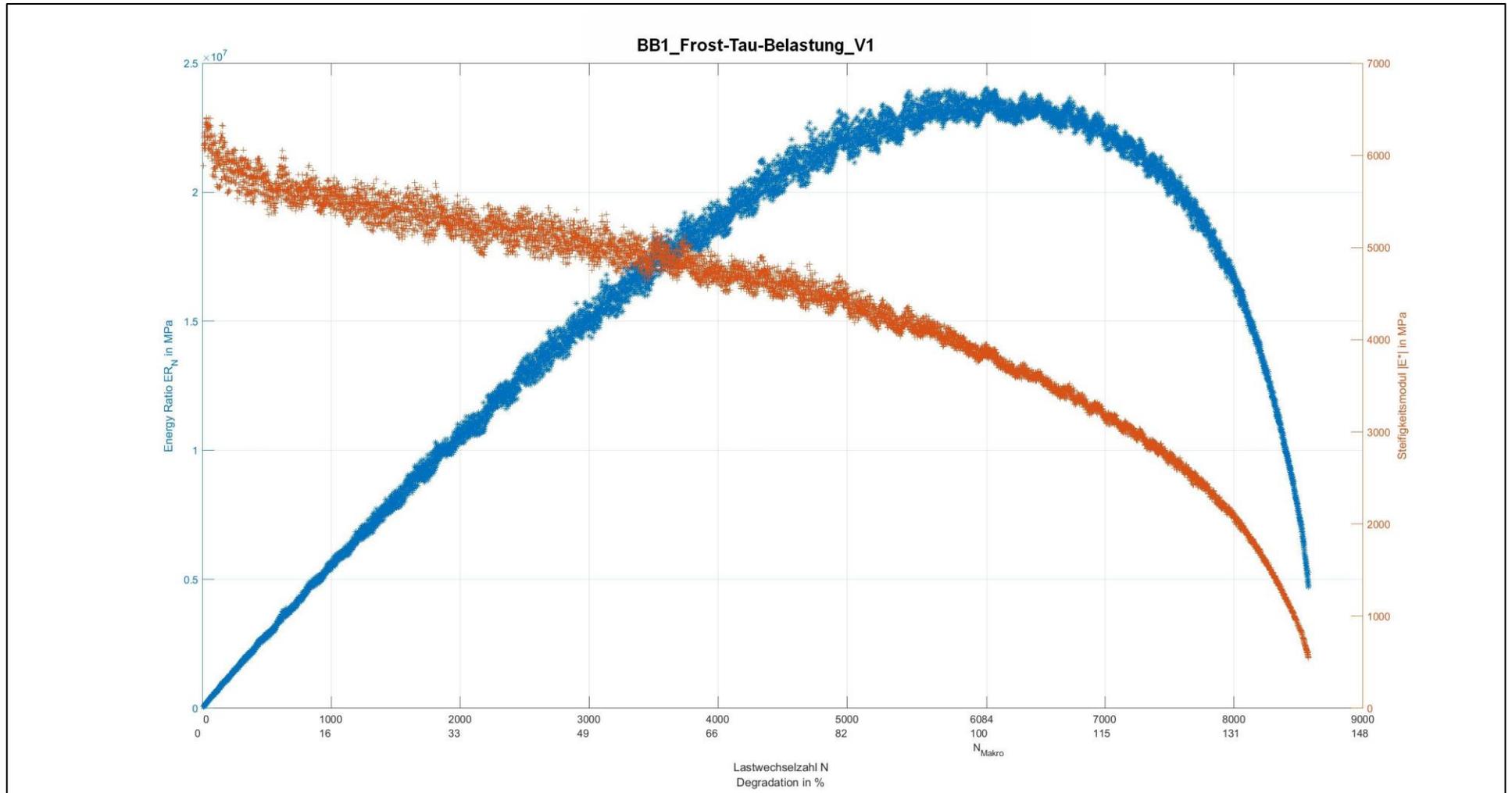


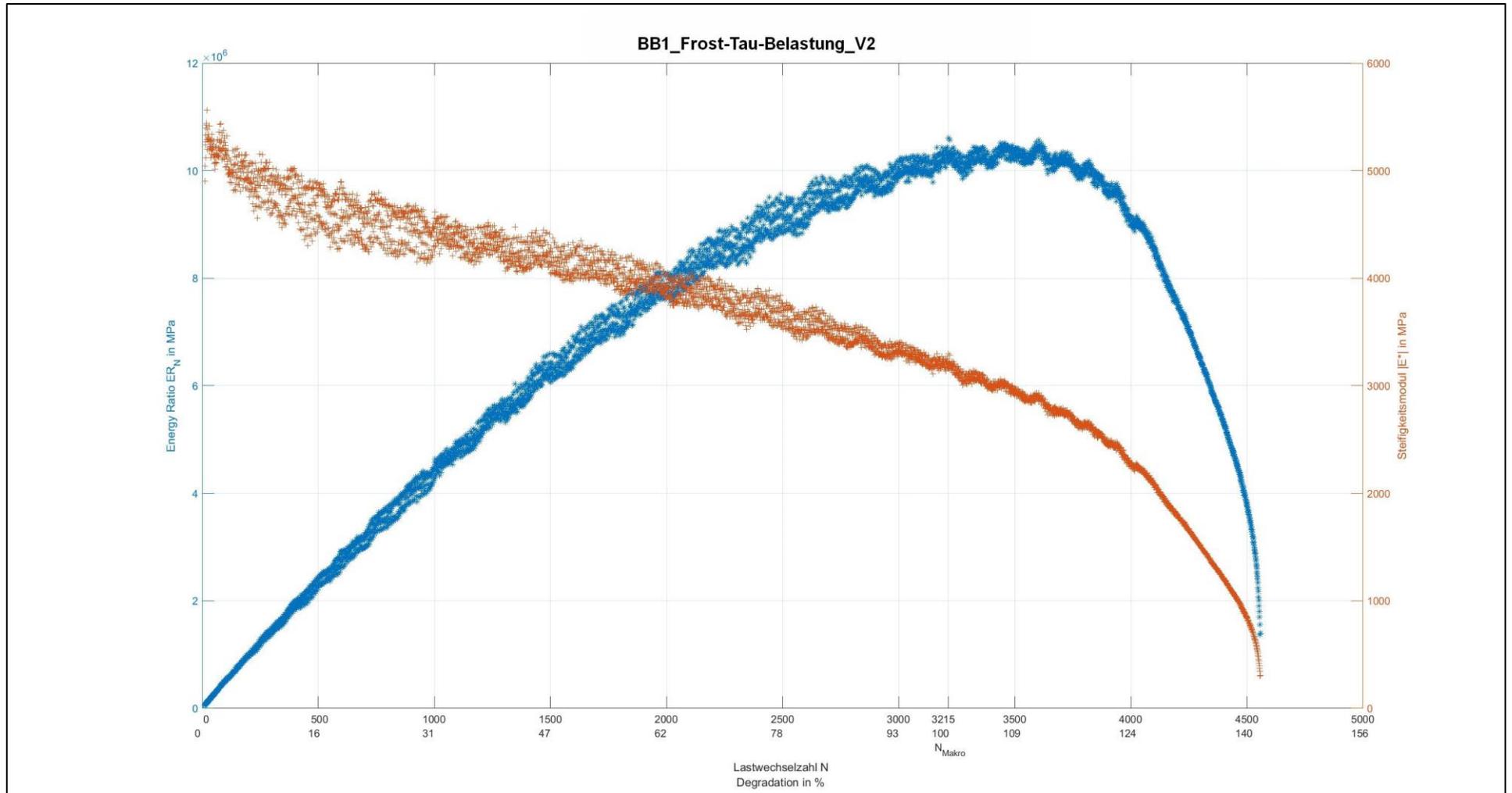
Anlage 5: Spaltzugschwellversuche nach Frost-Tau-Wechsel-Belastung

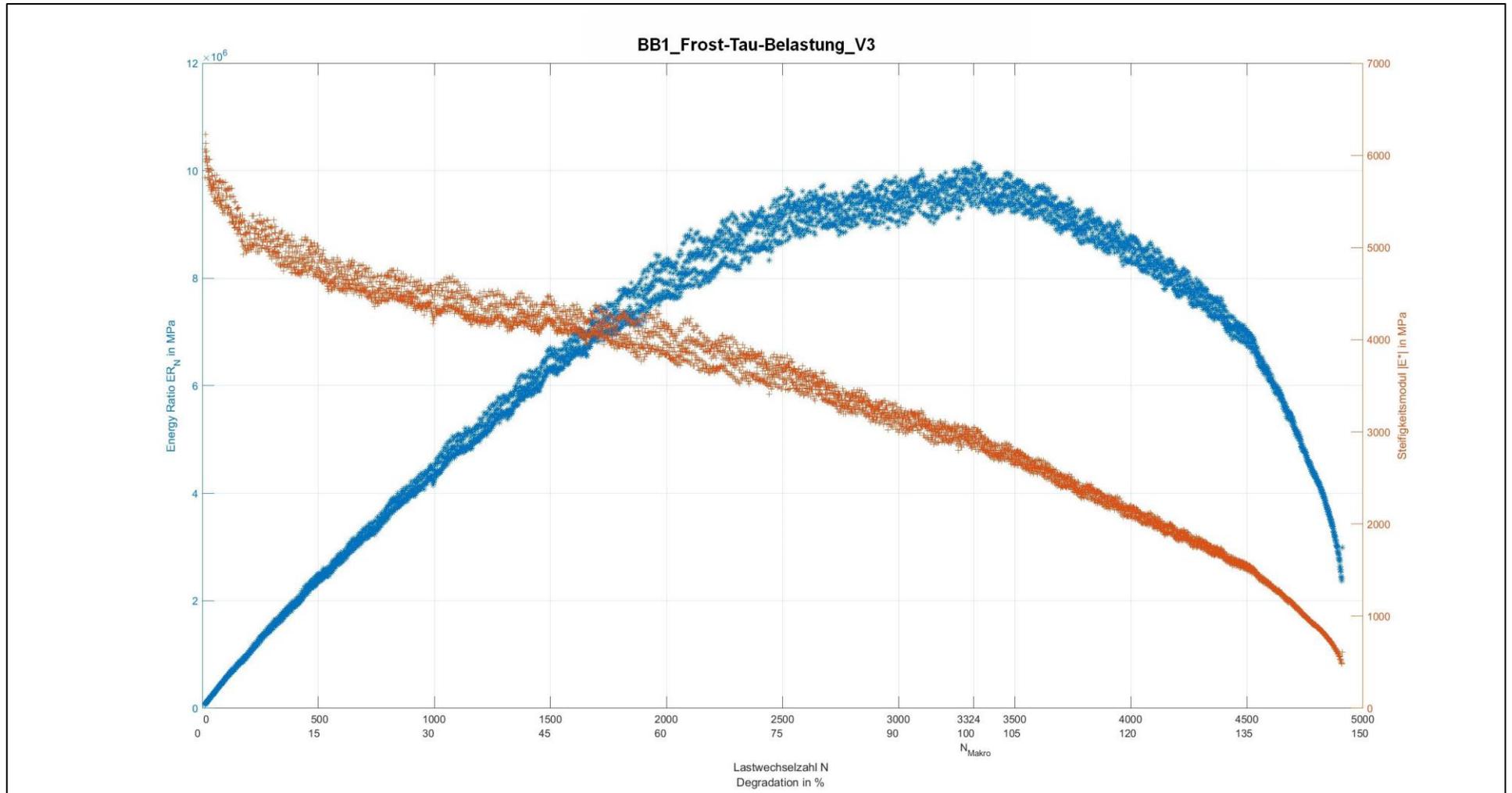
Anlage 5.1: Baustoffgemisch BB1

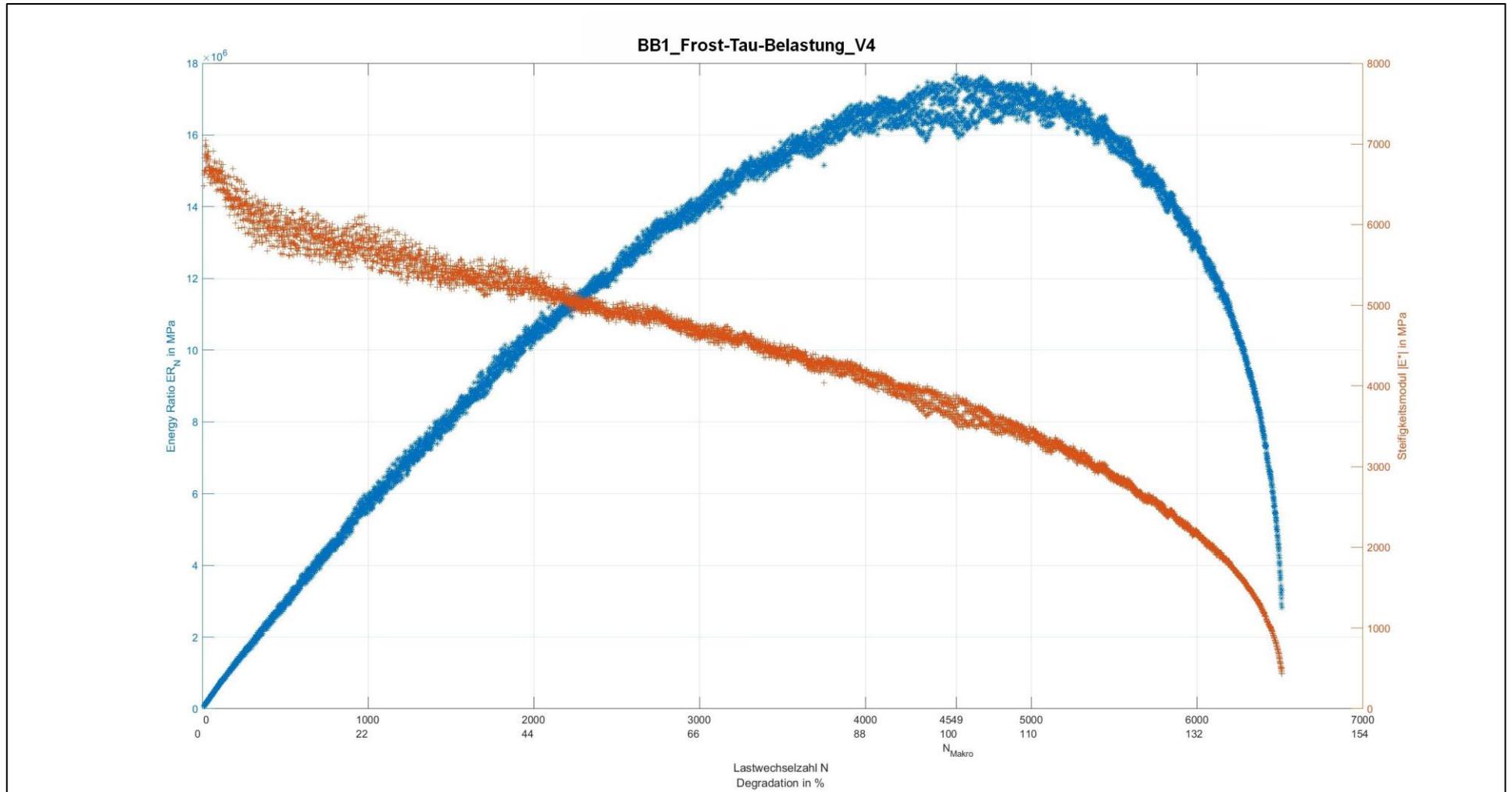
Tab. A.16: Ergebnisse zum Ermüdungsverhalten von BB1 nach Frost-Tau-Belastung

Probekörpernr.	Durchmesser	Höhe	Temperatur	Frequenz	Oberspannung	Unterspannung	Elastische Anfangsdehnung	Lastwechselzahl
	d [mm]	h [mm]	t [°C]	f [Hz]	σ_o [MPa]	σ_u [MPa]	$E_{el, anf}$ [‰]	N_{Makro} [-]
1	100	38	20	0,5	0,5	0,3	0,1381	6084
2	100	38	20	0,5	0,5	0,3	0,1584	3215
3	100	37	20	0,5	0,5	0,3	0,1403	3324
4	100	38	20	0,5	0,5	0,3	0,1234	4549





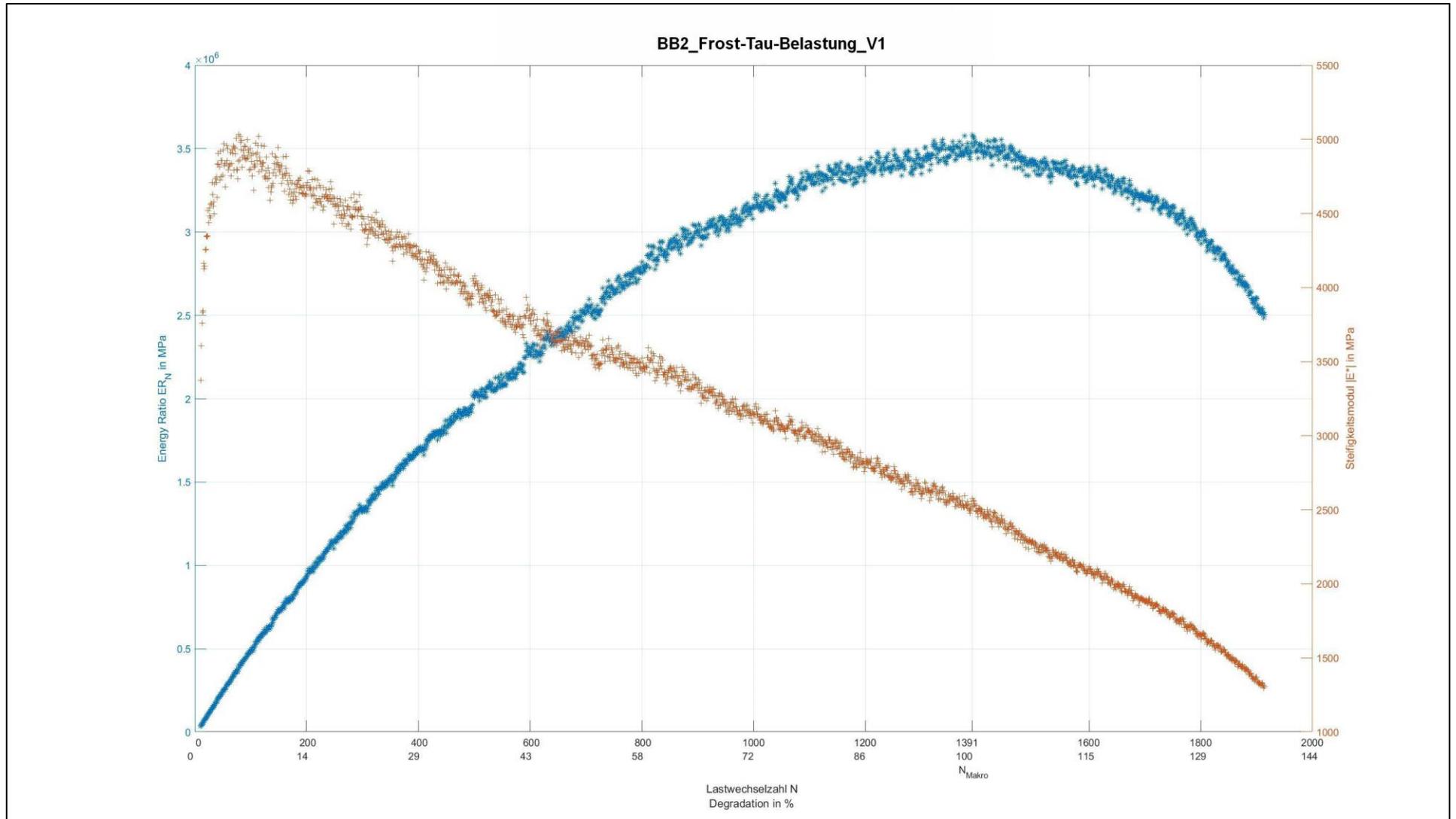


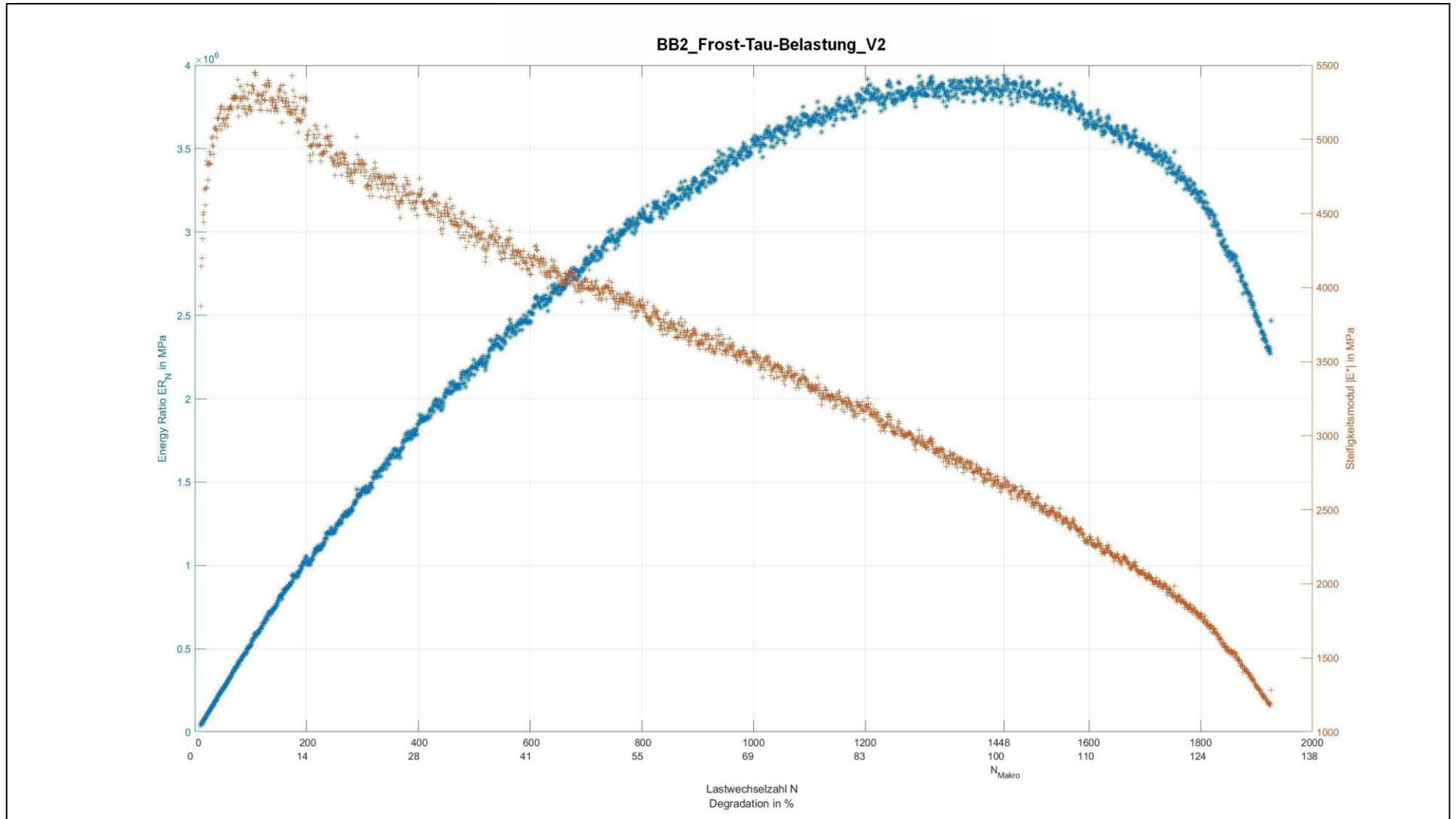


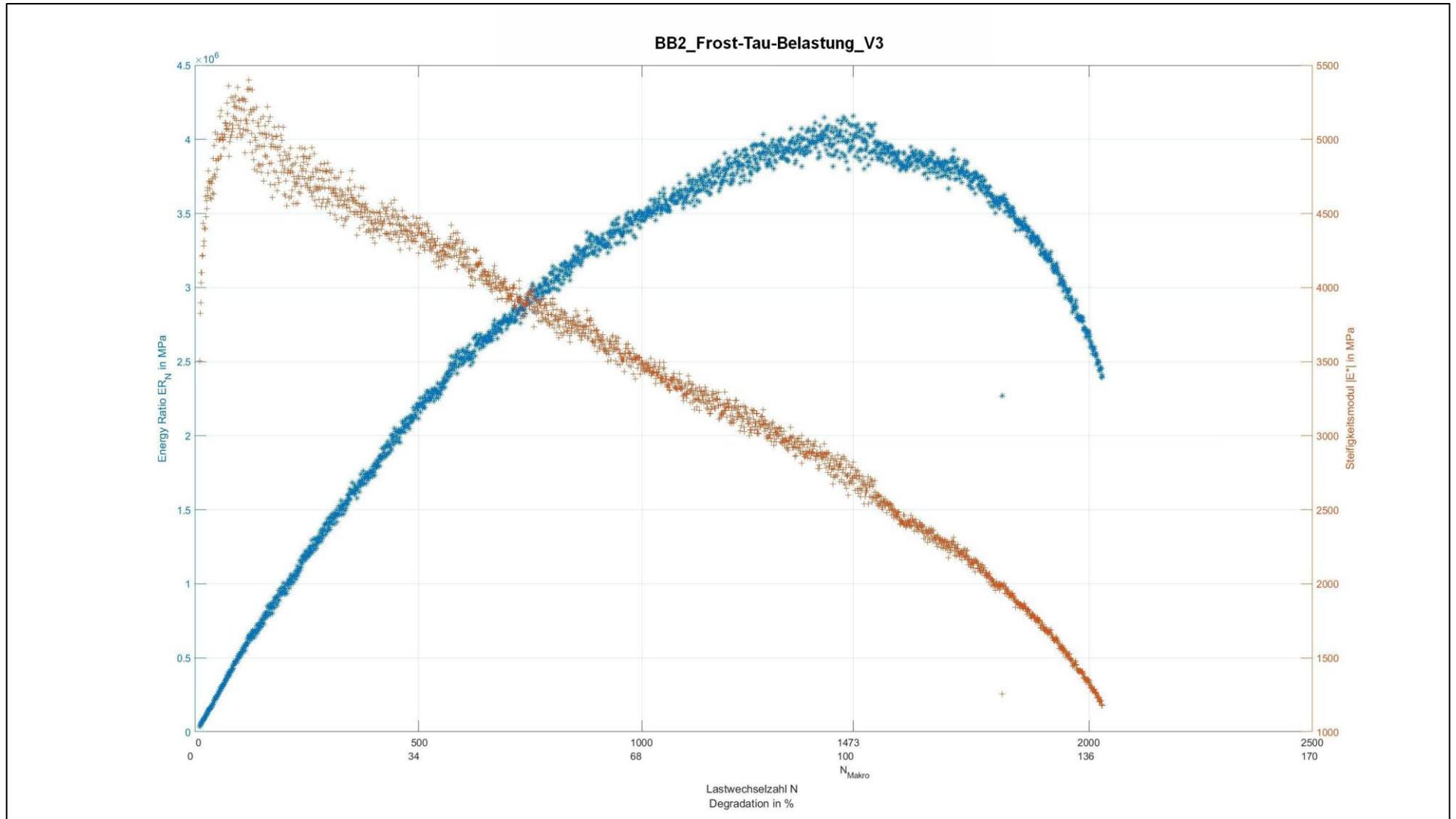
Anlage 5.2: Baustoffgemisch BB2

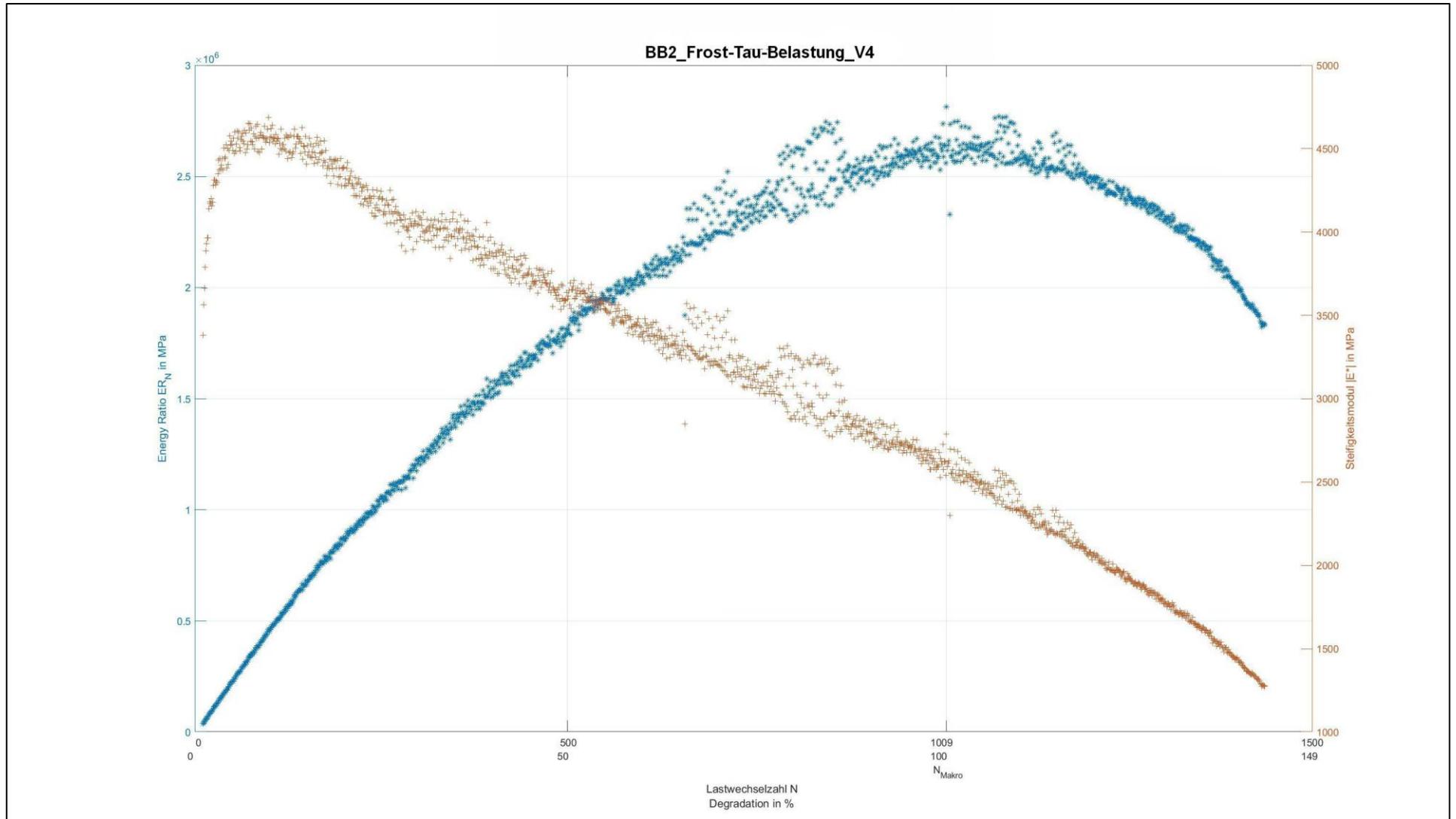
Tab. A.17: Ergebnisse zum Ermüdungsverhalten von BB2 nach Frost-Tau-Belastung

Probekörpernr.	Durchmesser d [mm]	Höhe h [mm]	Temperatur t [°C]	Frequenz f [Hz]	Oberspannung σ_o [MPa]	Unterspannung σ_u [MPa]	Elastische Anfangsdehnung $E_{el, anf}$ [‰]	Lastwechselzahl N_{Makro} [-]
1	100	39	20	0,5	0,5	0,3	0,1876	1391
2	100	39	20	0,5	0,5	0,3	0,1755	1448
3	100	39	20	0,5	0,5	0,3	0,1862	1473
4	100	40	20	0,5	0,5	0,3	0,1959	1009





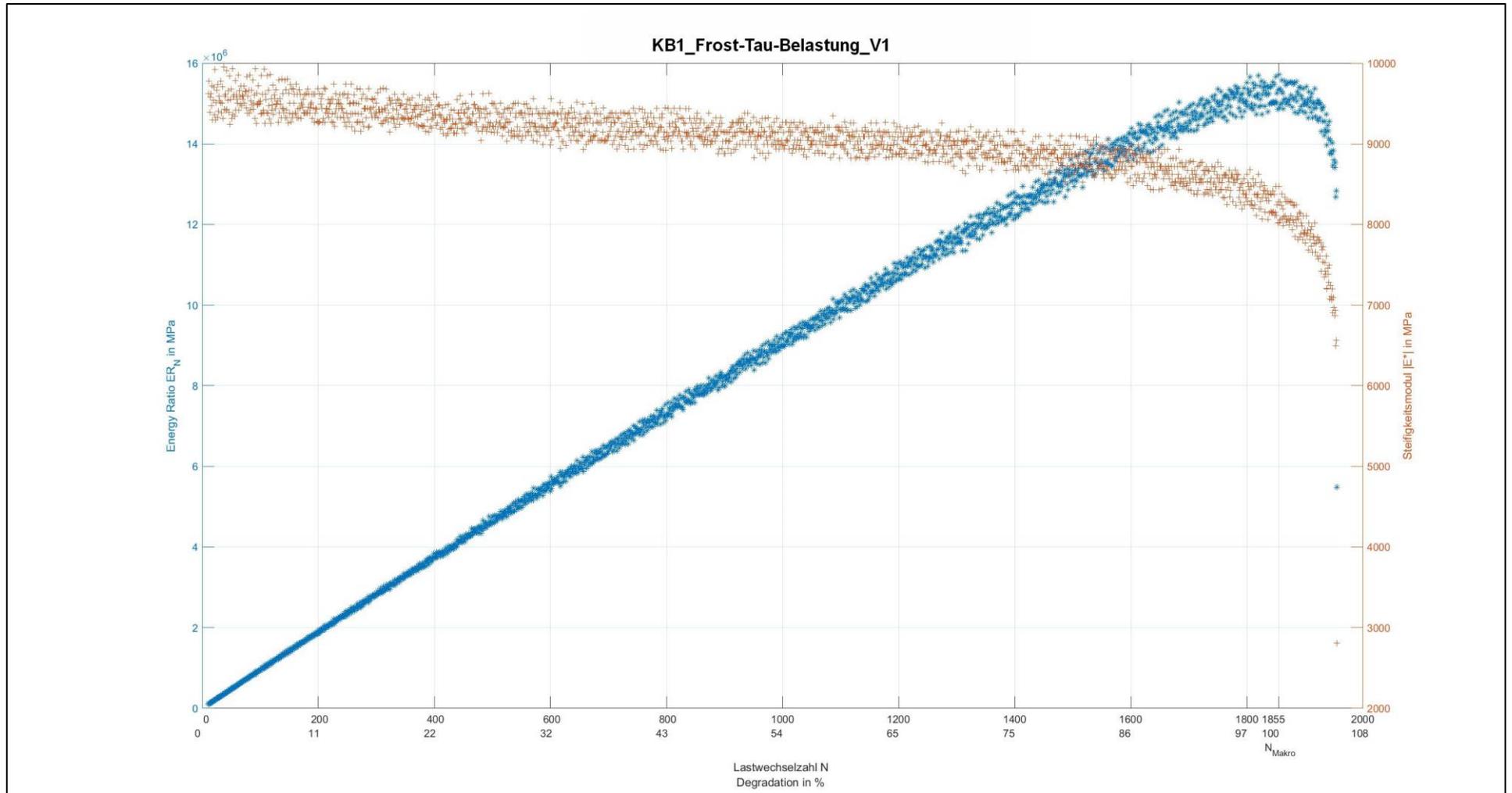


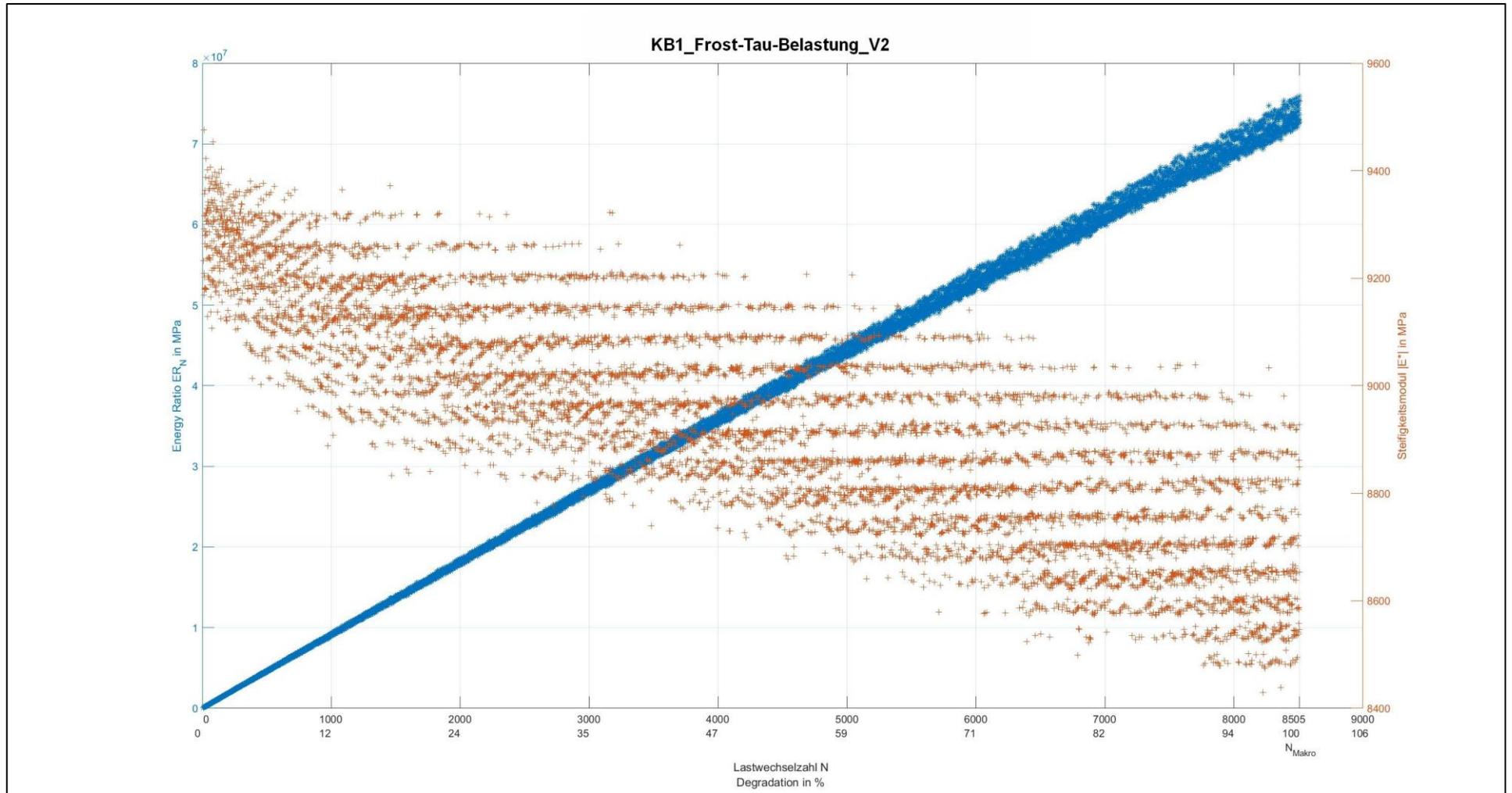


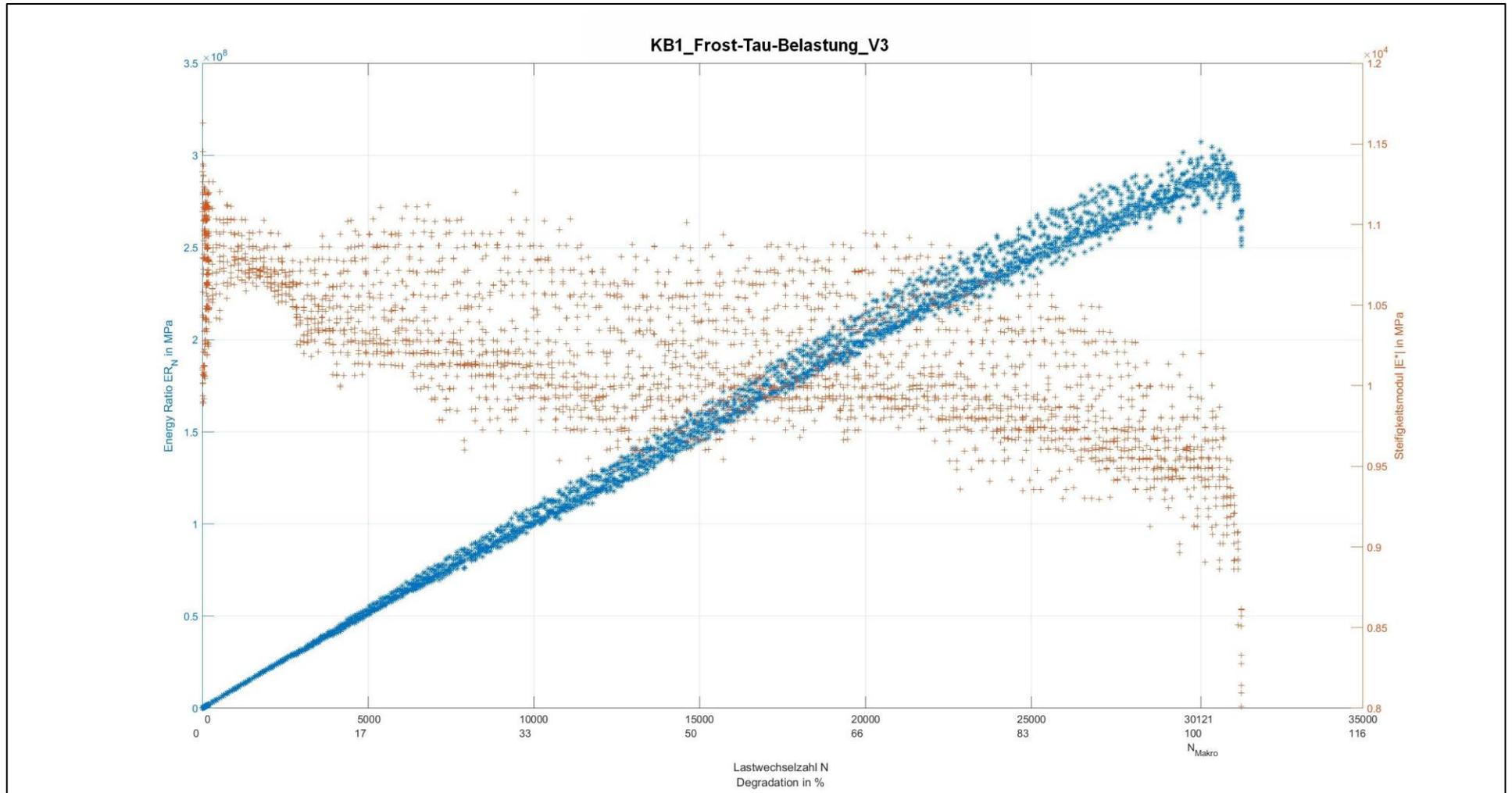
Anlage 5.3: Baustoffgemisch KB1

Tab. A.18: Ergebnisse zum Ermüdungsverhalten von BB2 nach Frost-Tau-Belastung

Probekörpernr.	Durchmesser	Höhe	Temperatur	Frequenz	Oberspannung	Unterspannung	Elastische Anfangsdehnung	Lastwechselzahl
	d [mm]	h [mm]	t [°C]	f [Hz]	σ_o [MPa]	σ_u [MPa]	$E_{el, anf}$ [‰]	N_{Makro} [-]
1	100	41	20	0,5	1,7	0,3	0,3185	1855
2	100	42	20	0,5	1,7	0,3	0,3329	8505
3	100	42	20	0,5	1,7	0,3	0,2821	30121



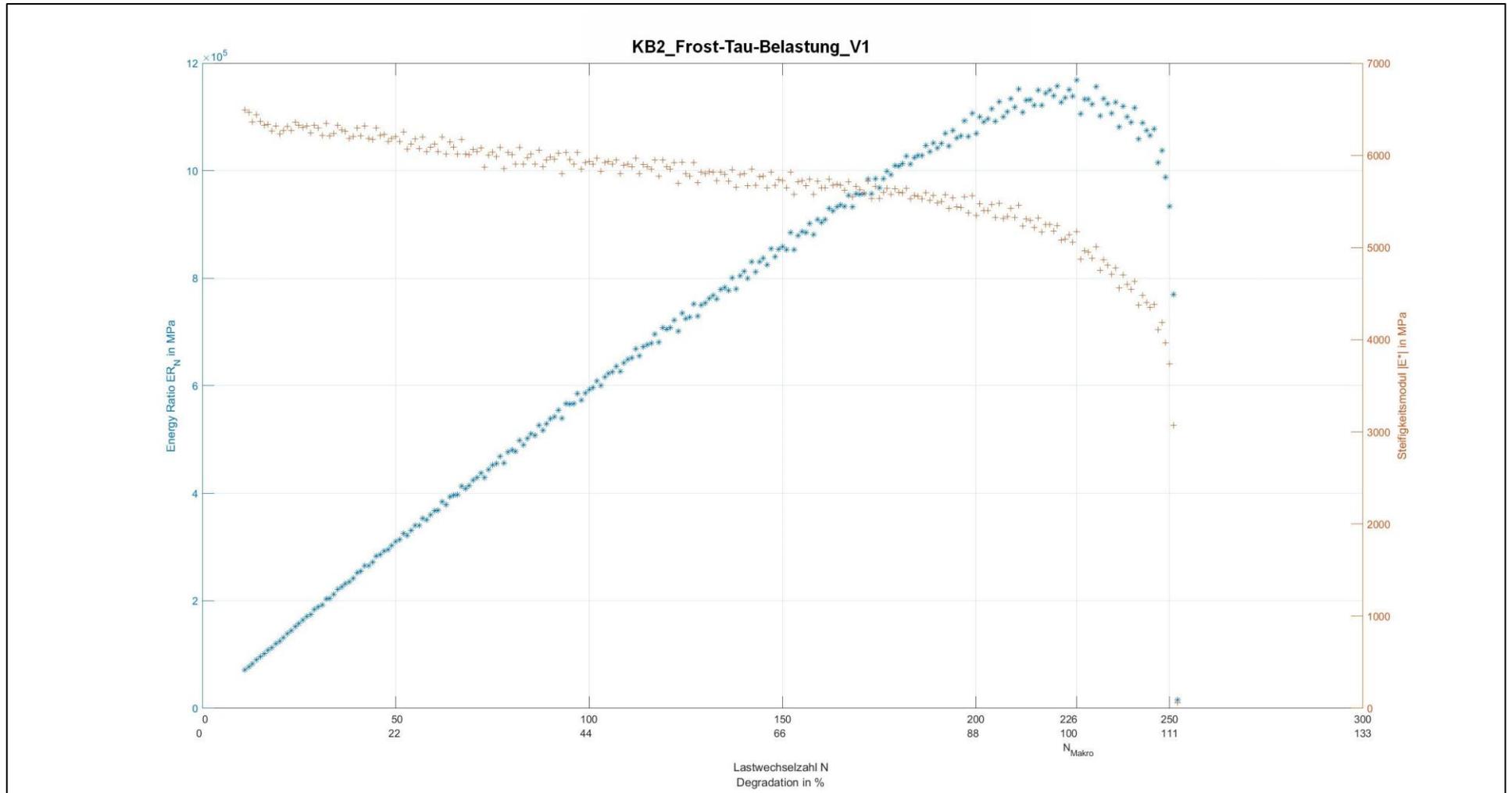


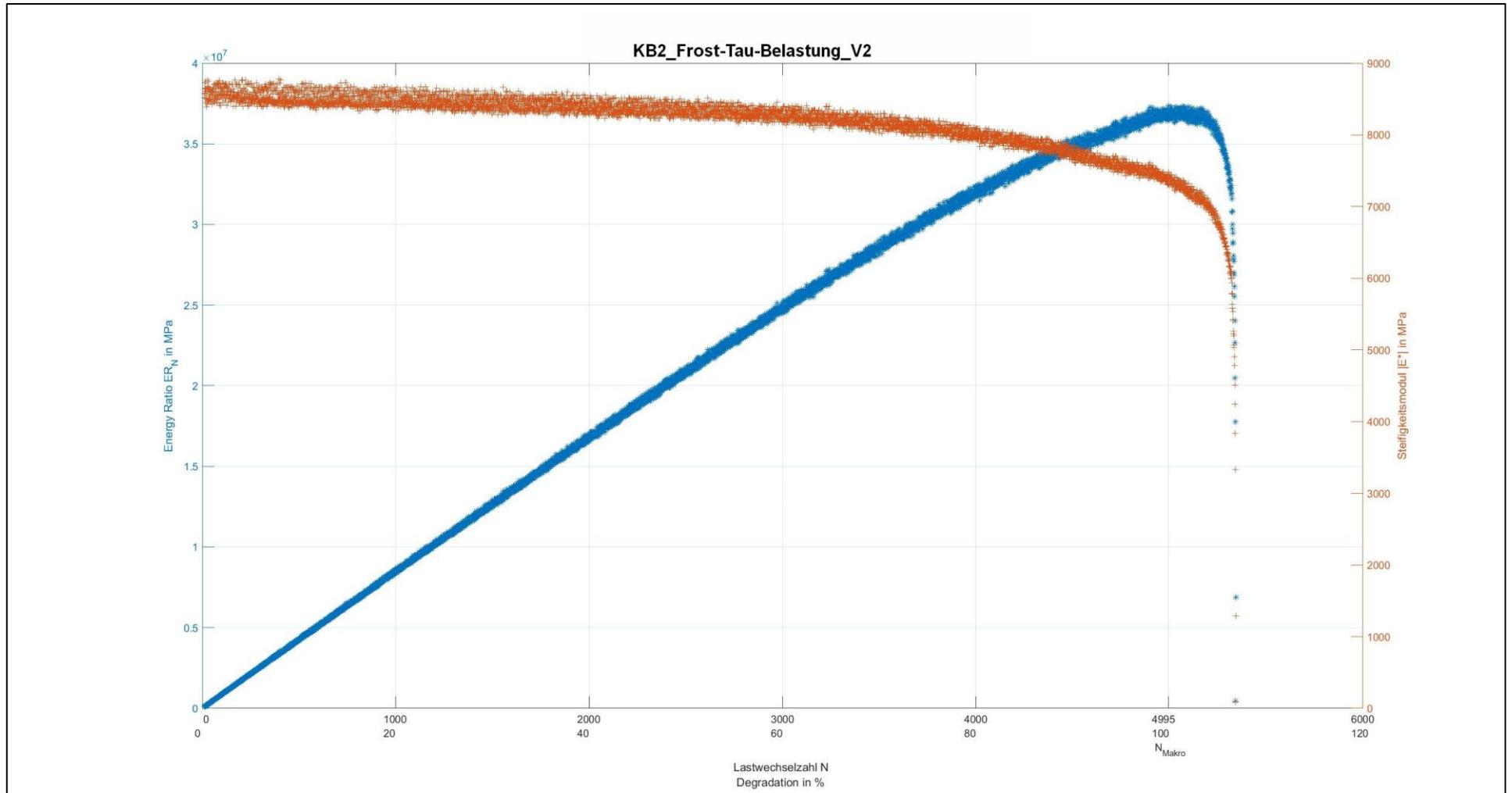


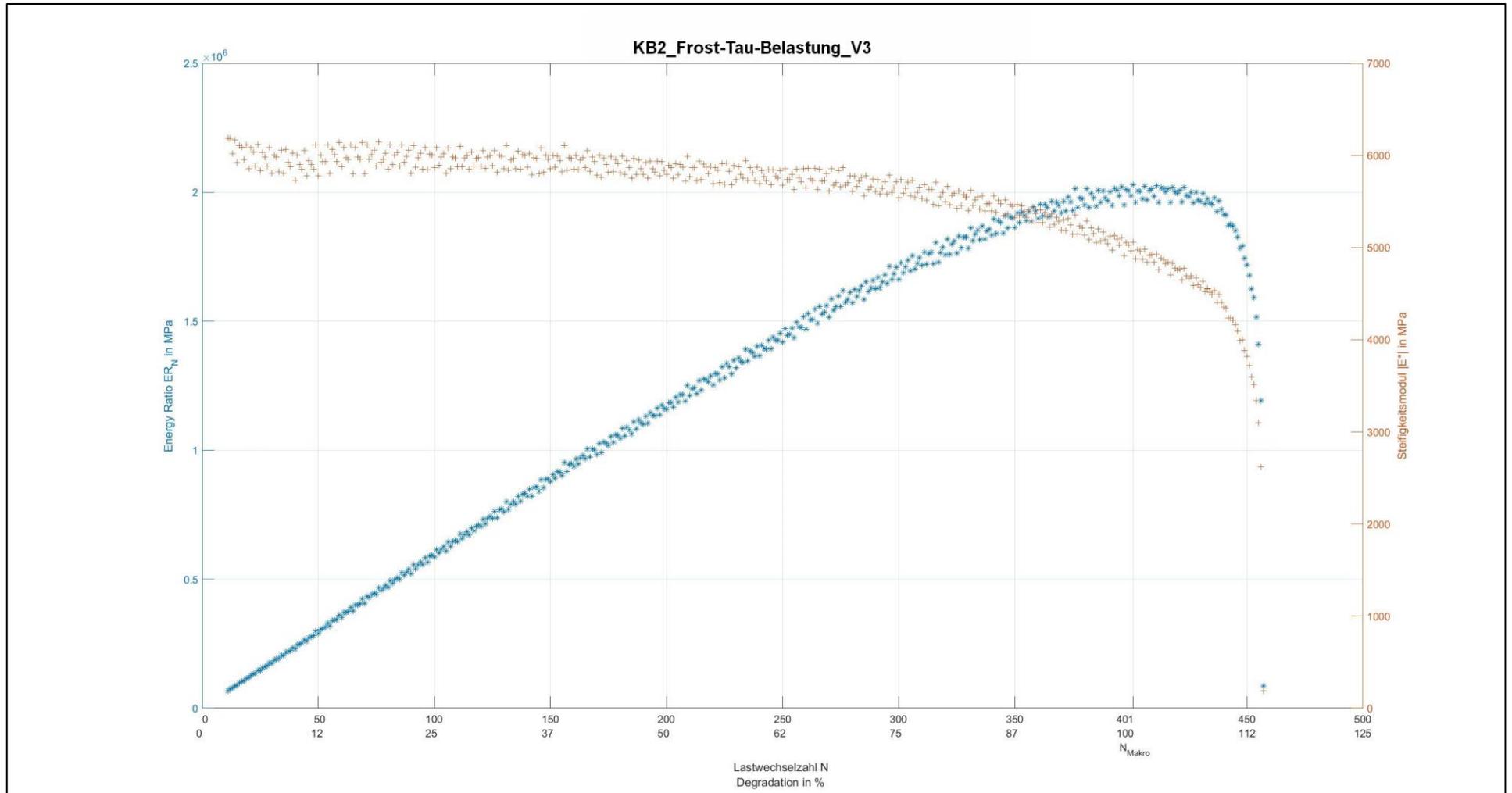
Anlage 5.4: Baustoffgemisch KB2

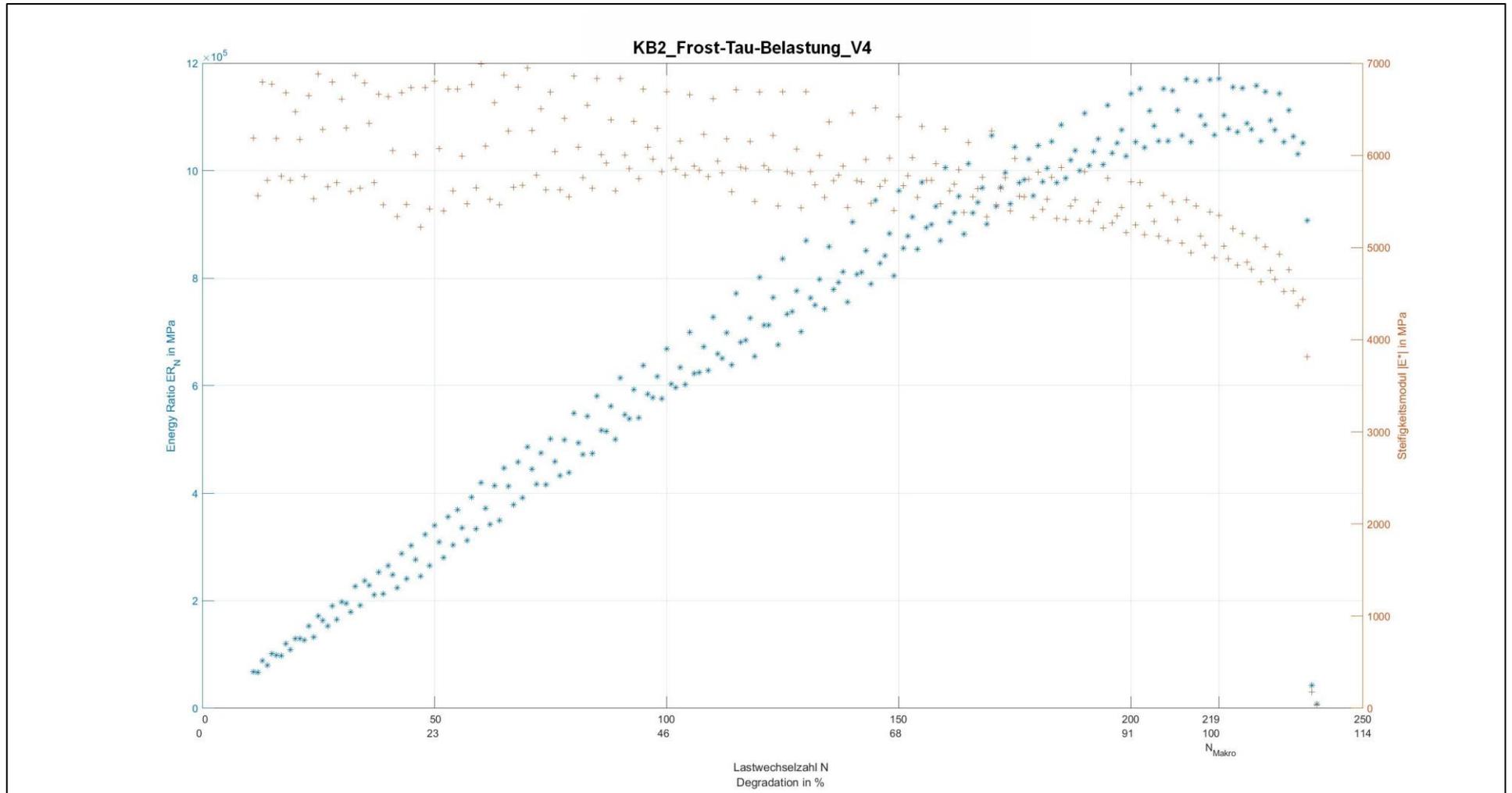
Tab. A.19: Ergebnisse zum Ermüdungsverhalten von KB2 nach Frost-Tau-Belastung

Probekörpernr.	Durchmesser d [mm]	Höhe h [mm]	Temperatur t [°C]	Frequenz f [Hz]	Oberspannung σ_o [MPa]	Unterspannung σ_u [MPa]	Elastische Anfangsdehnung $E_{el, anf}$ [‰]	Lastwechselzahl N_{Makro} [-]
1	100	42	20	0,5	1,5	0,3	0,4215	226
2	100	38	20	0,5	1,5	0,3	0,3147	4995
3	100	41	20	0,5	1,5	0,3	0,4464	401
4	100	41	20	0,5	1,5	0,3	0,4141	219





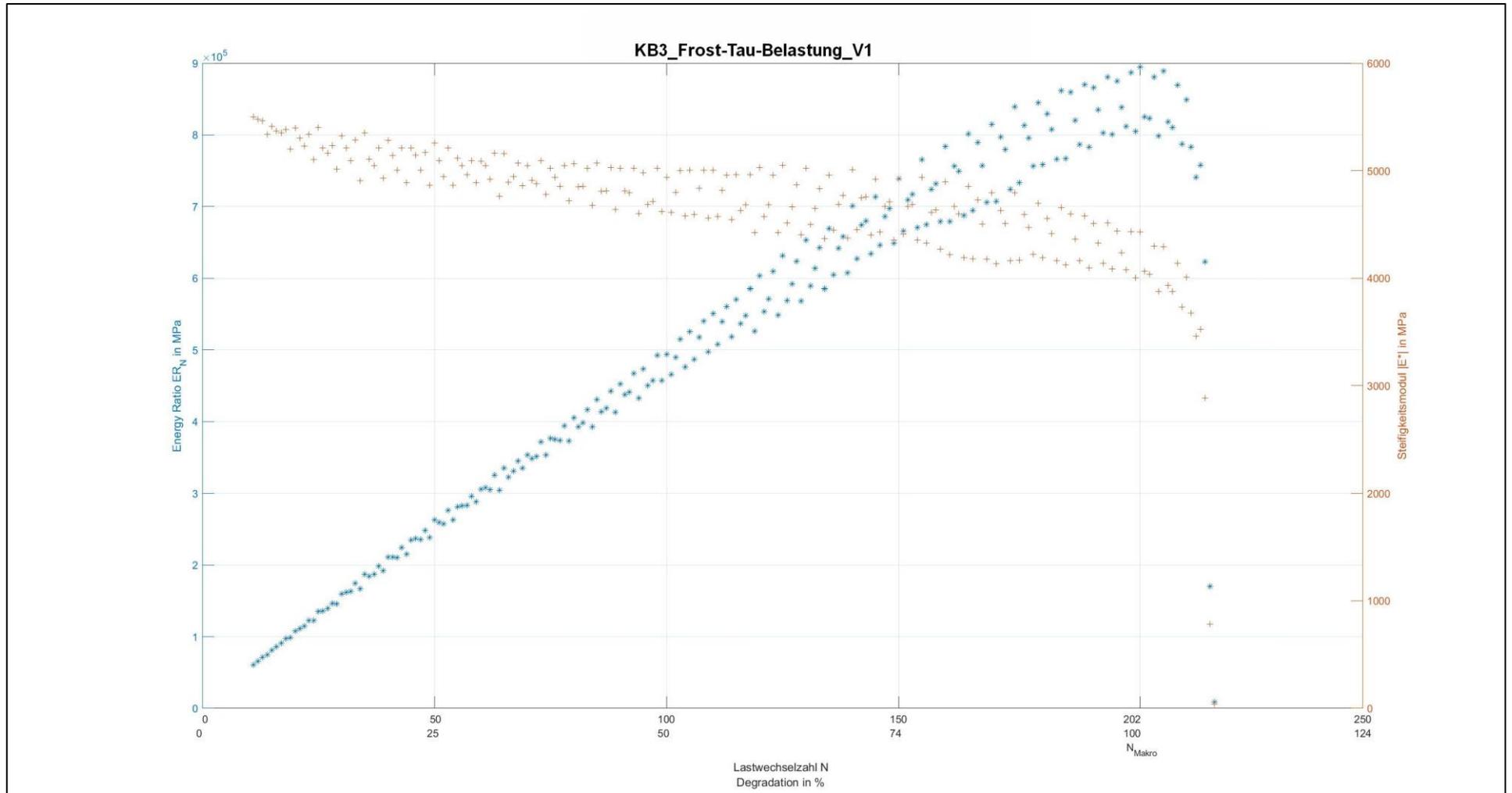


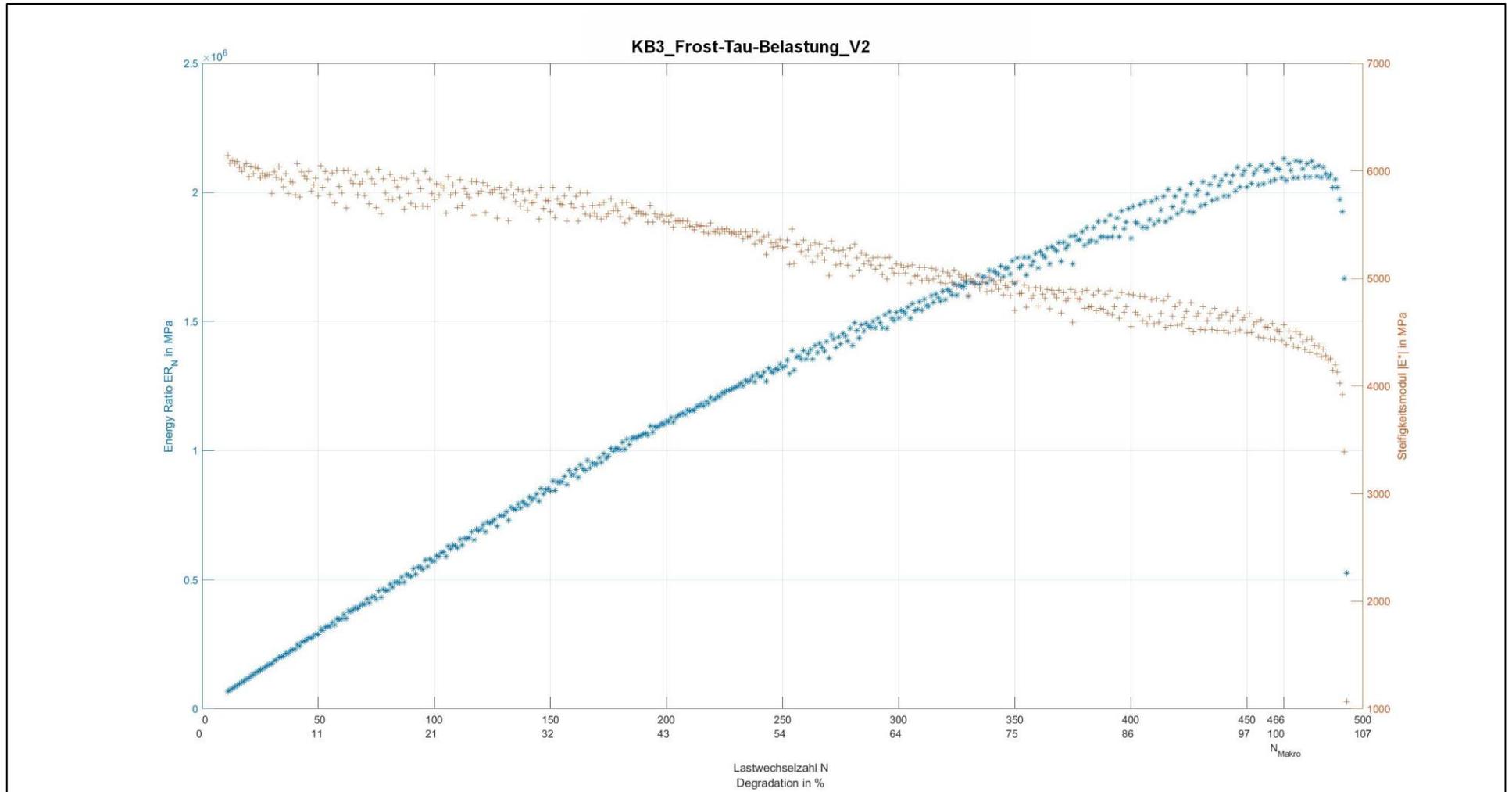


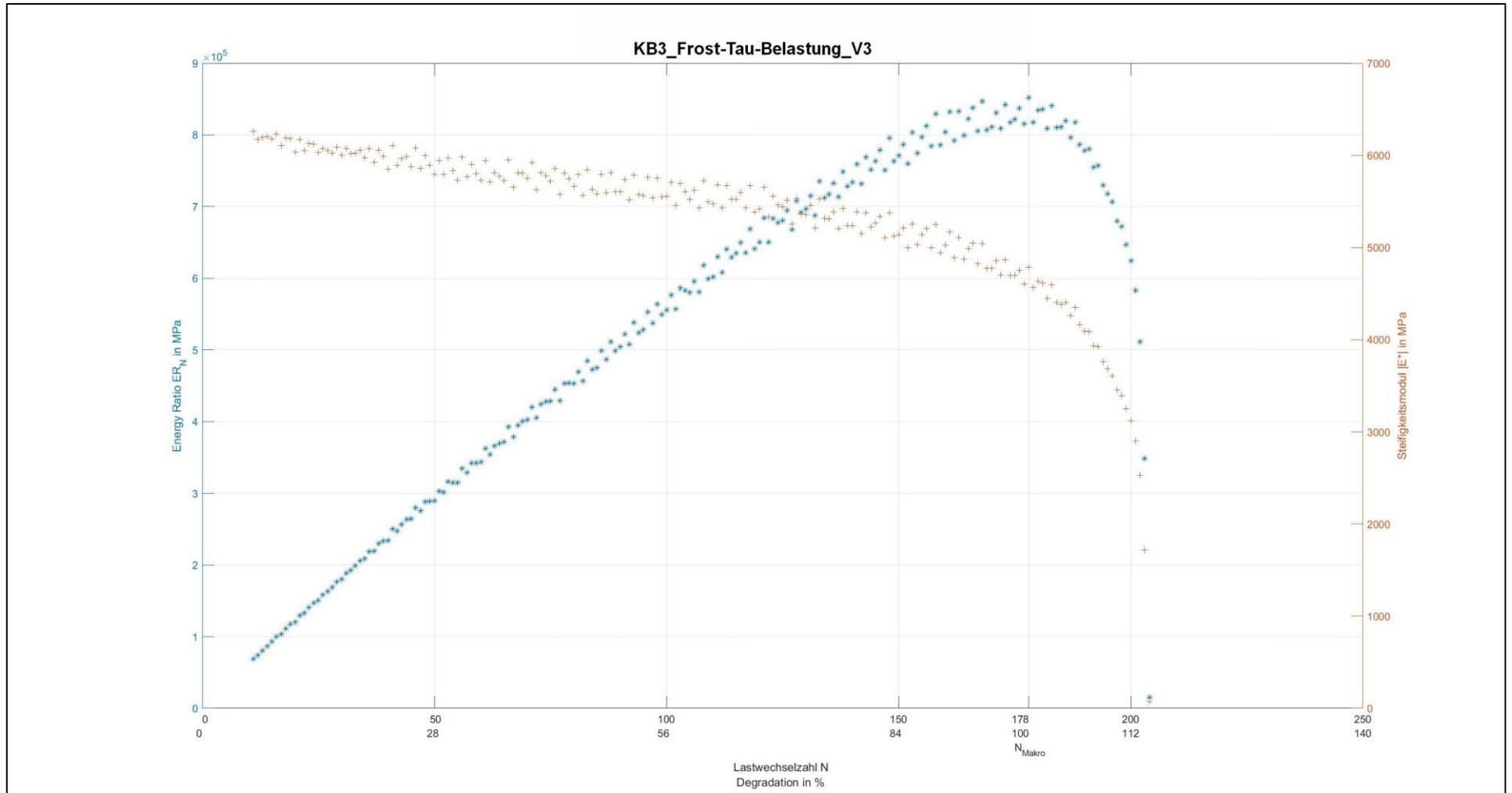
Anlage 5.5: Baustoffgemisch KB3

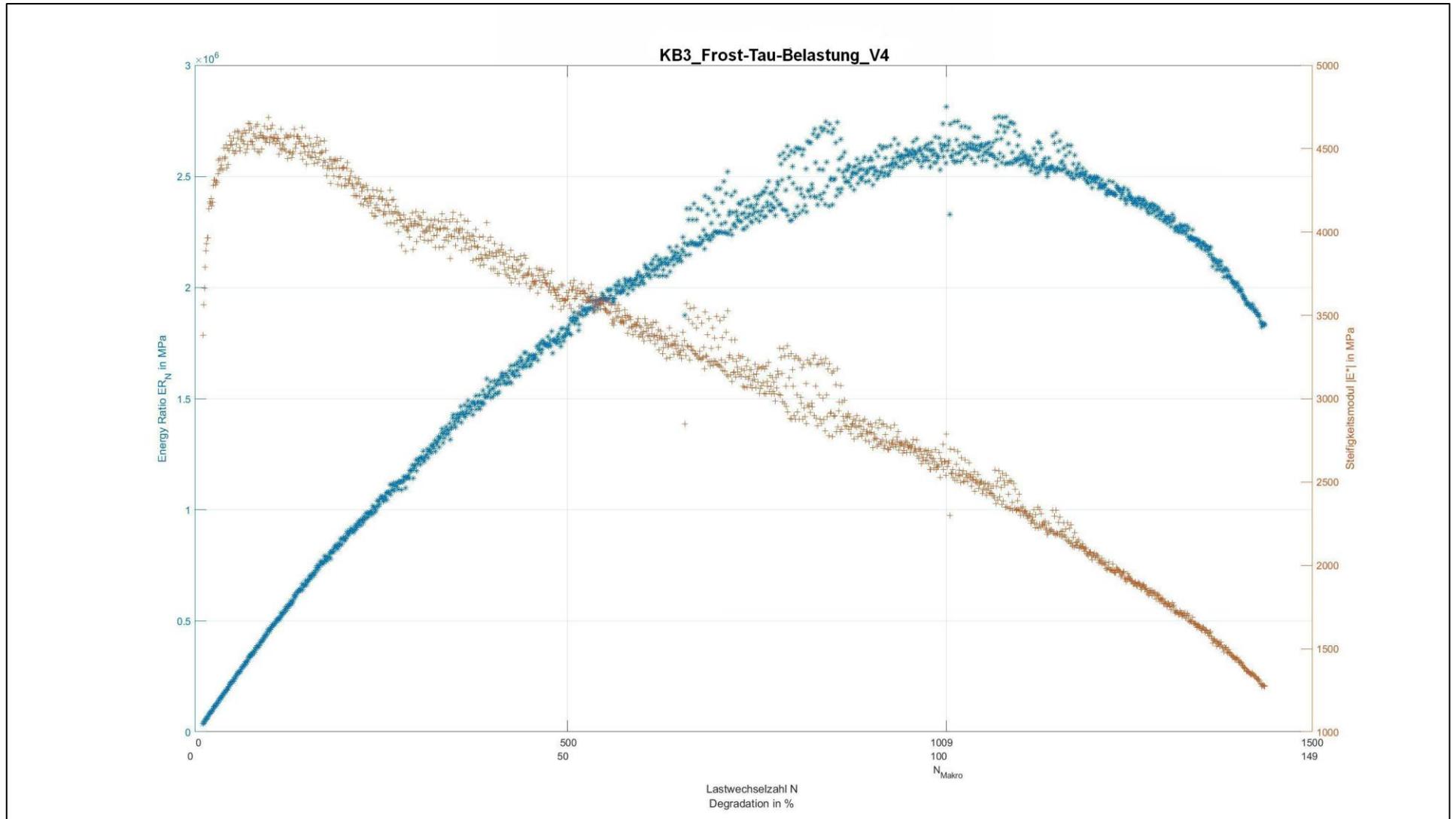
Tab. A.20: Ergebnisse zum Ermüdungsverhalten von KB2 nach Frost-Tau-Belastung

Probekörpernr.	Durchmesser	Höhe	Temperatur	Frequenz	Oberspannung	Unterspannung	Elastische Anfangsdehnung	Lastwechselzahl
	d	h	t	f	σ_o	σ_u	$E_{el, anf}$	N_{Makro}
	[mm]	[mm]	[°C]	[Hz]	[MPa]	[MPa]	[‰]	[-]
1	100	38	20	0,5	1,3	0,3	0,4295	202
2	100	38	20	0,5	1,3	0,3	0,3848	466
3	100	38	20	0,5	1,3	0,3	0,3788	178
4	100	38	20	0,5	1,3	0,3	0,4317	247





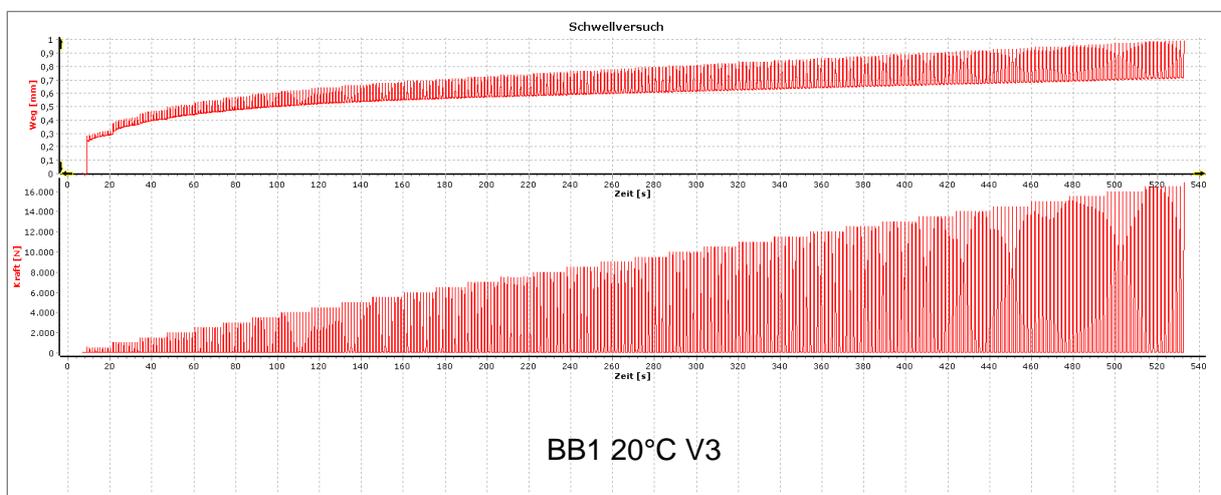
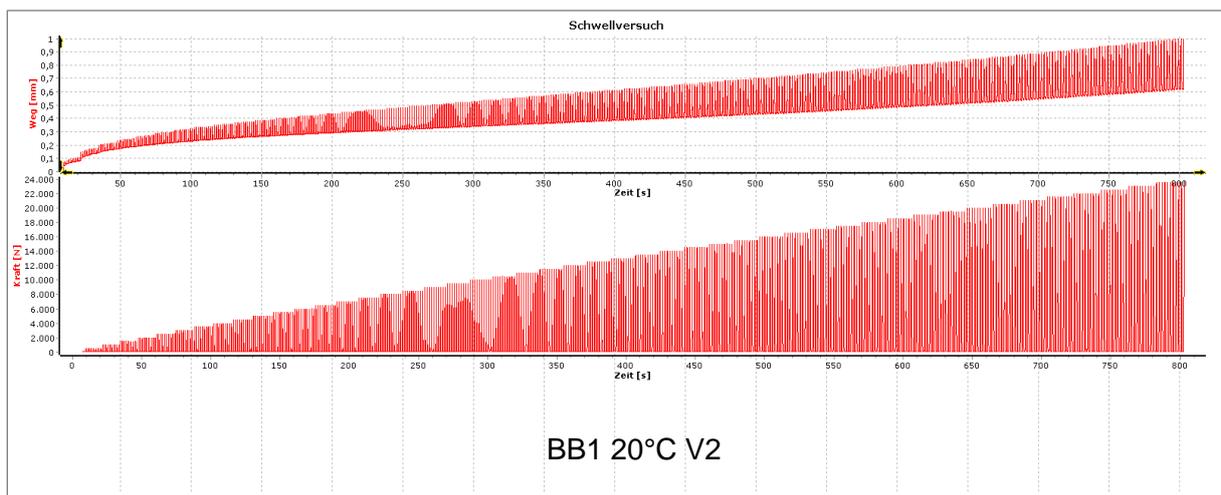
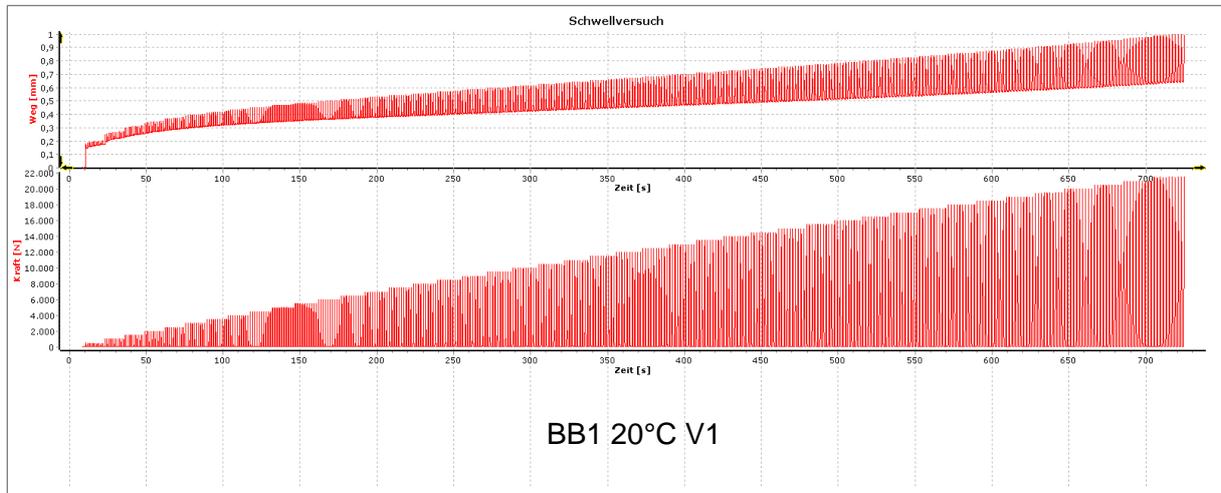


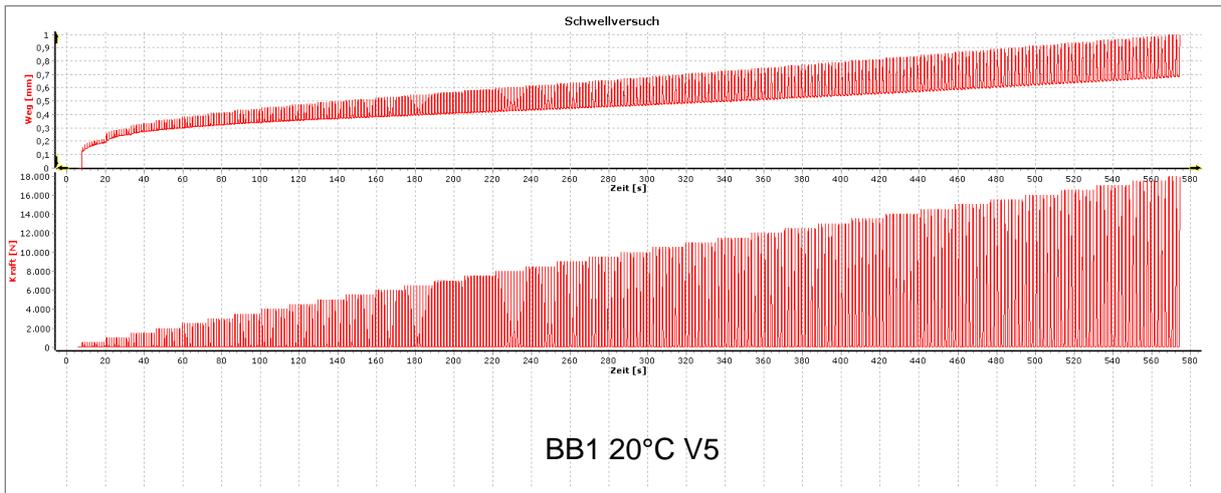
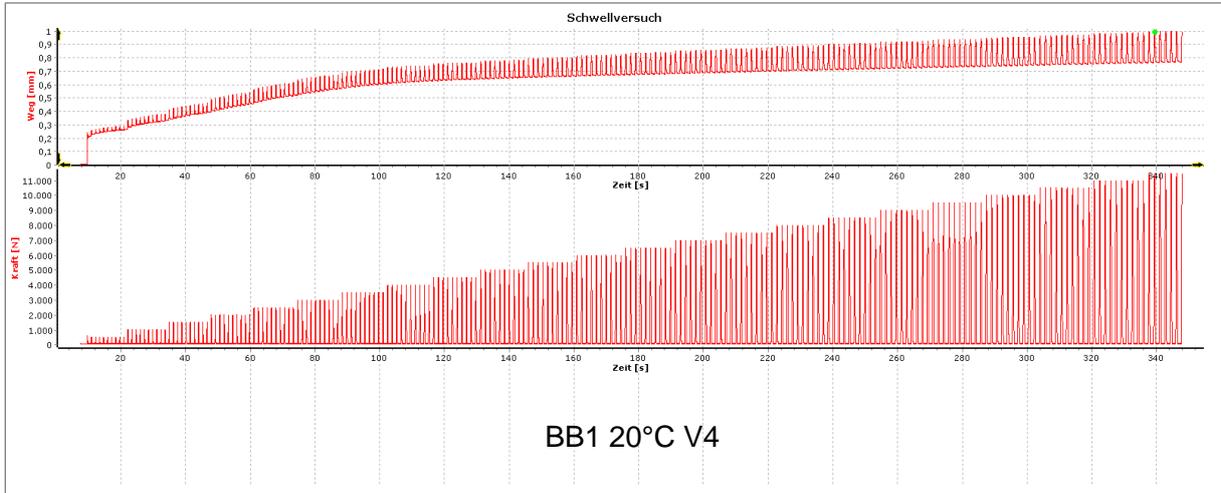


Anlage 6: Stempeleindringversuche

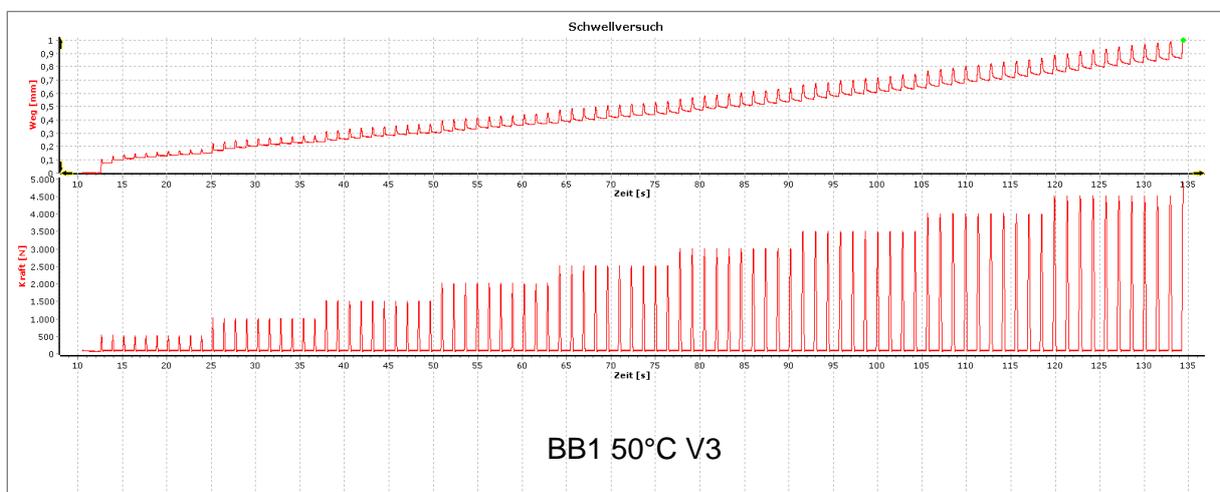
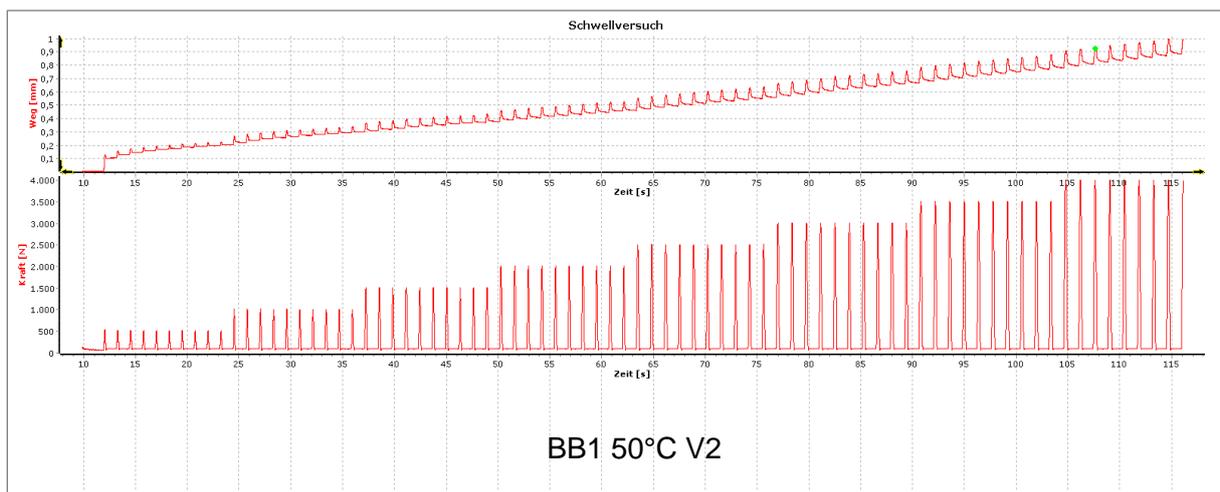
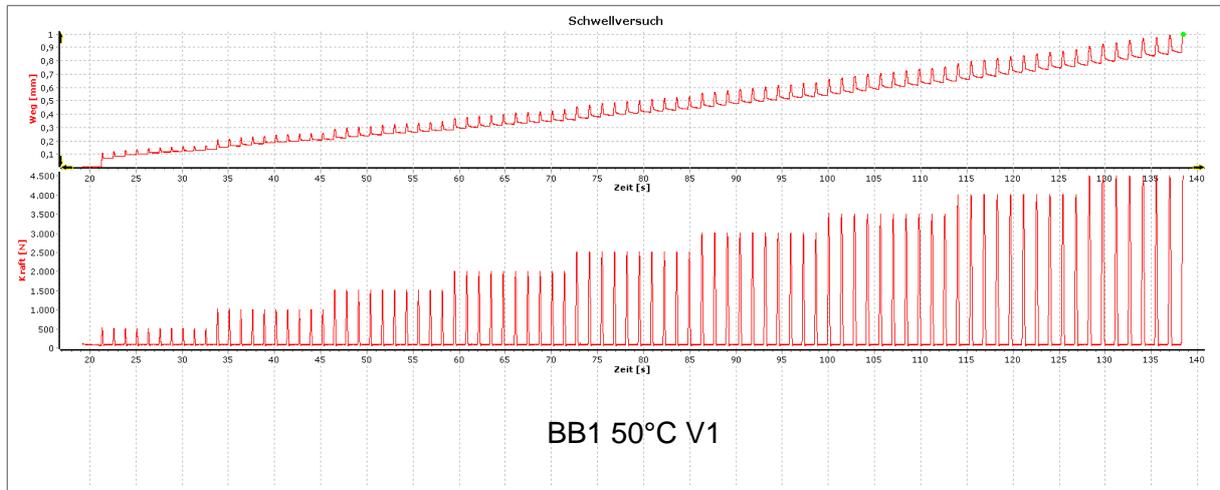
Anlage 6.1: Baustoffgemisch BB1

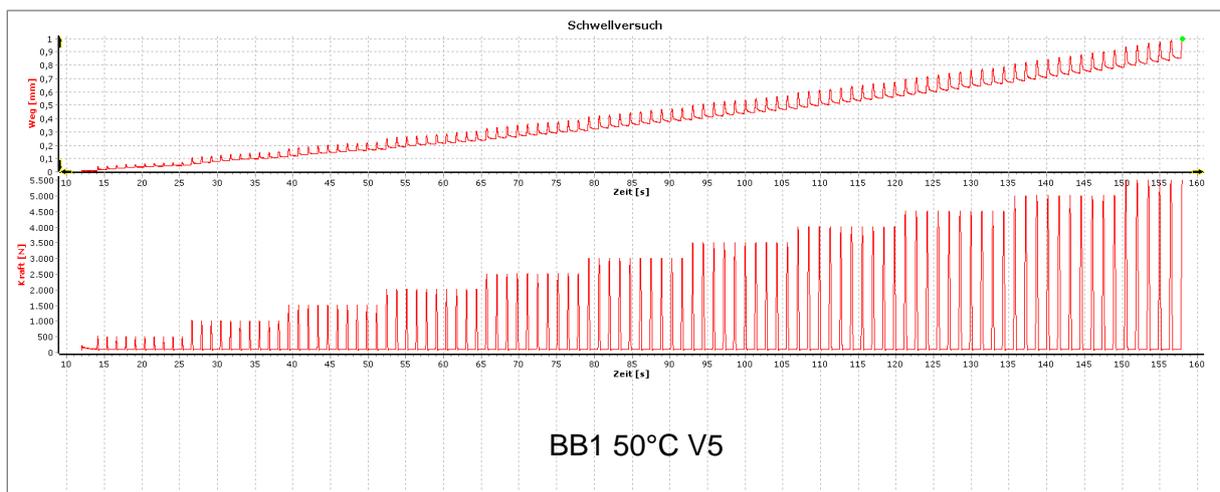
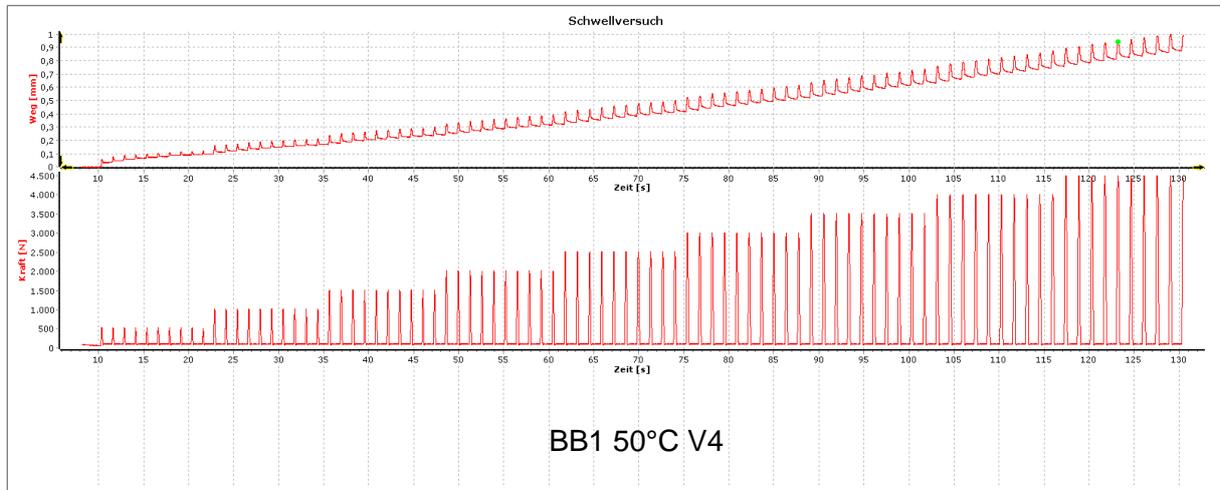
Baustoffgemisch BB1, T = 20°C





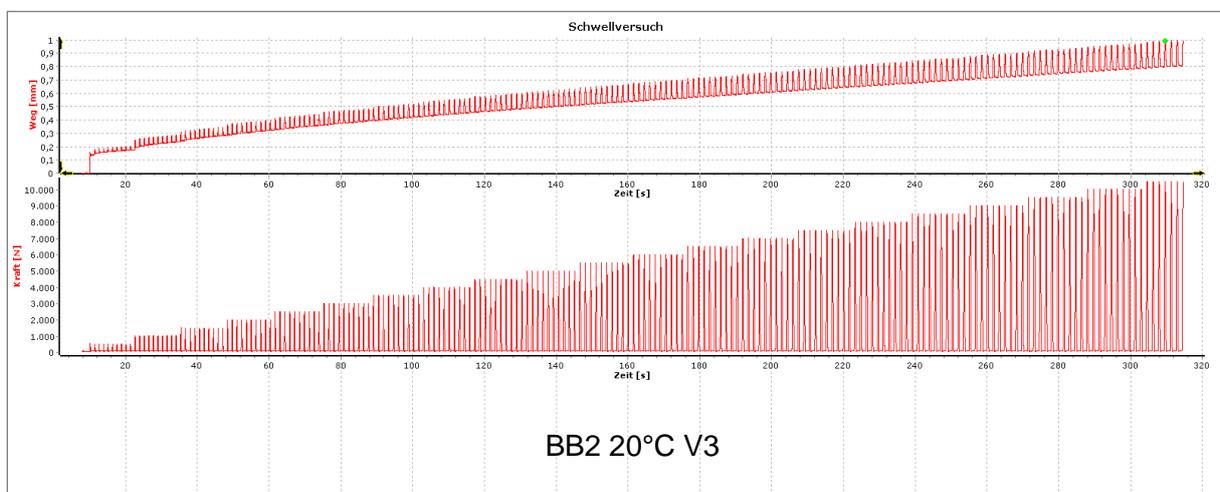
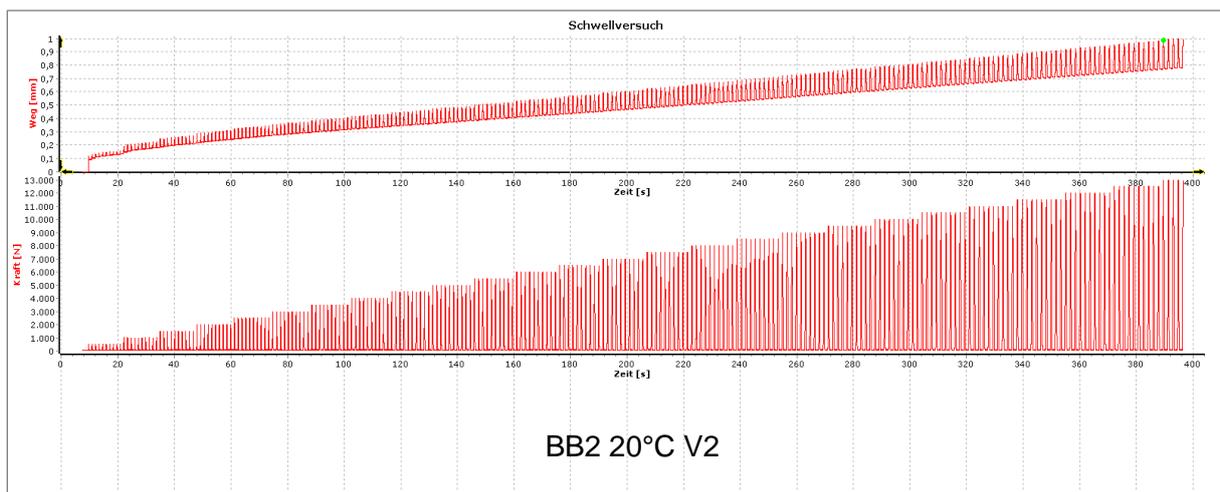
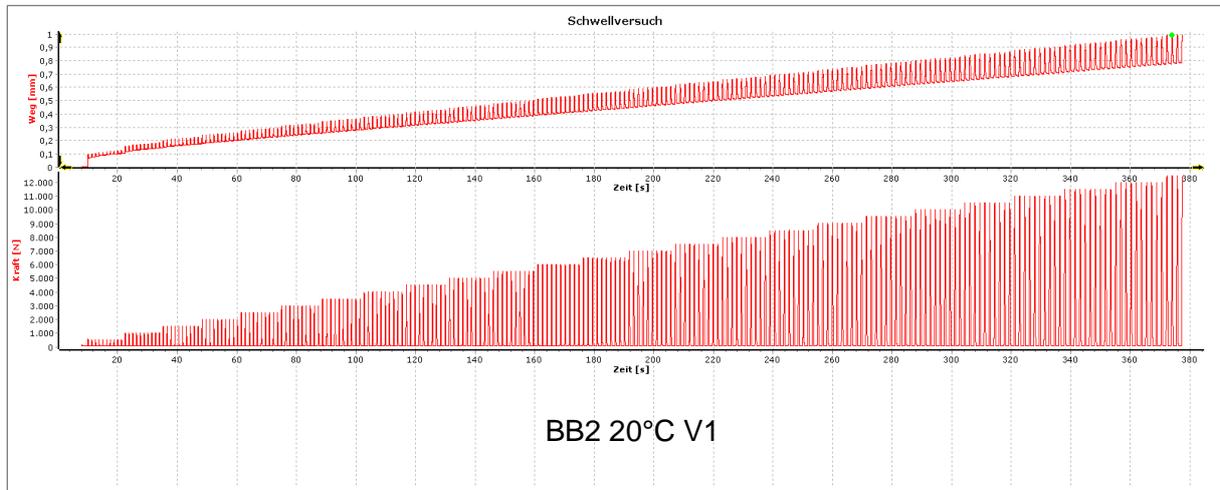
Baustoffgemisch BB1, T = 50°C

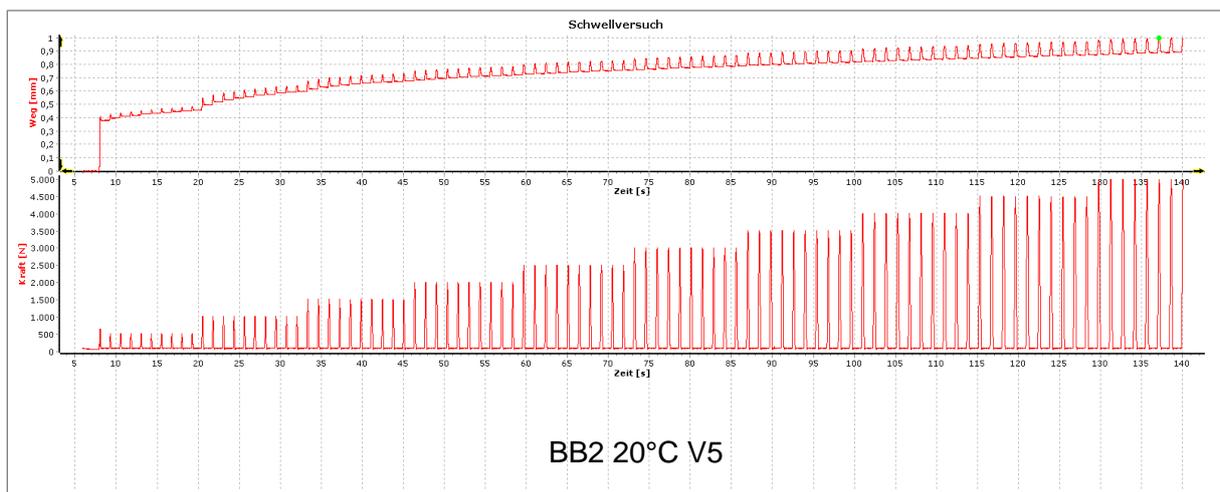
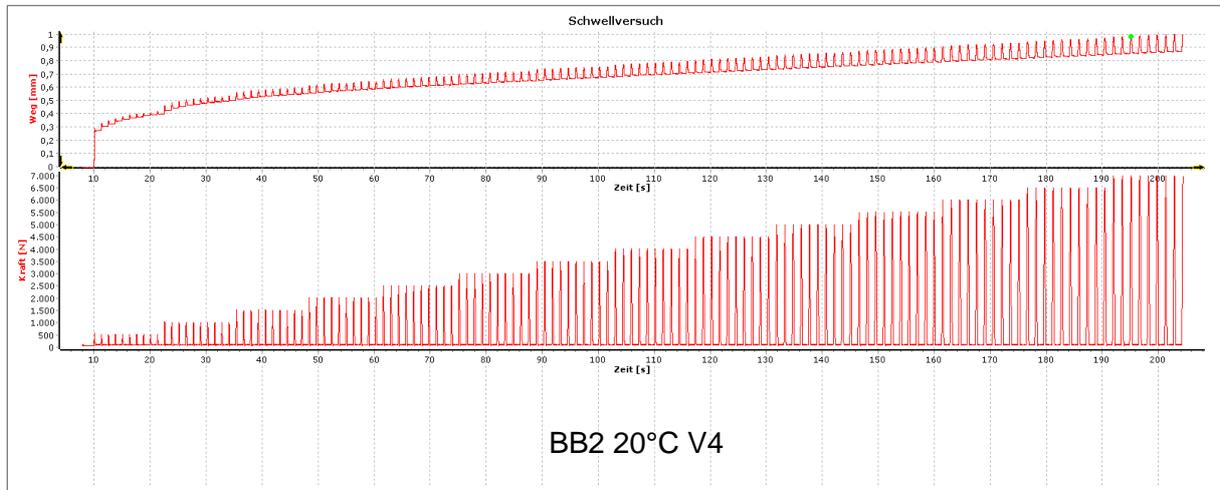




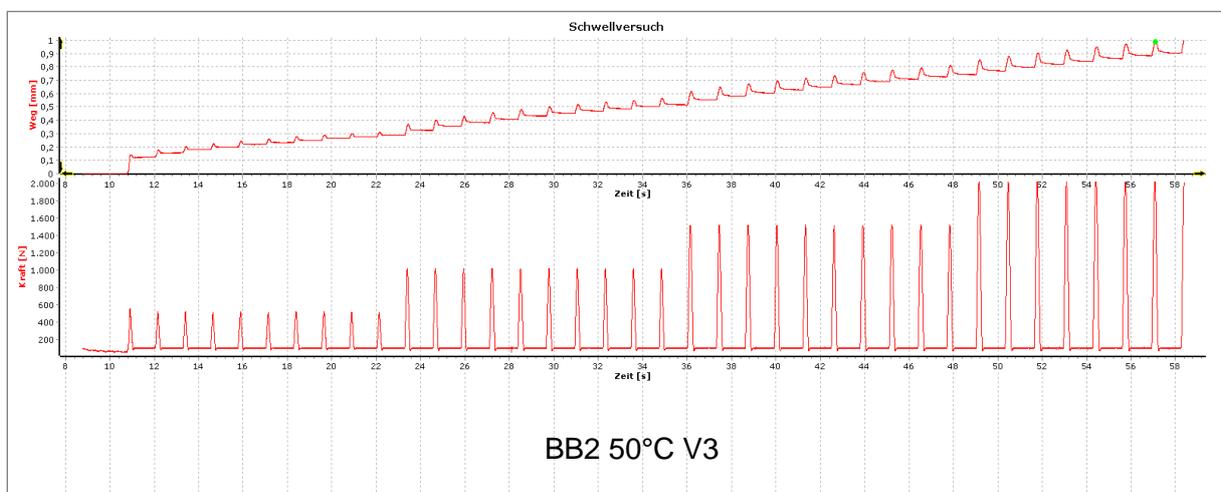
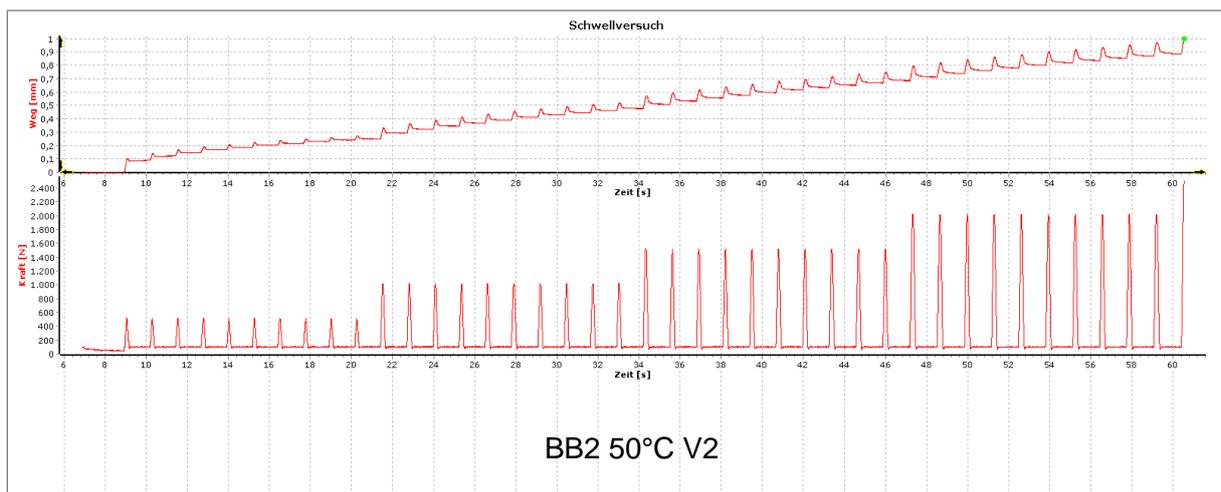
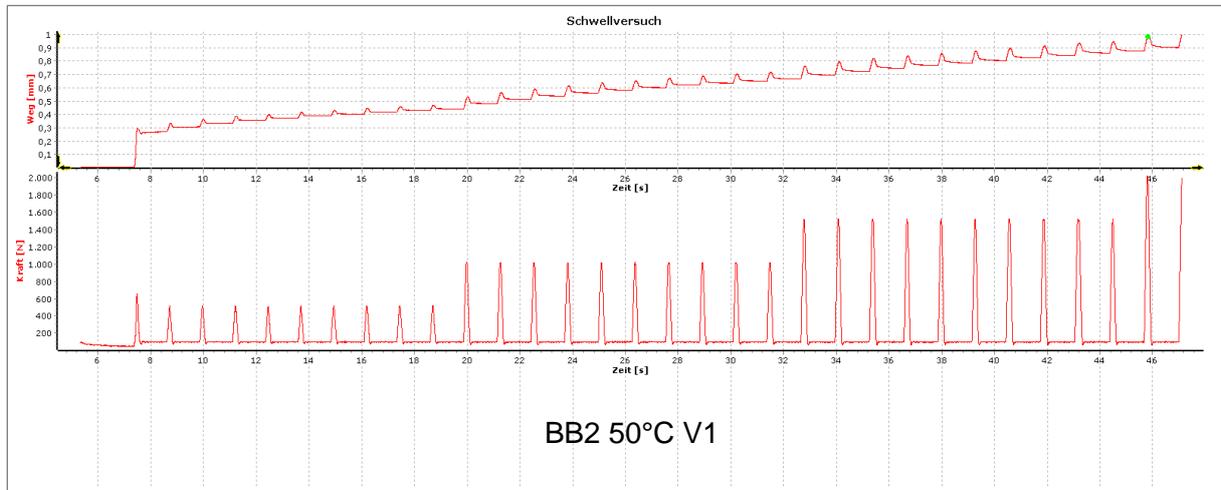
Anlage 6.2: Baustoffgemisch BB2

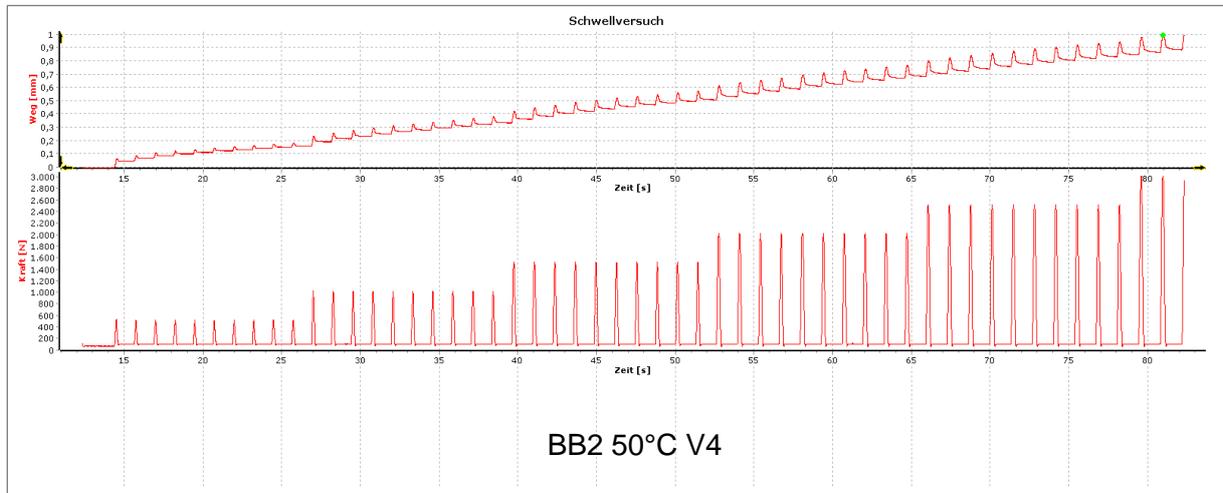
Baustoffgemisch BB2, T = 20°C





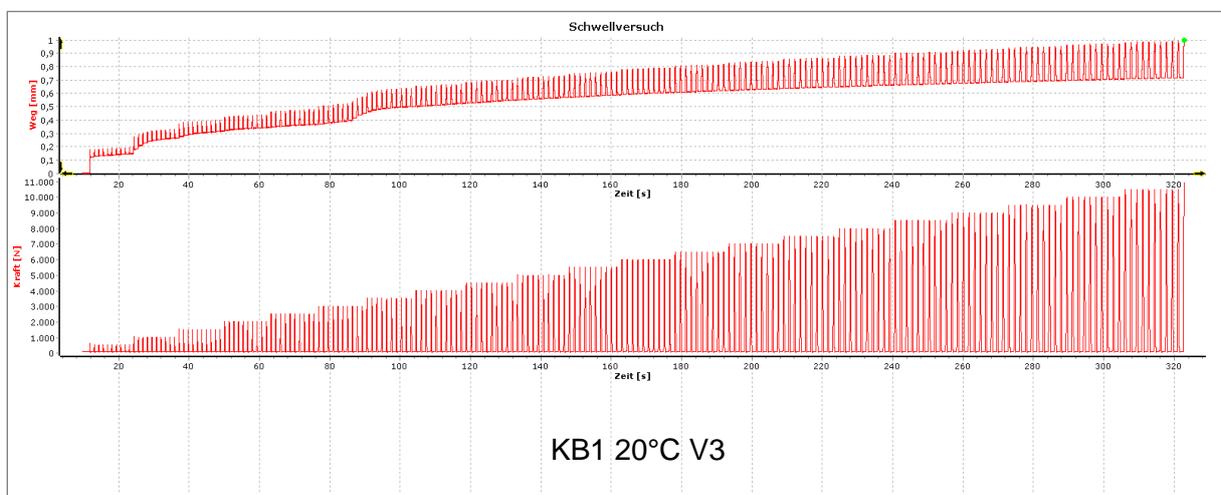
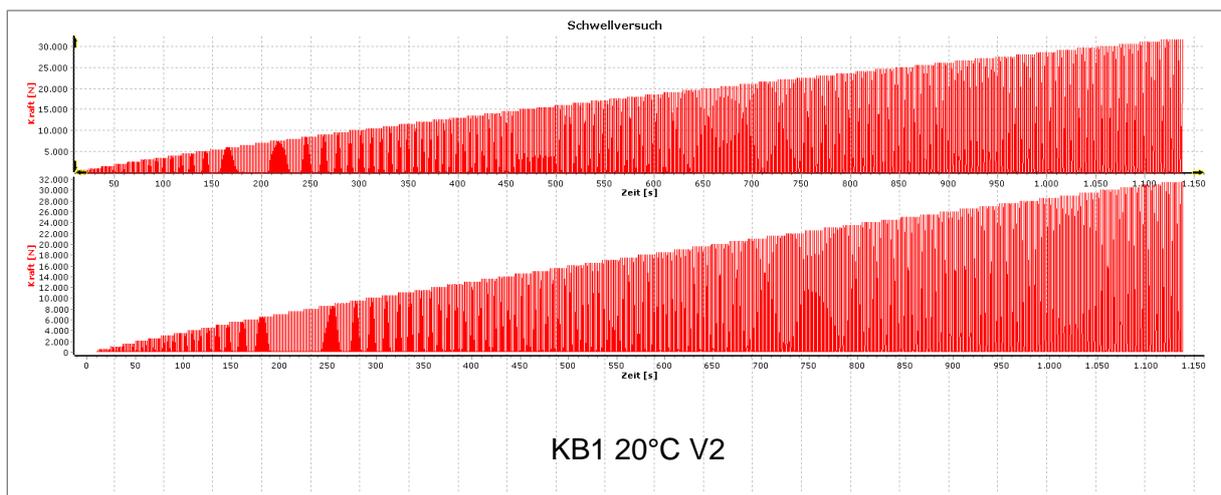
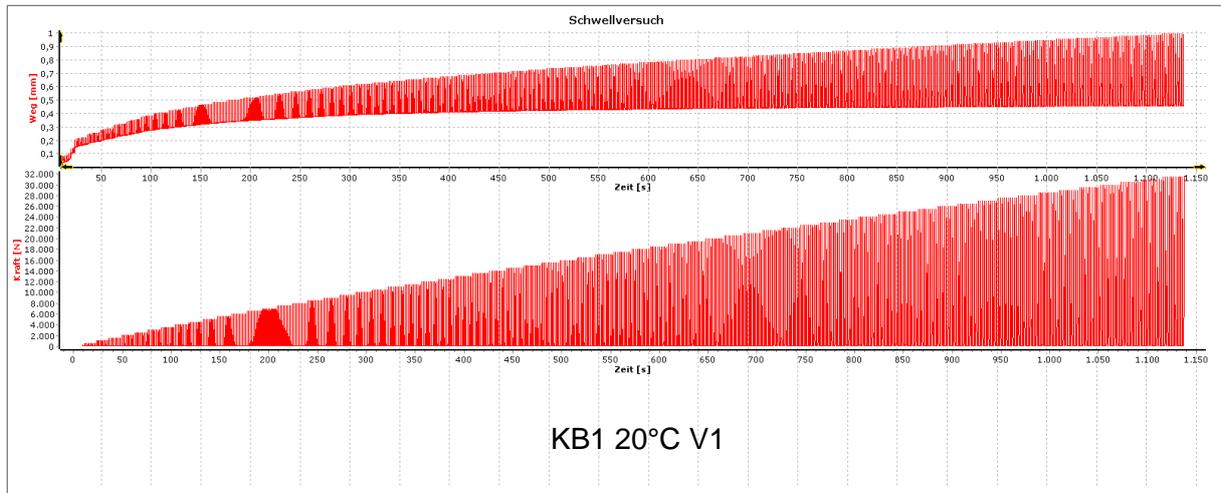
Baustoffgemisch BB2, T = 50°C

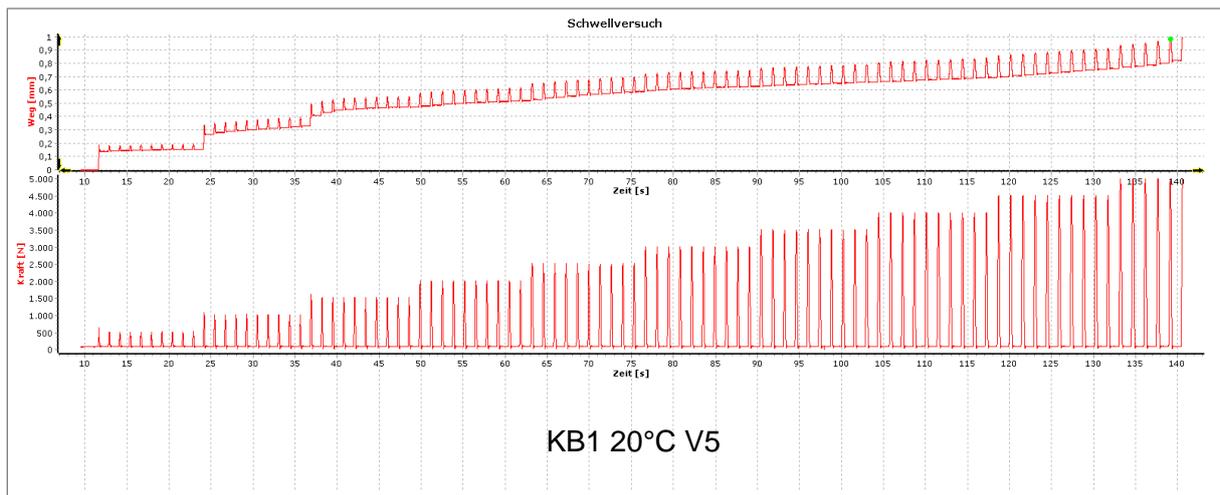
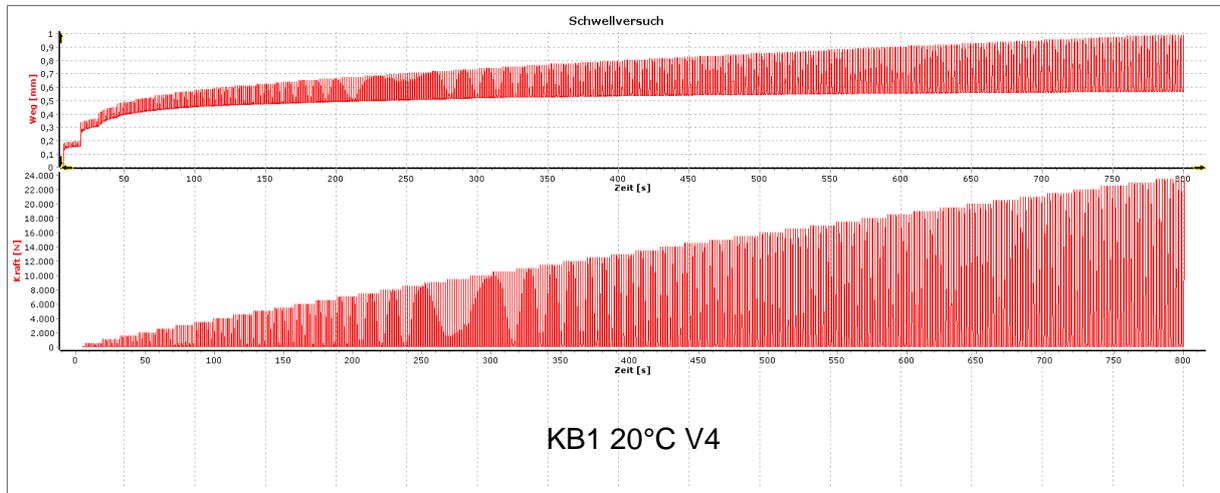




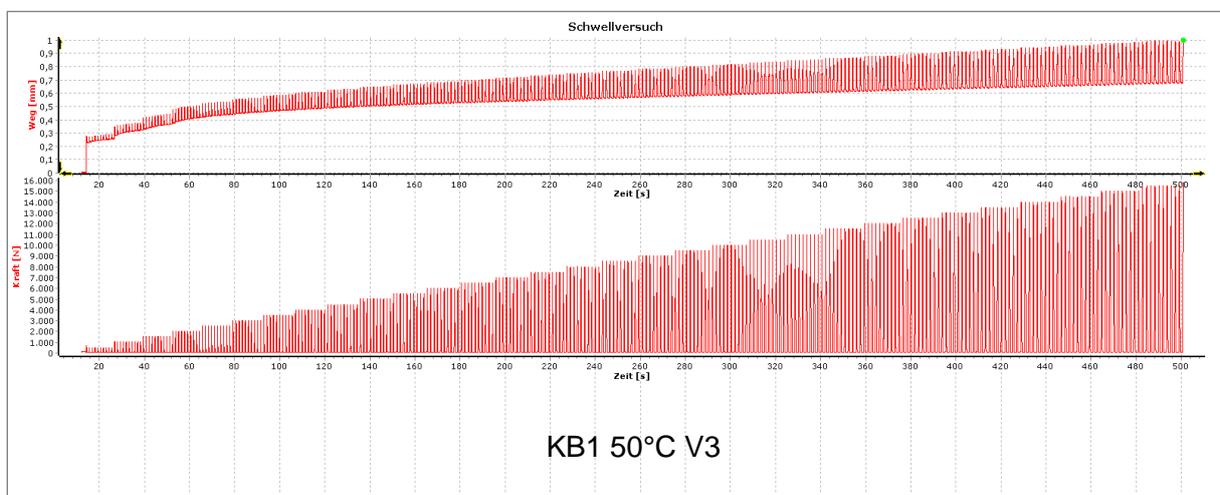
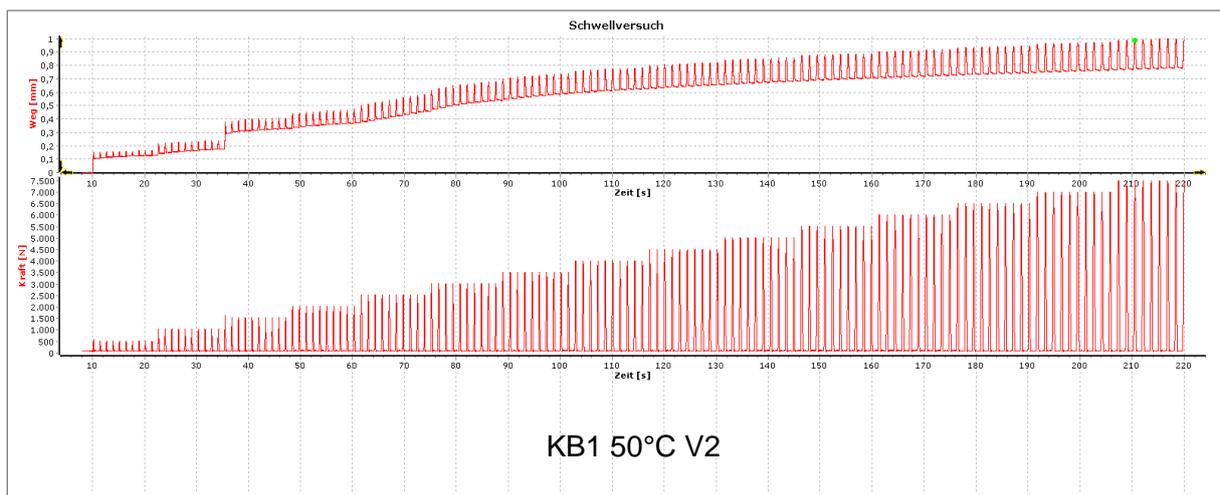
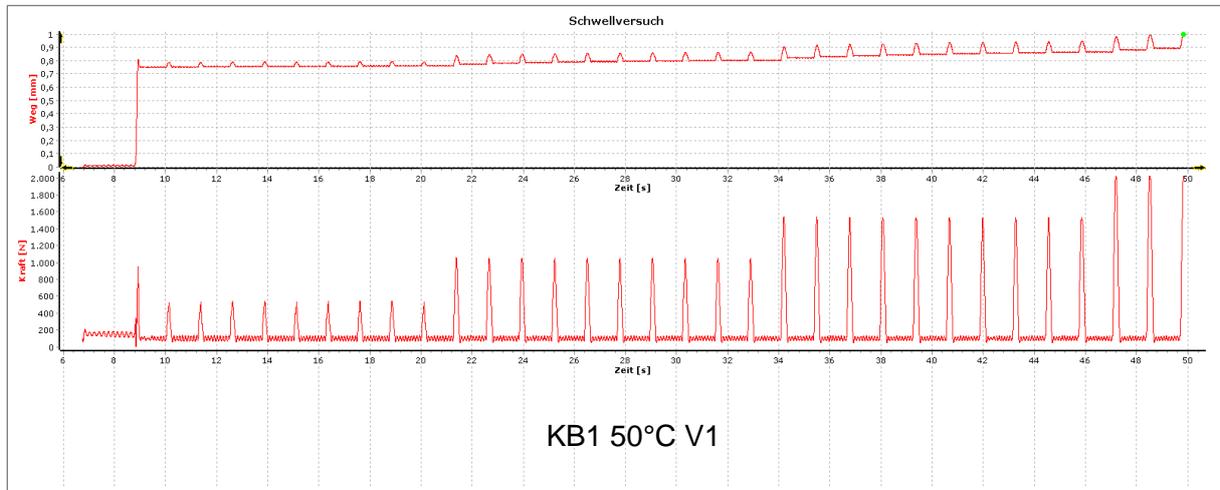
Anlage 6.3: Baustoffgemisch KB1

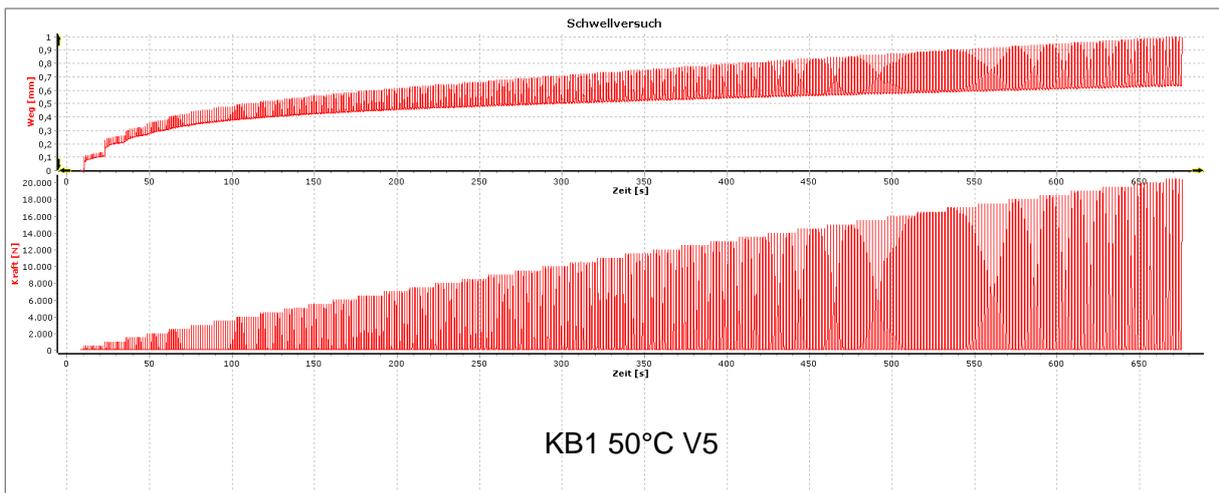
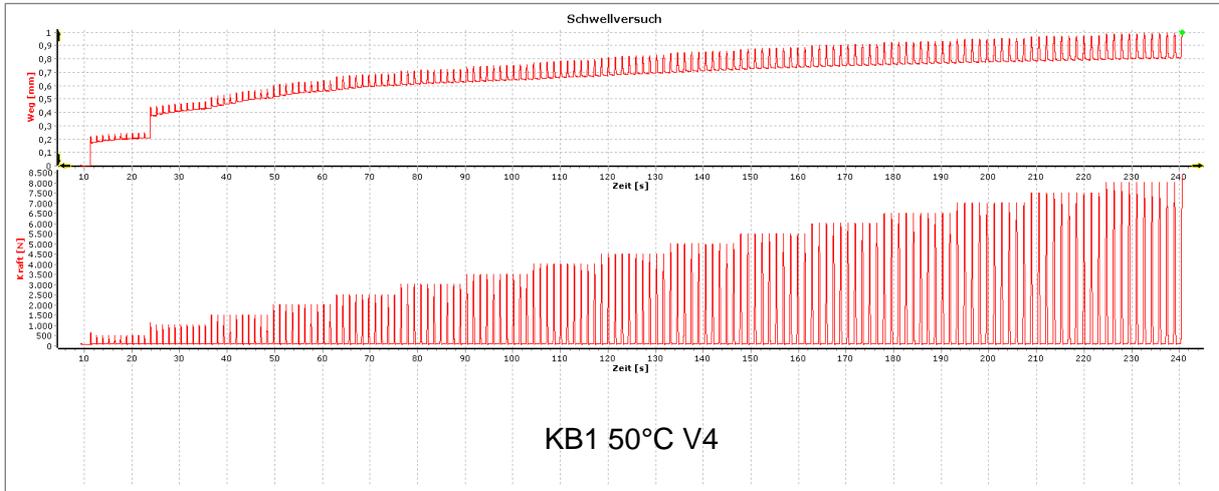
Baustoffgemisch KB1, T = 20°C





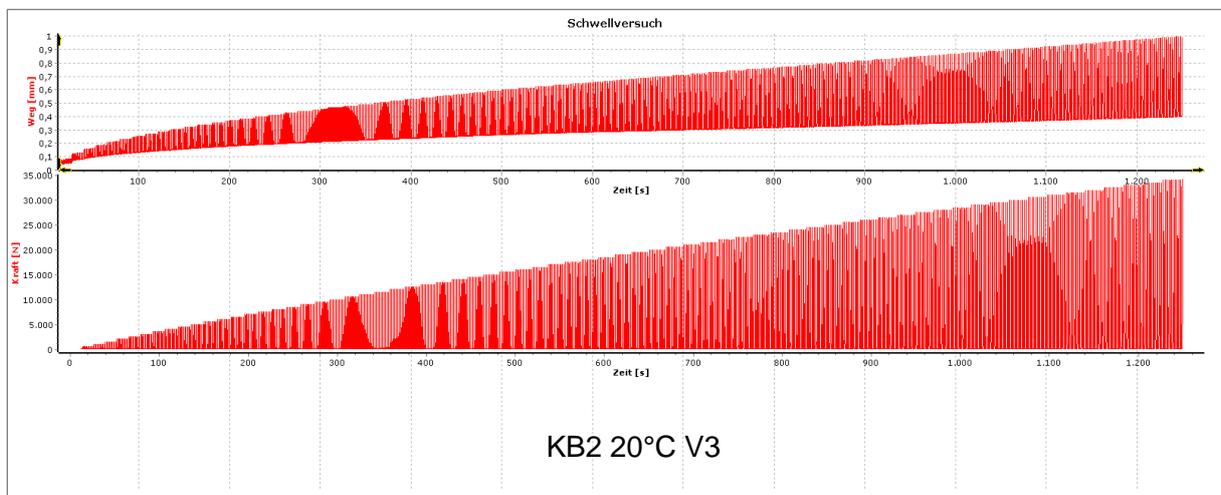
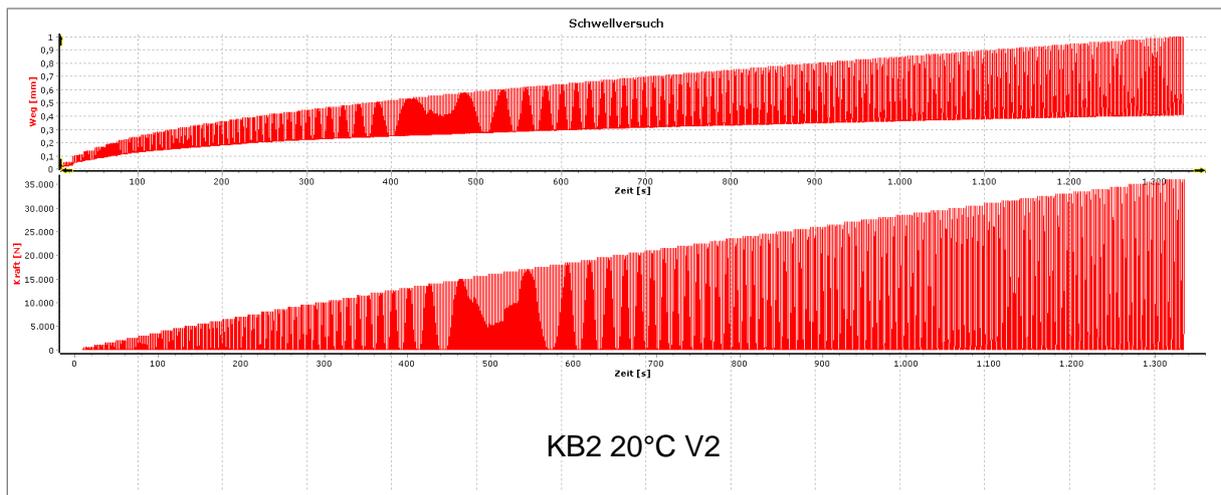
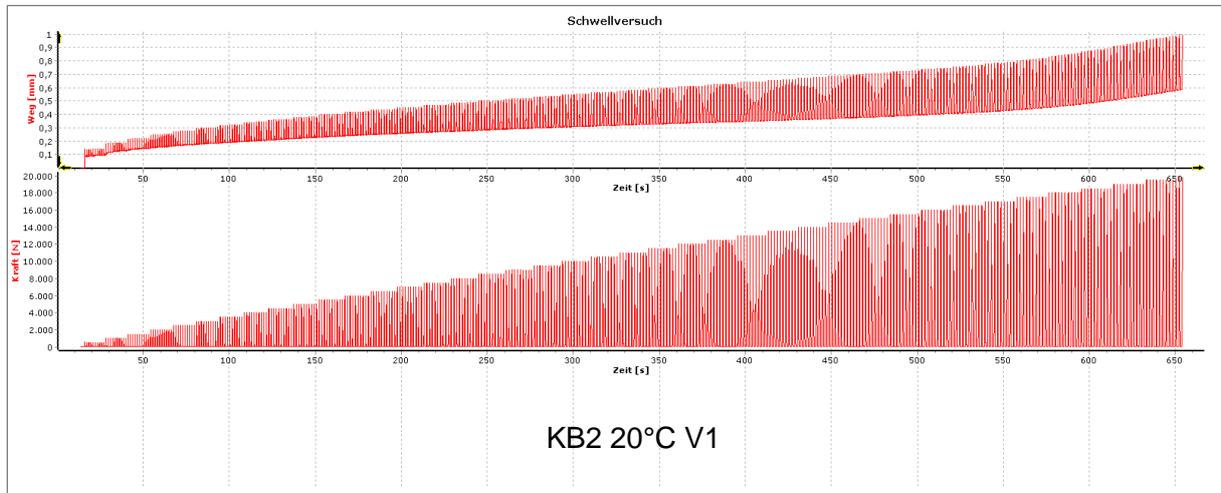
Baustoffgemisch KB1, T = 50°C

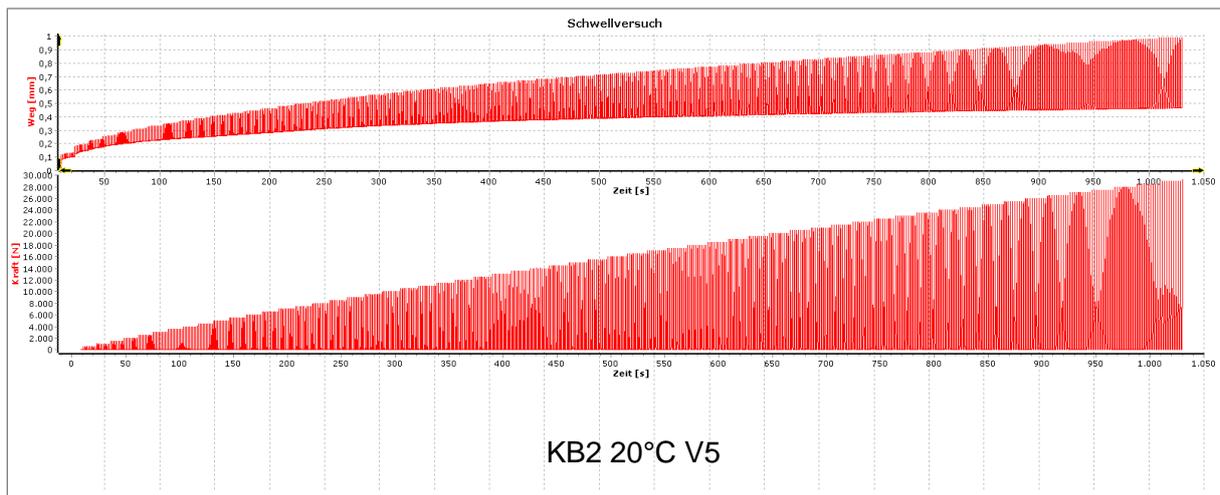
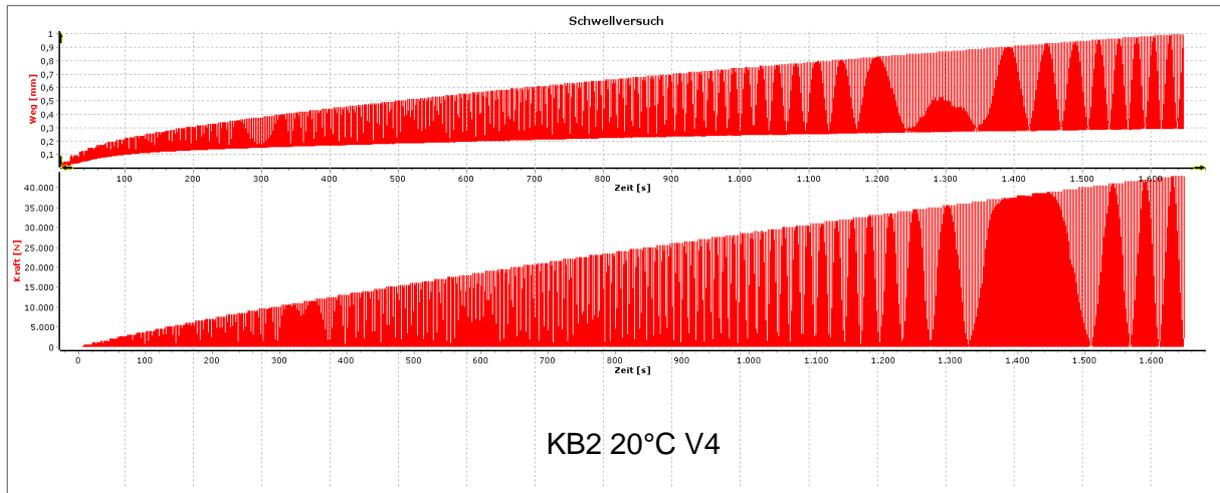




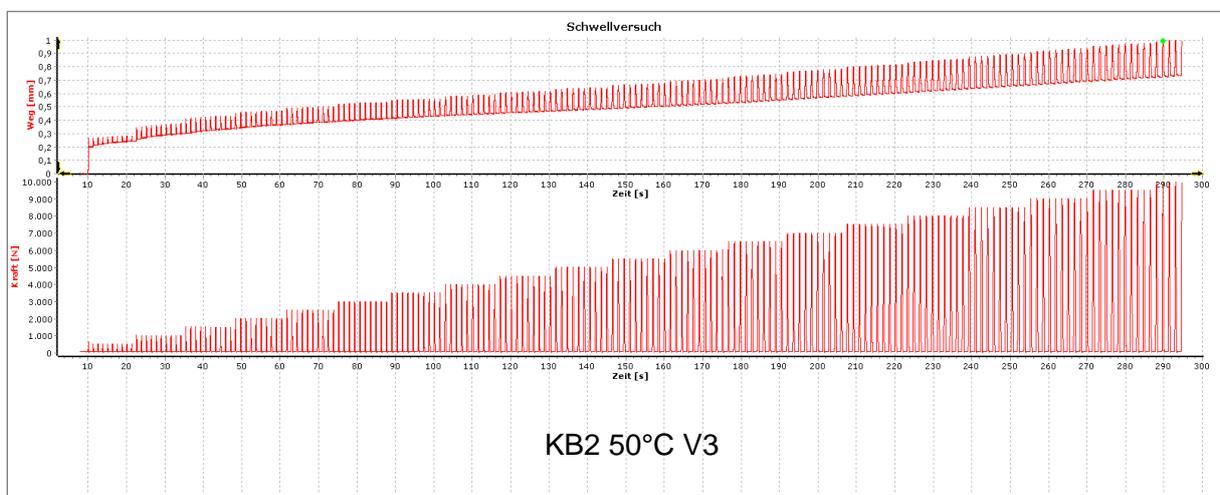
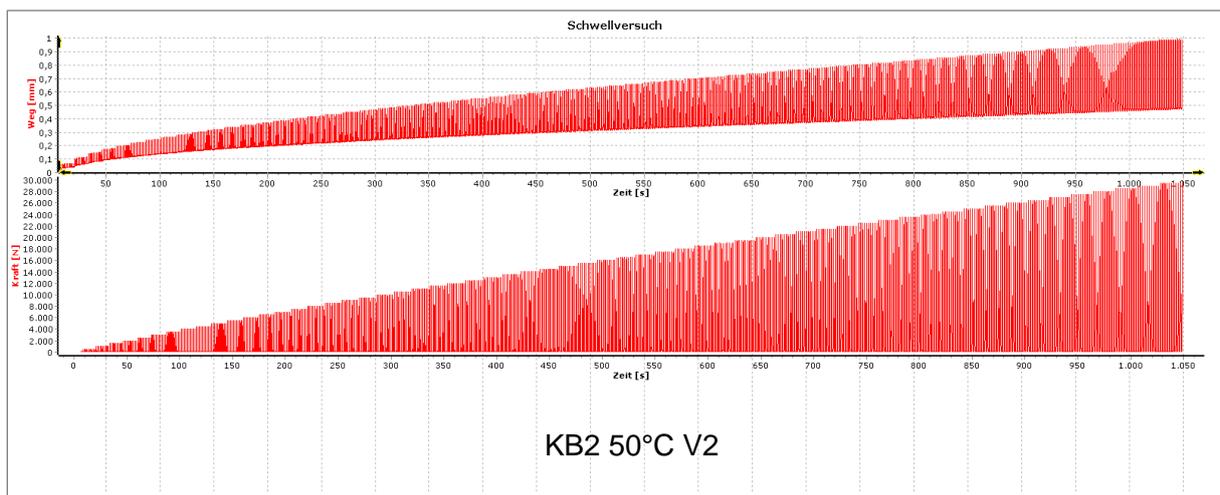
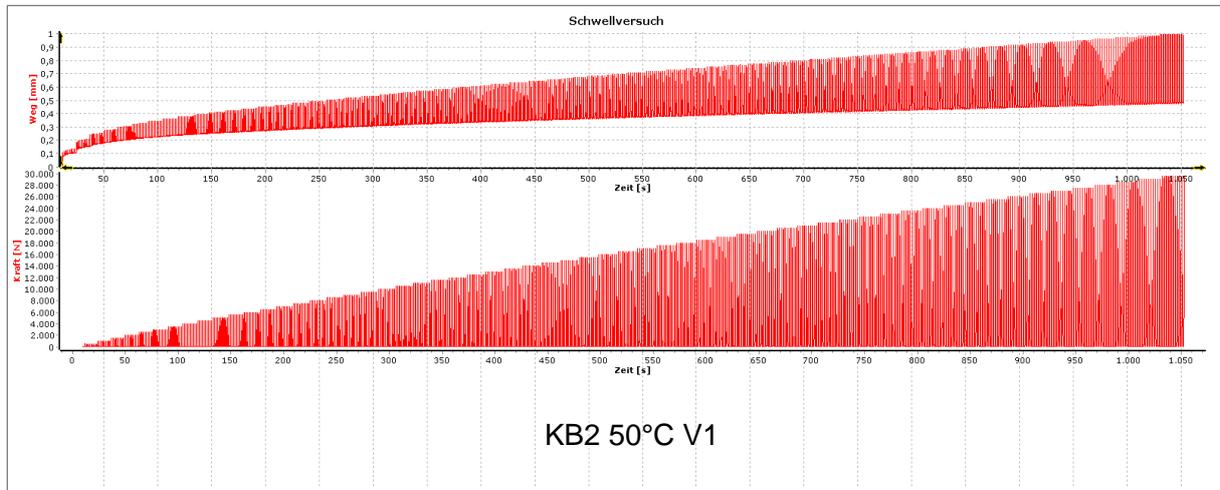
Anlage 6.4: Baustoffgemisch KB2

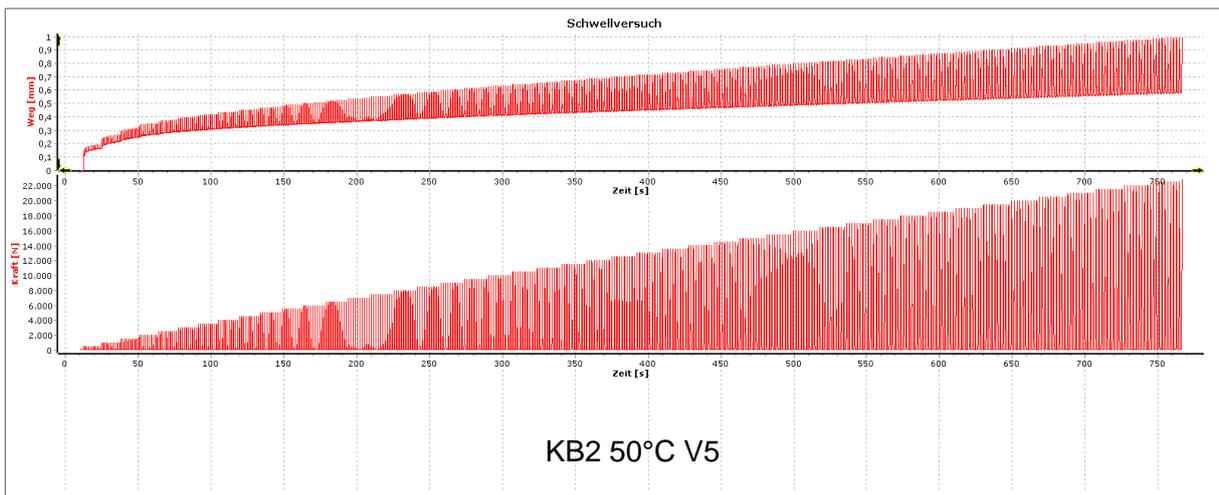
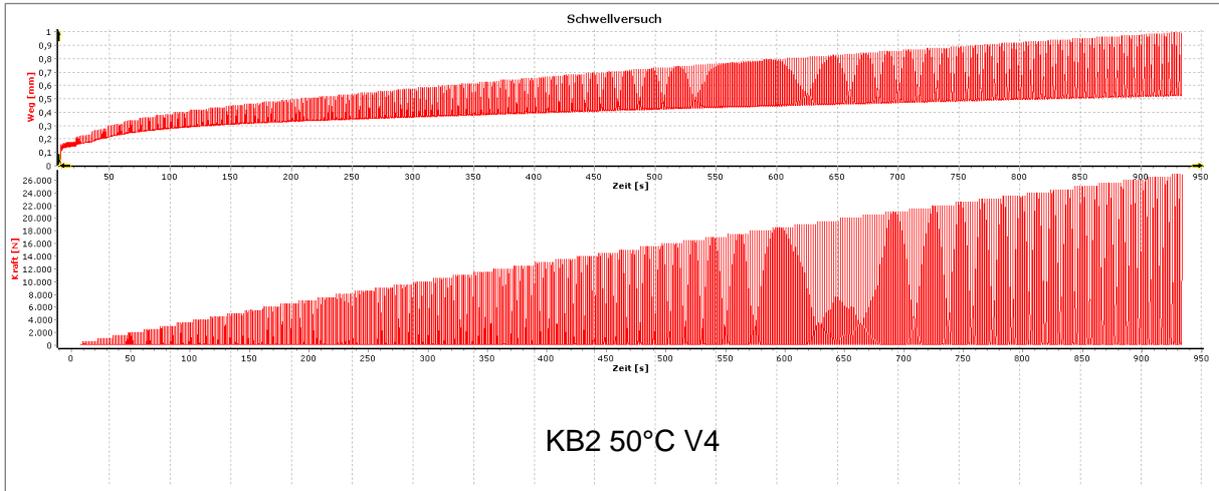
Baustoffgemisch KB2, T = 20°C





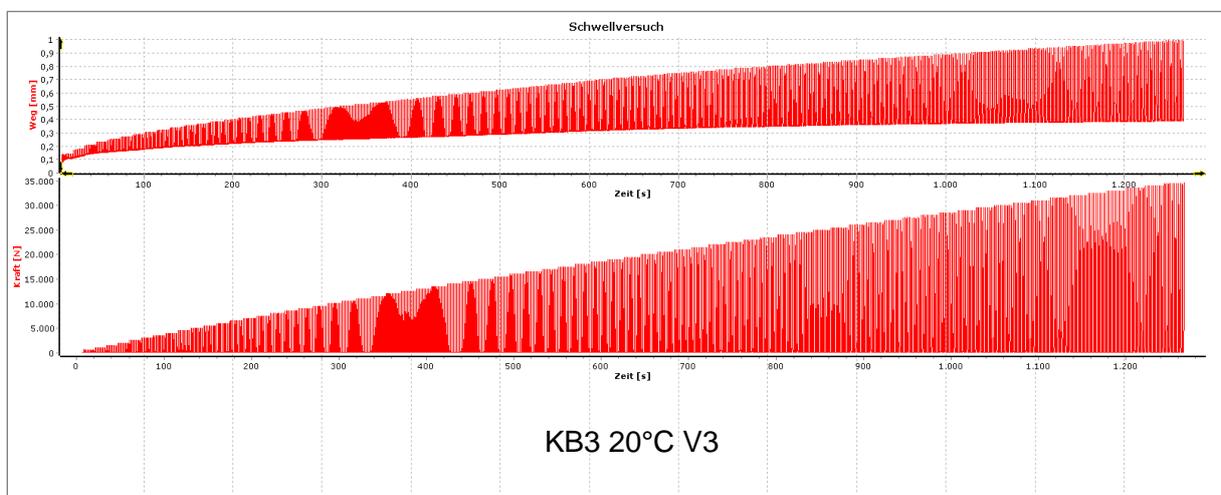
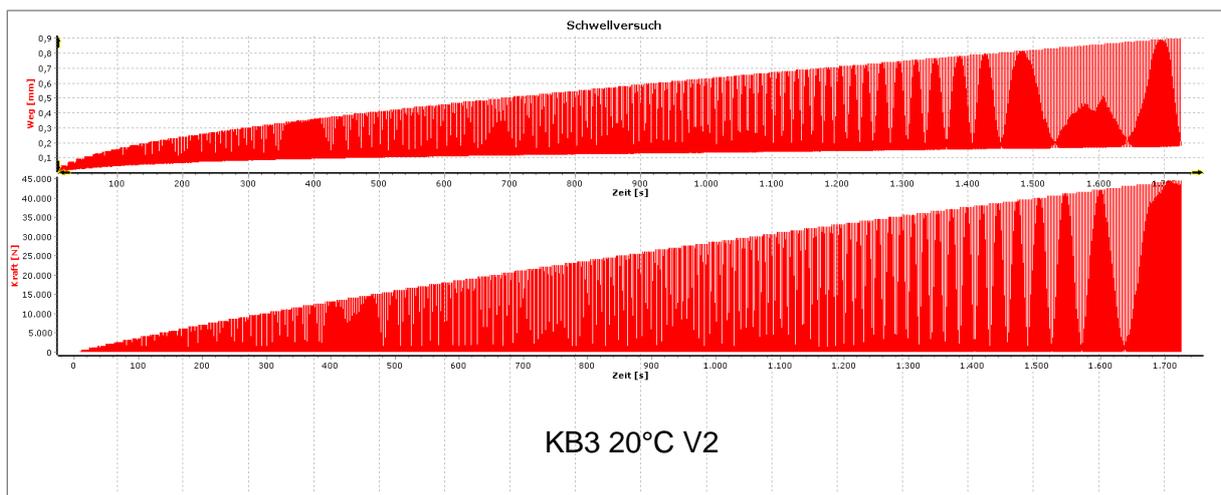
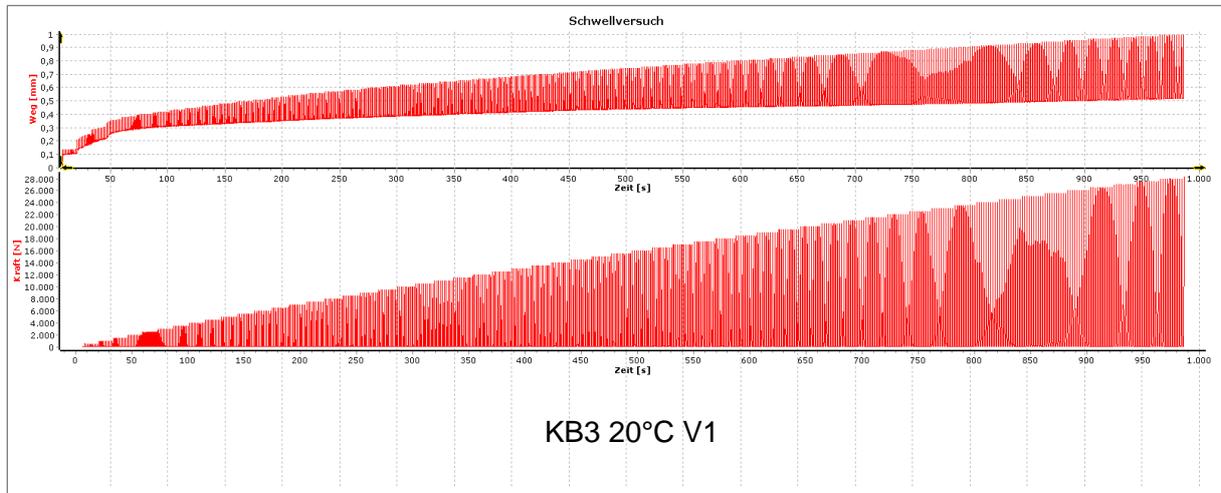
Baustoffgemisch KB2, T = 50°C

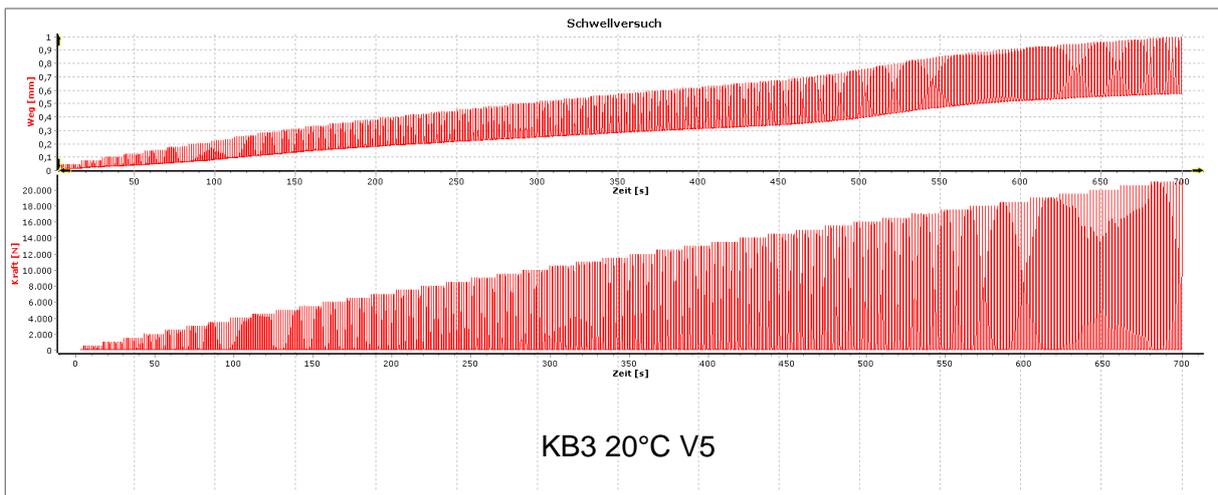
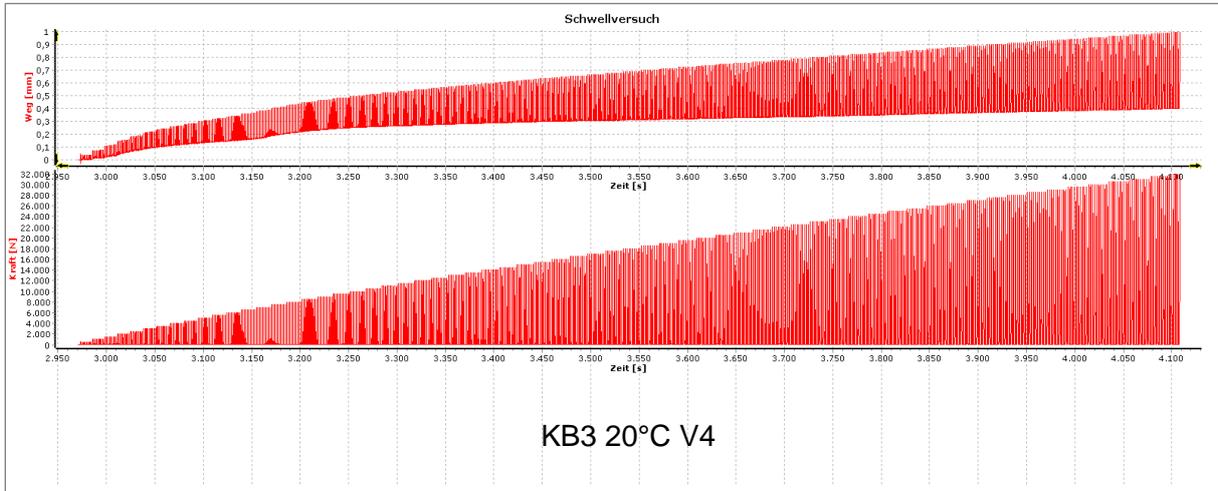




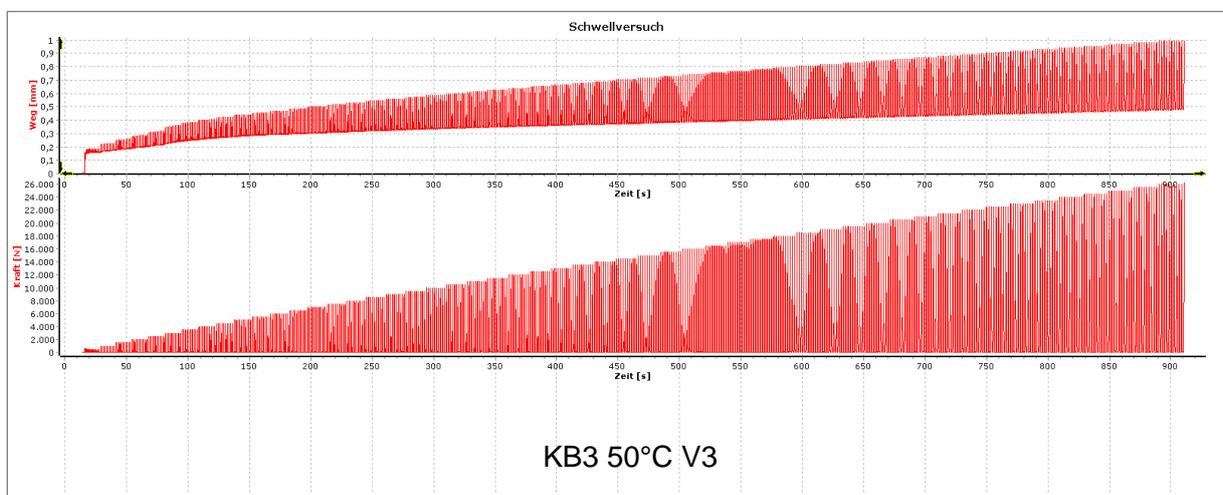
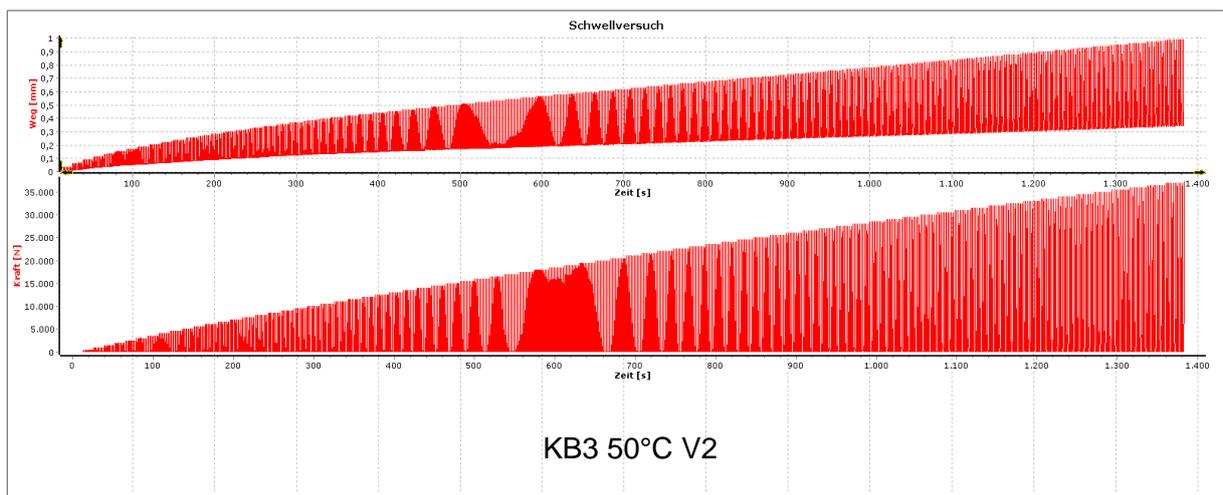
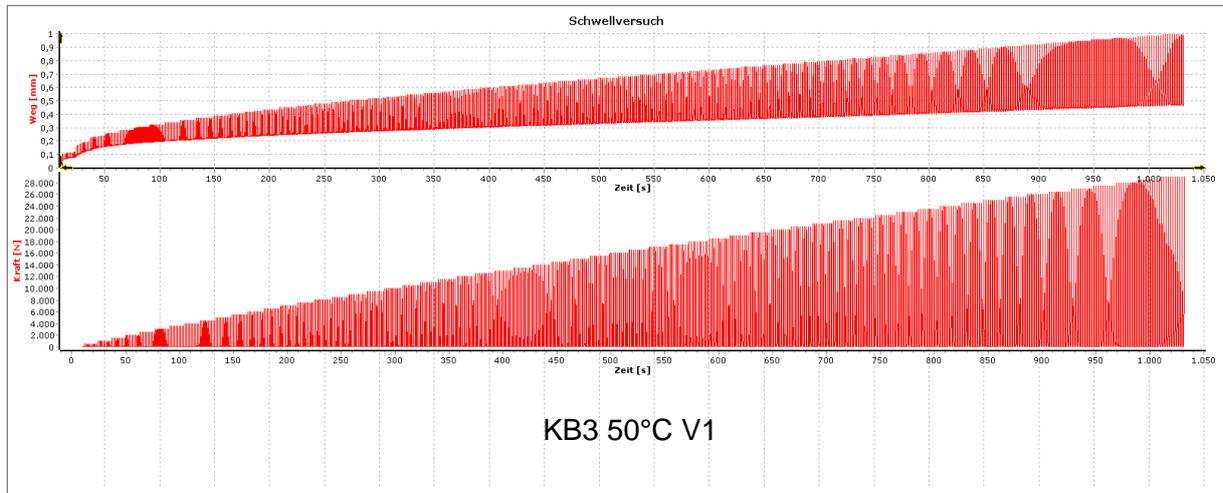
Anlage 6.5: Baustoffgemisch KB3

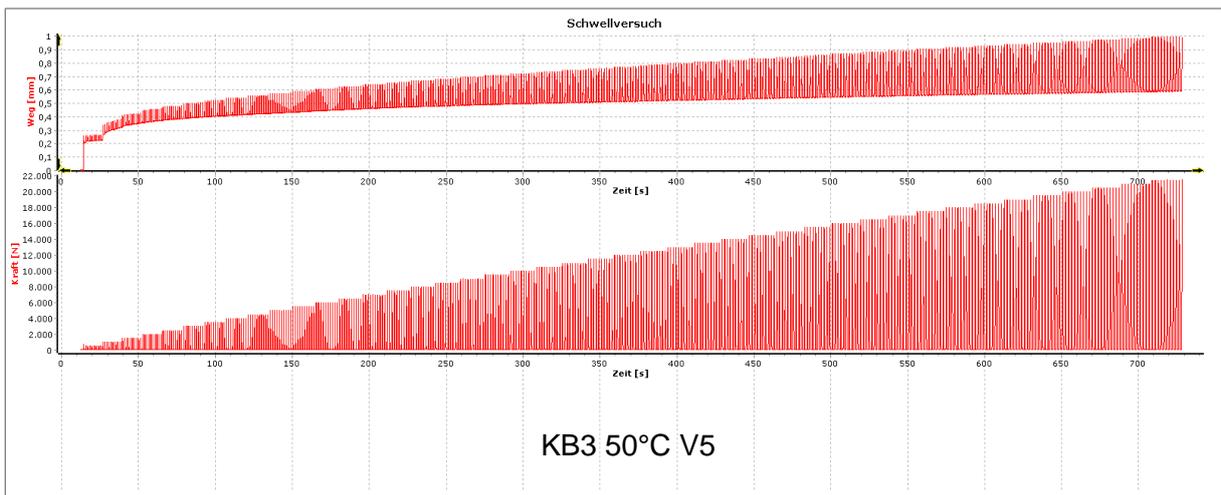
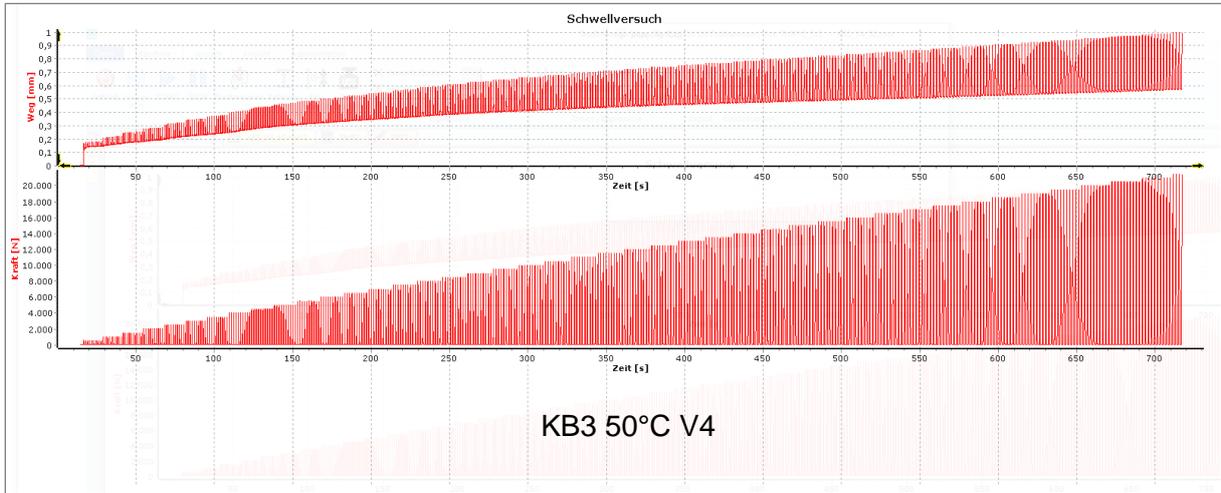
Baustoffgemisch KB3, T = 20°C





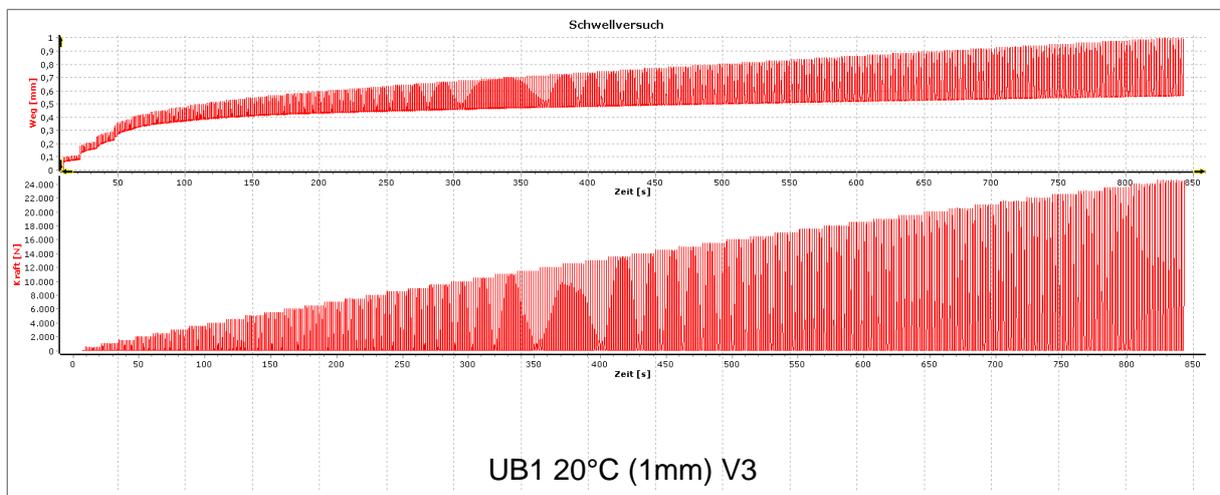
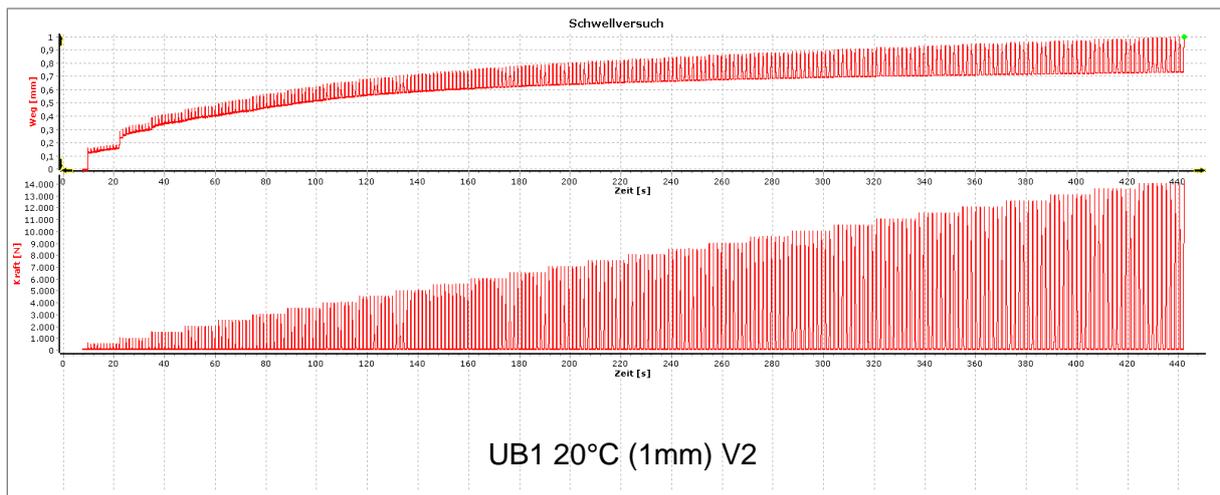
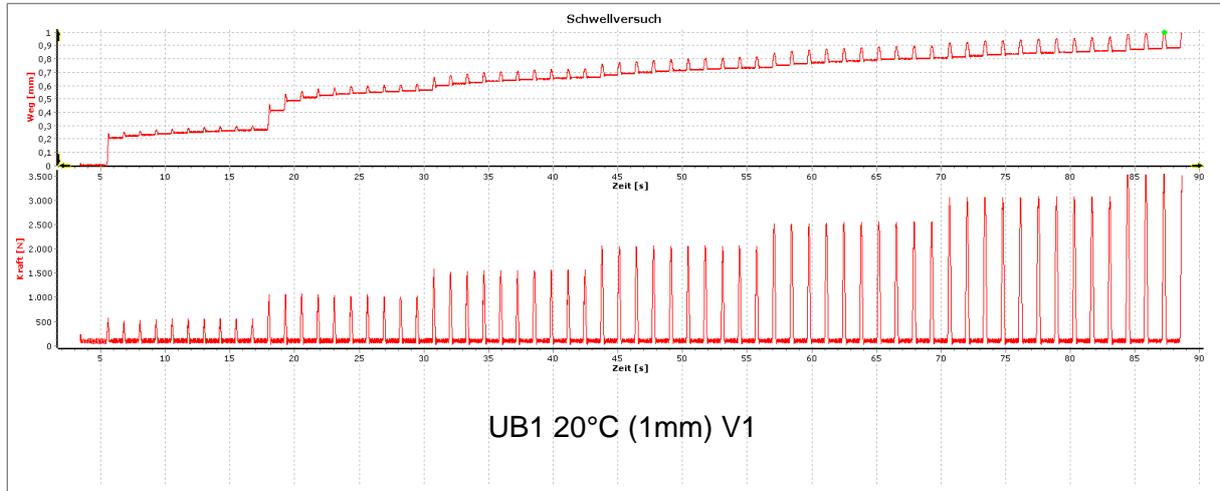
Baustoffgemisch KB3, T = 50°C

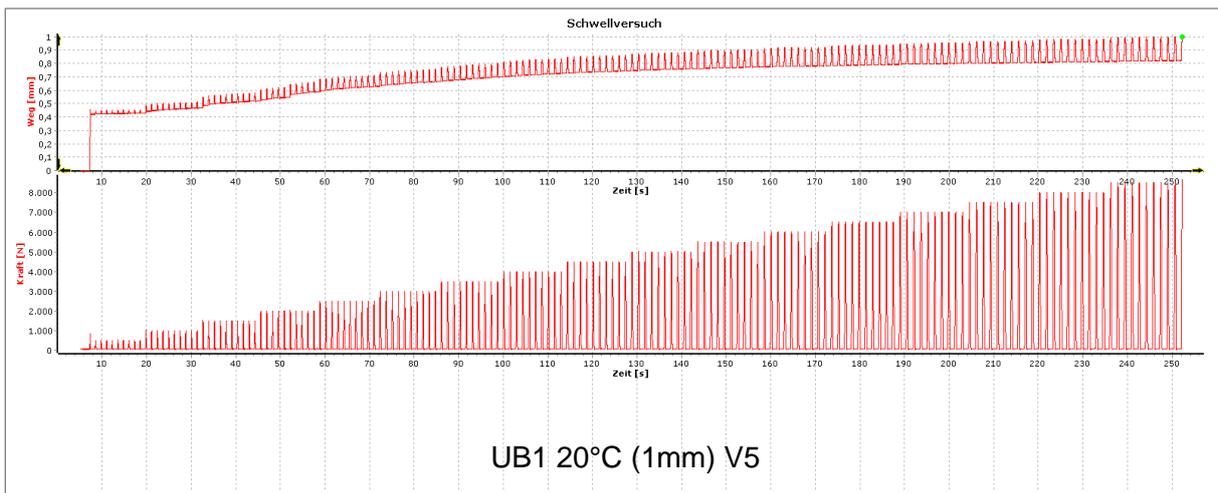
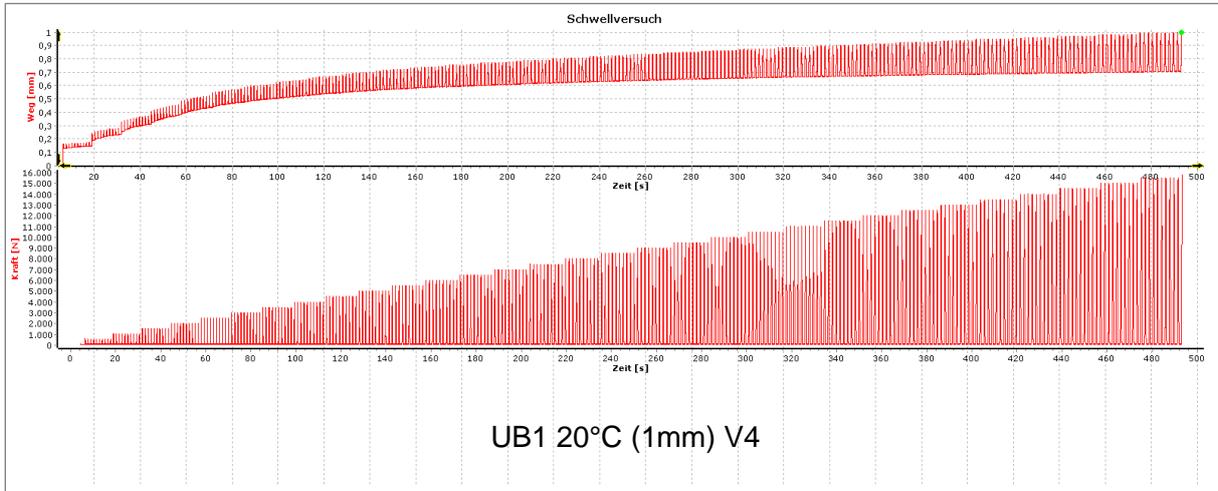




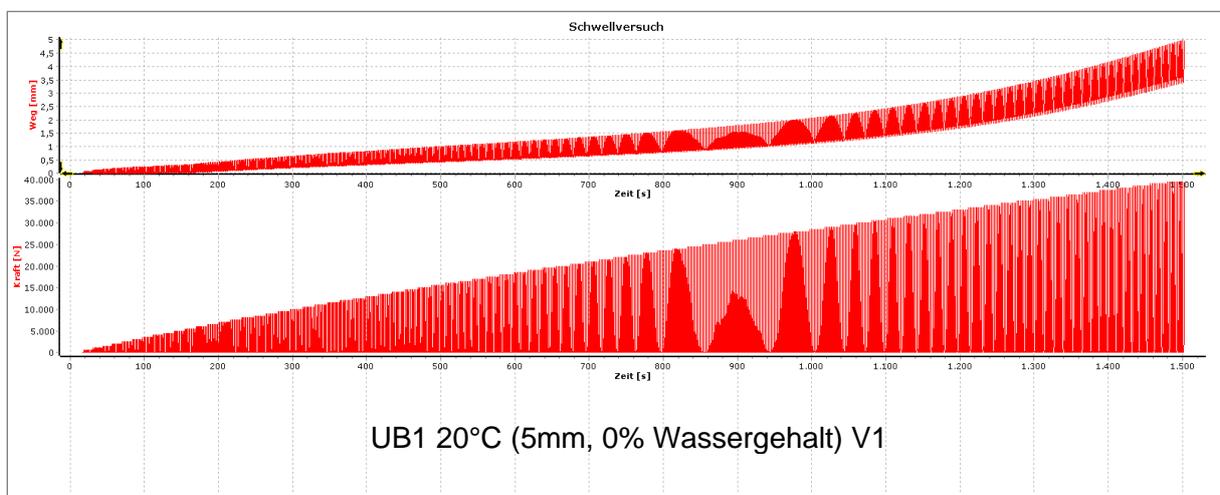
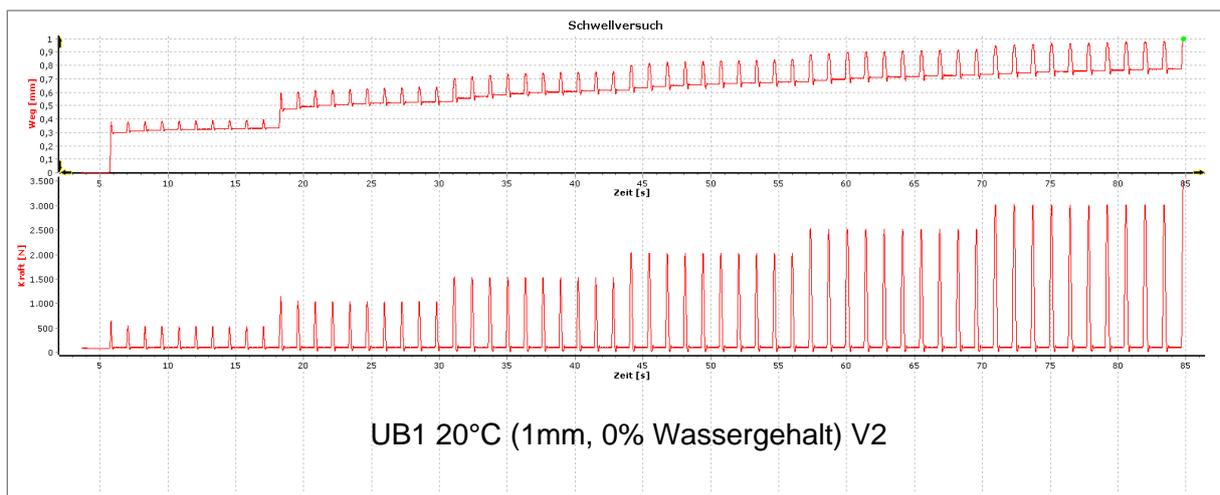
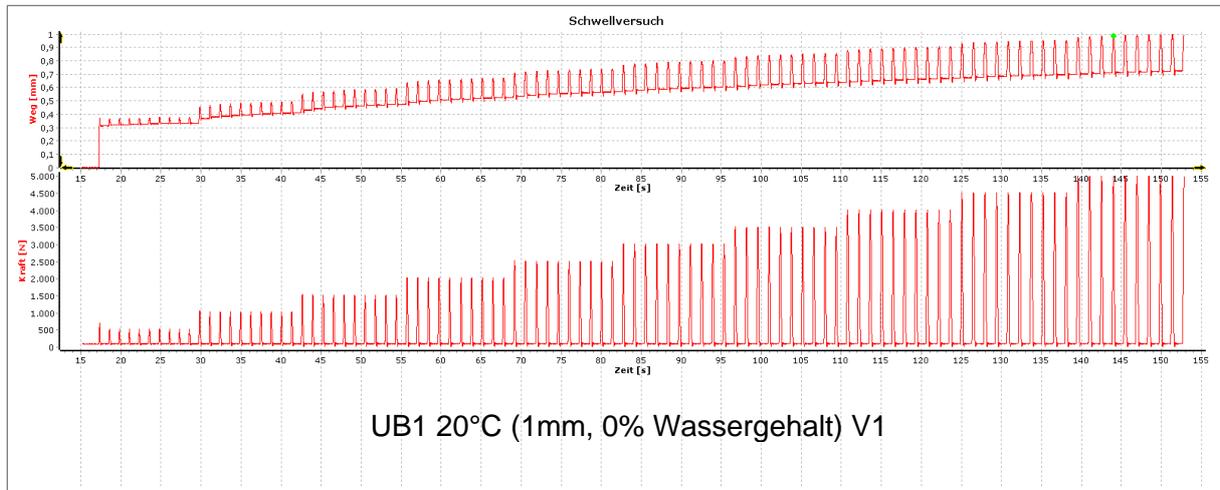
Anlage 6.6: Baustoffgemisch UB1

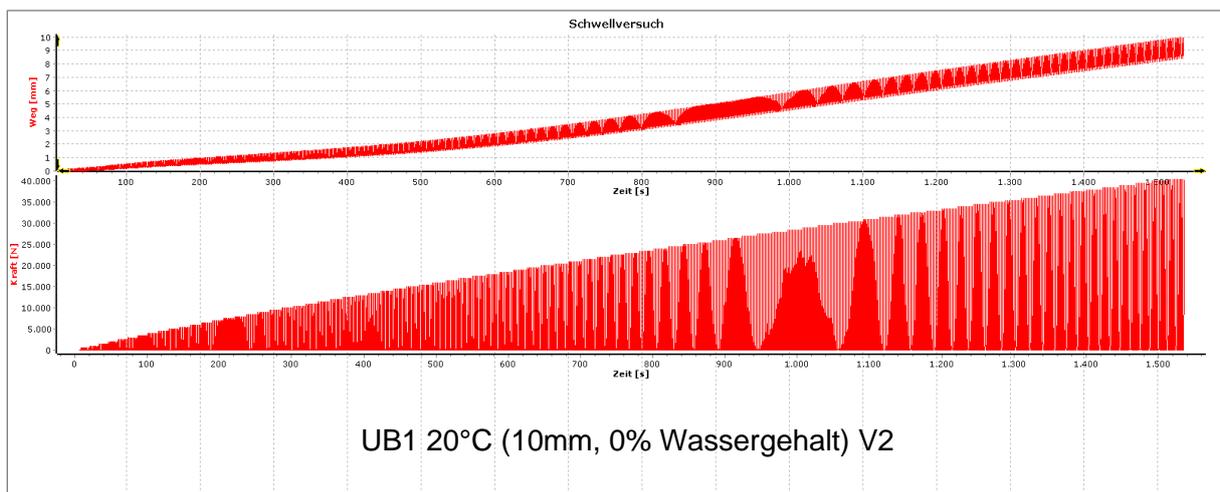
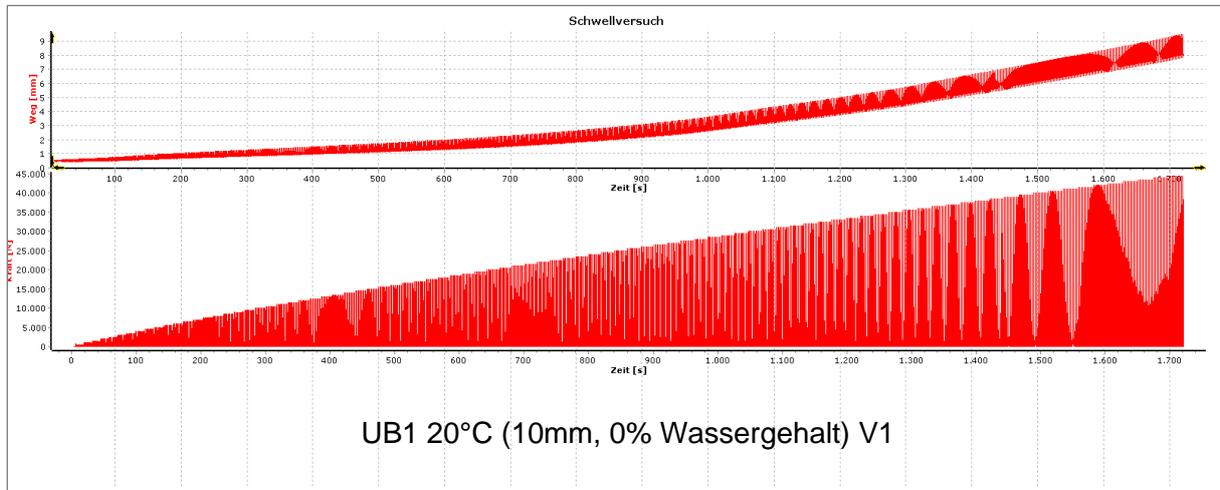
Baustoffgemisch UB1, T = 20°C (1mm, Marshallprobkörper)



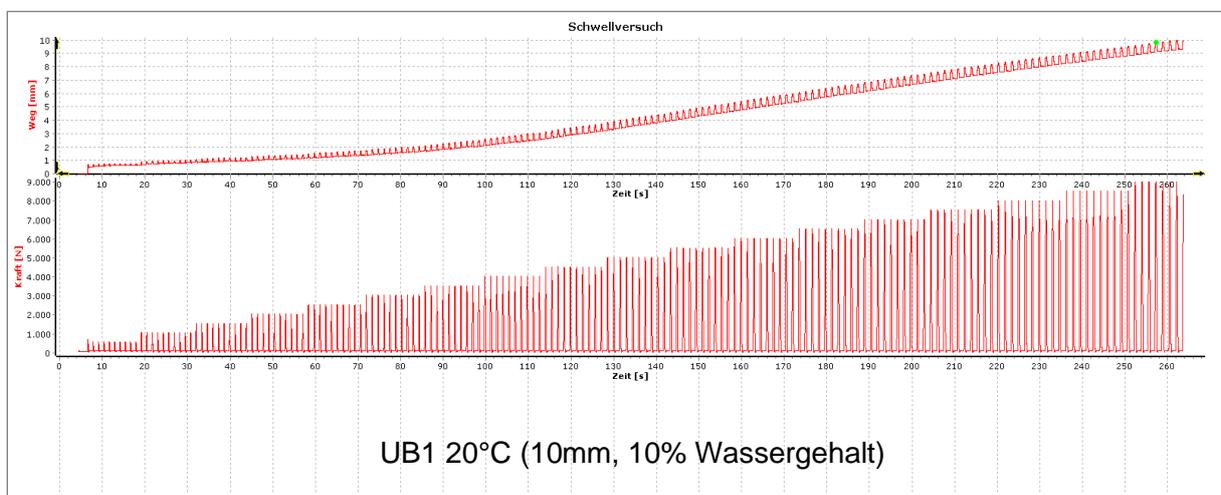
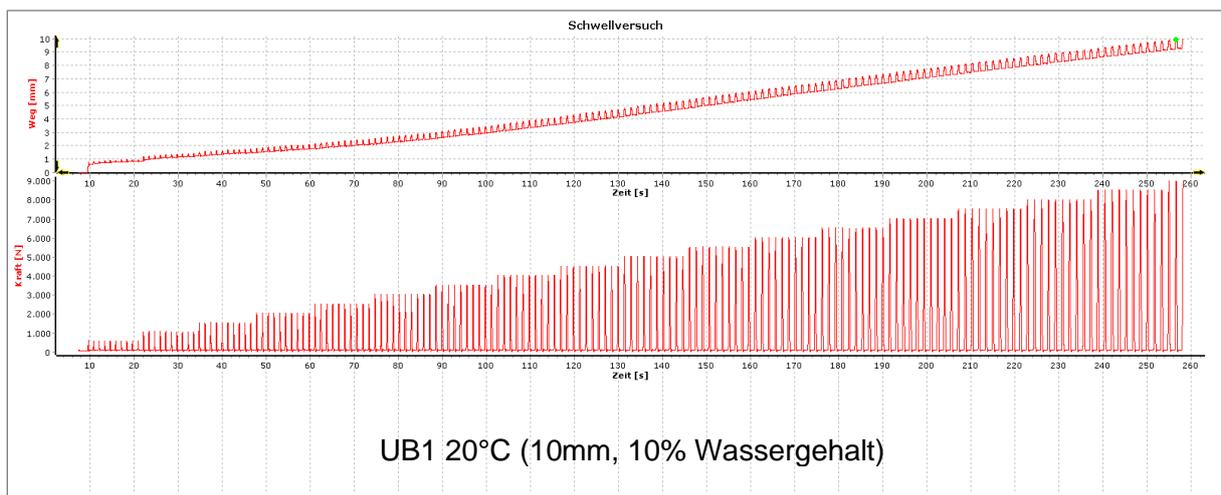
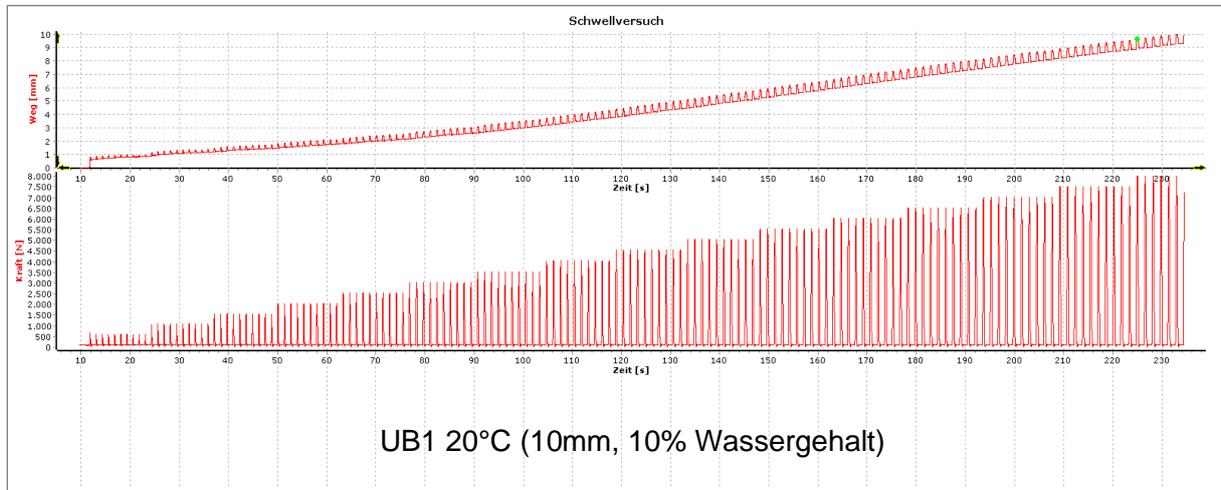


Baustoffgemisch UB1, T = 20°C (0% Wassergehalt)

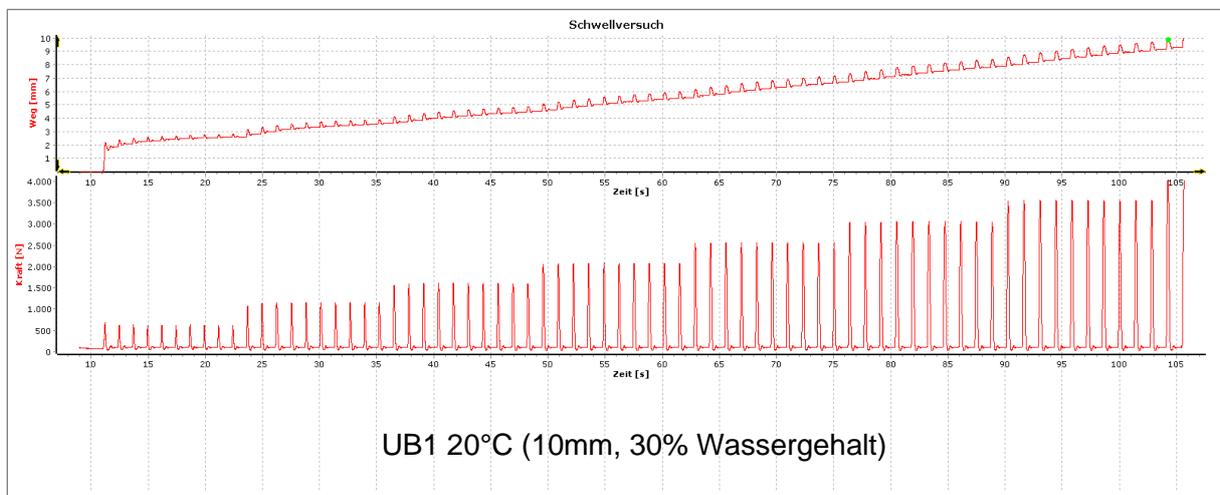
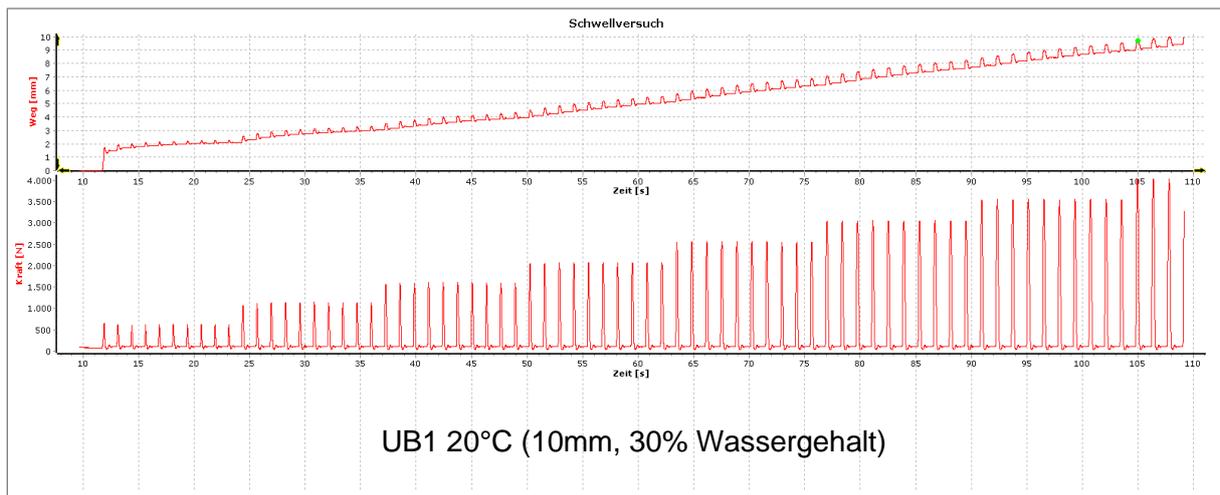
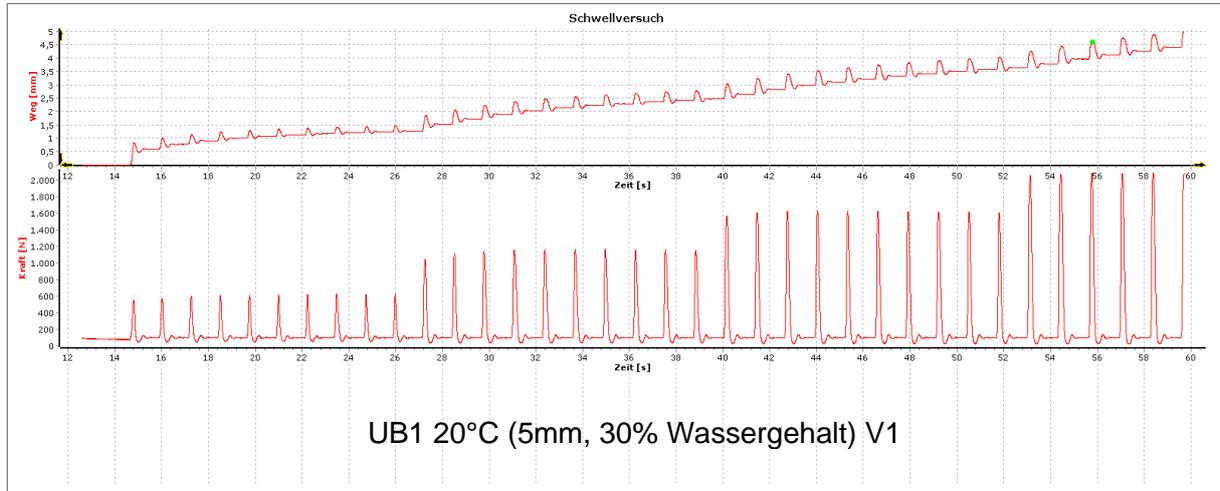


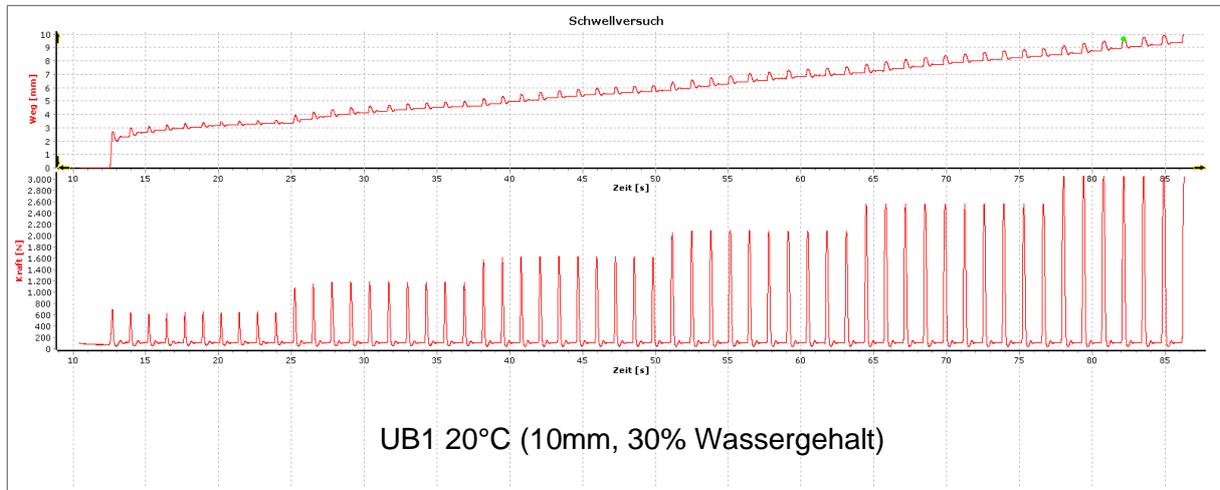


Baustoffgemisch UB1, T = 20°C (10% Wassergehalt)



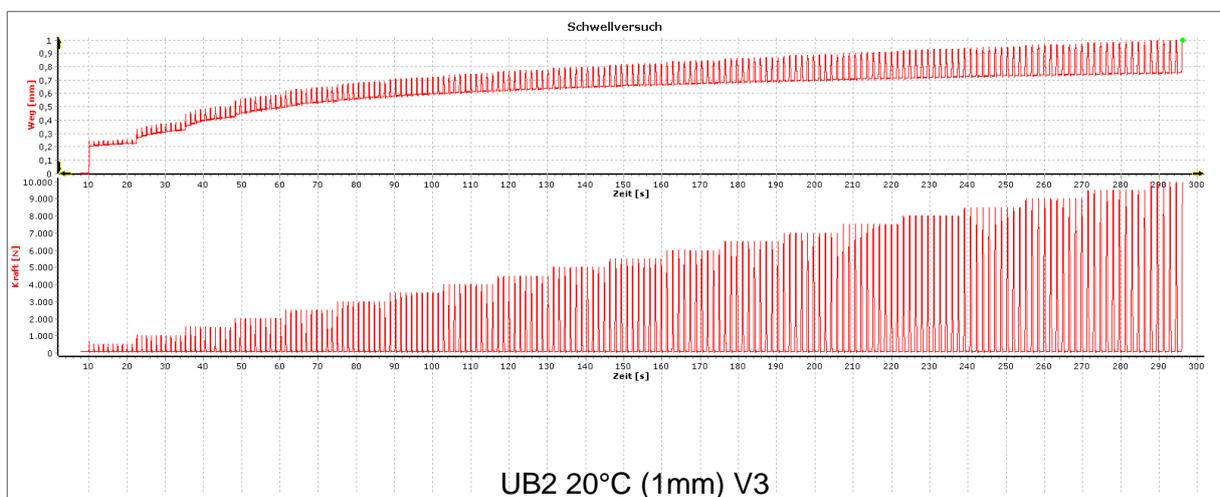
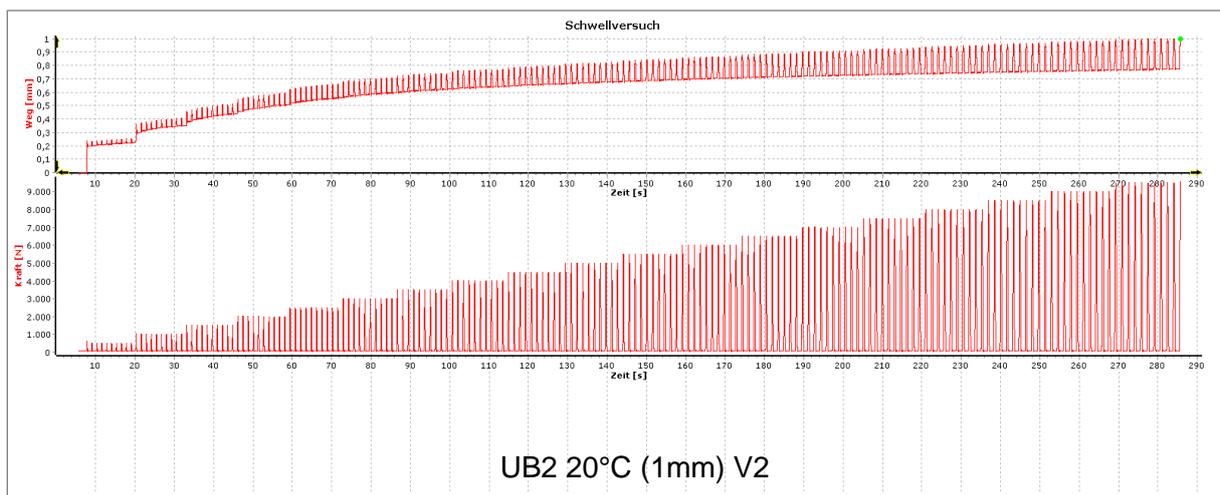
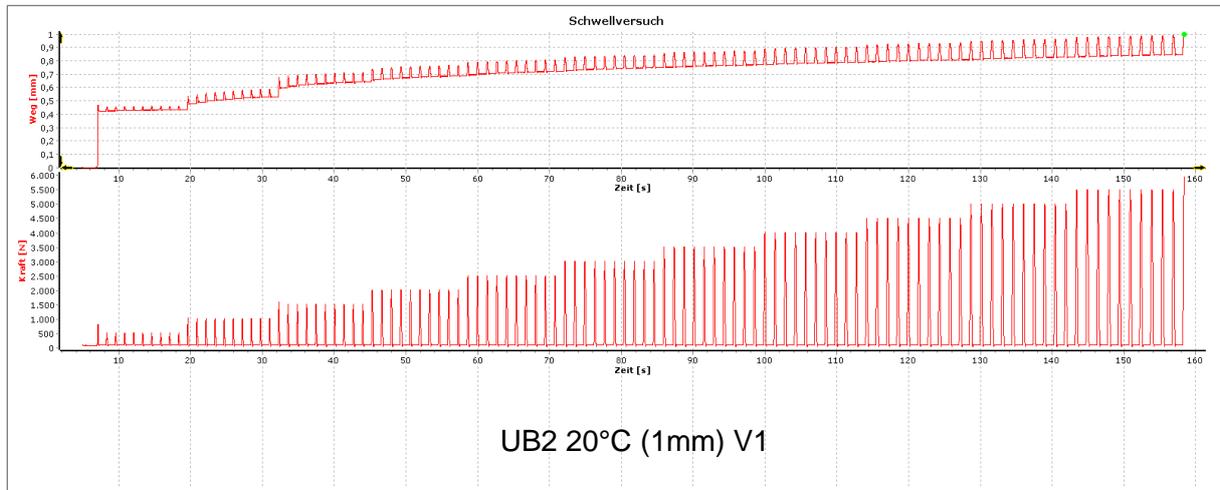
Baustoffgemisch UB1, T = 20°C (30% Wassergehalt)

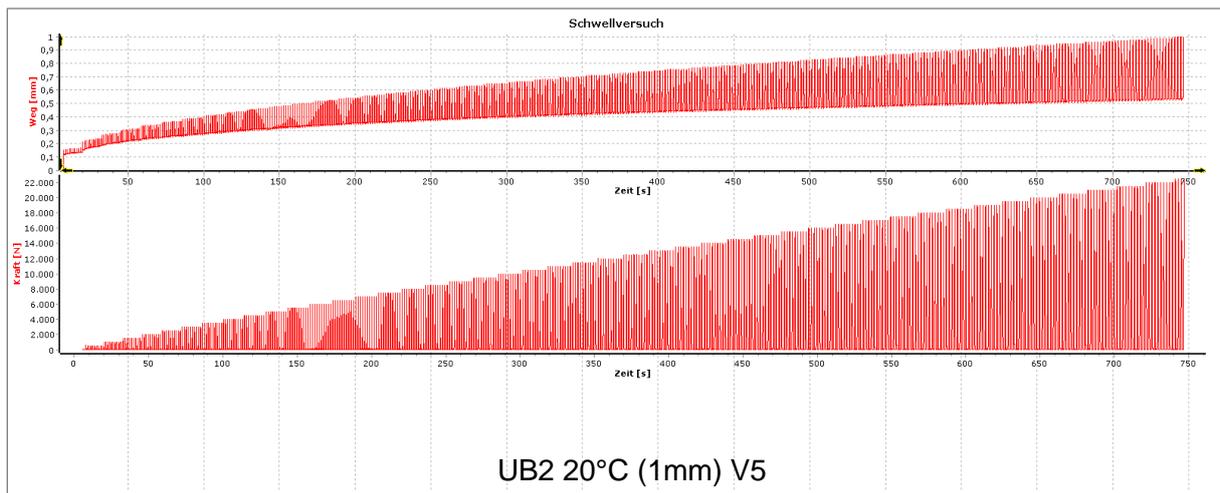
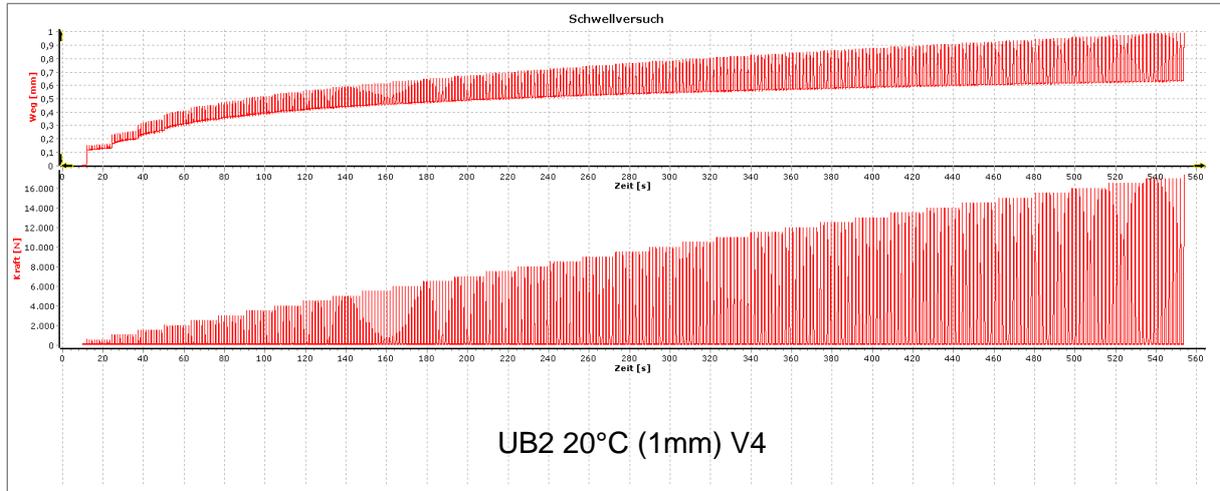




Anlage 6.7: Baustoffgemisch UB2

Baustoffgemisch UB2, T = 20°C





Anlage 7: Erosionswiderstand gegenüber strömendem Wasser

Zeitraffer Videos als digitale Anlage:

Ordner:	Anlage D7.1 Fliessgeschwindigkeit 0_6_m_s	
Inhalt:	Anlage D7.1 Fliessgeschwindigkeit 0_6_m_s_UB1	Mp4
	Anlage D7.1 Fliessgeschwindigkeit 0_6_m_s_UB2	Mp4
Ordner:	Anlage D7.2 Fliessgeschwindigkeit 0_6_m_s_beschädigt	
Inhalt:	Anlage D7.2 Fliessgeschwindigkeit 0_6_m_s_beschaedigt_UB1	Mp4
	Anlage D7.2 Fliessgeschwindigkeit 0_6_m_s_beschaedigt_UB2	Mp4
Ordner:	Anlage D7.3 Probekörperausbau	
Inhalt:	D7.3 Probekörperausbau	Mp4

Tab. A.21: Ergebnisse der Versuche zum Erosionswiderstand für UB1 bei $v = 0,3$ m/s

		PK 1			PK 2			PK 3		
t [h]	v m/s	Mess- punkt 1	Mess- punkt 2	Mess- punkt 3	Mess- punkt 1	Mess- punkt 2	Mess- punkt 3	Mess- punkt 1	Mess- punkt 2	Mess- punkt 3
		Δh [cm]								
0	0,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,3	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00
3	0,3	0,01	0,01	0,02	0,05	0,05	0,04	0,02	0,04	0,05
5	0,3	0,07	0,10	0,09	0,12	0,14	0,12	0,13	0,10	0,12
12	0,3	0,25	0,25	0,25	0,28	0,26	0,26	0,25	0,24	0,25
24	0,3	0,48	0,45	0,45	0,45	0,44	0,45	0,41	0,40	0,40
48	0,3	0,53	0,49	0,50	0,55	0,50	0,52	0,55	0,52	0,50
72	0,3	0,55	0,52	0,55	0,56	0,52	0,55	0,57	0,54	0,55
96	0,3	0,55	0,55	0,55	0,56	0,54	0,56	0,57	0,57	0,57
120	0,3	0,55	0,55	0,55	0,56	0,54	0,56	0,57	0,57	0,57

Tab. A.22: Ergebnisse der Versuche zum Erosionswiderstand für UB1 bei $v = 0,4$ m/s

		PK 1			PK 2			PK 3		
t [h]	v m/s	Mess- punkt 1	Mess- punkt 2	Mess- punkt 3	Mess- punkt 1	Mess- punkt 2	Mess- punkt 3	Mess- punkt 1	Mess- punkt 2	Mess- punkt 3
		Δh [cm]								
0	0,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,4	0,00	0,00	0,00	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,4	0,02	0,01	0,02	0,04	0,05	0,04	0,02	0,05	0,05
5	0,4	0,07	0,14	0,12	0,10	0,15	0,18	0,15	0,15	0,15
12	0,4	0,27	0,25	0,27	0,28	0,25	0,26	0,27	0,25	0,25
24	0,4	0,5	0,35	0,45	0,50	0,45	0,45	0,45	0,40	0,45
48	0,4	0,52	0,45	0,50	0,55	0,50	0,54	0,55	0,49	0,50
72	0,4	0,52	0,52	0,50	0,55	0,53	0,55	0,58	0,54	0,55
96	0,4	0,55	0,55	0,55	0,55	0,54	0,55	0,58	0,58	0,58
120	0,4	0,55	0,55	0,55	0,55	0,54	0,55	0,58	0,58	0,58

Tab. A.23: Ergebnisse der Versuche zum Erosionswiderstand für UB1 bei $v = 0,6 \text{ m/s}$

		PK 1			PK 2			PK 3		
t [h]	v m/s	Mess- punkt 1	Mess- punkt 2	Mess- punkt 3	Mess- punkt 1	Mess- punkt 2	Mess- punkt 3	Mess- punkt 1	Mess- punkt 2	Mess- punkt 3
		Δh [cm]								
0	0,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,6	0,00	0,00	0,00	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,6	0,03	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03	0,02	0,05	0,05
5	0,6	0,05	0,15	0,15	0,07	0,15	0,20	0,05	0,15	0,15
12	0,6	0,25	0,25	0,25	0,30	0,25	0,25	0,27	0,25	0,25
24	0,6	0,5	0,35	0,45	0,50	0,35	0,45	0,45	0,35	0,45
48	0,6	0,55	0,45	0,50	0,58	0,50	0,54	0,55	0,49	0,50
72	0,6	0,55	0,50	0,50	0,59	0,53	0,54	0,55	0,54	0,55
96	0,6	0,55	0,52	0,52	0,59	0,54	0,54	0,55	0,54	0,55
120	0,6	0,55	0,52	0,52	0,57	0,54	0,54	0,55	0,54	0,55

Tab. A.24: Ergebnisse der Versuche zum Erosionswiderstand für UB2 bei $v = 0,3 \text{ m/s}$

		PK 1			PK 2			PK 3		
t [h]	v m/s	Mess- punkt 1	Mess- punkt 2	Mess- punkt 3	Mess- punkt 1	Mess- punkt 2	Mess- punkt 3	Mess- punkt 1	Mess- punkt 2	Mess- punkt 3
		Δh [cm]								
0	0,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,3	-0,02	0,00	0,00	-0,01	-0,00	0,00	-0,00	-0,00	0,00
5	0,3	-0,02	-0,01	-0,01	-0,03	-0,02	-0,02	-0,02	-0,00	-0,00
12	0,3	-0,04	-0,04	-0,03	-0,05	-0,03	-0,03	-0,04	-0,02	-0,02
24	0,3	-0,04	-0,04	-0,03	-0,05	-0,03	-0,03	-0,04	-0,03	-0,03
48	0,3	-0,04	-0,04	-0,03	-0,05	-0,03	-0,03	-0,04	-0,03	-0,03
72	0,3	-0,04	-0,04	-0,03	-0,05	-0,03	-0,03	-0,04	-0,03	-0,03
96	0,3	-0,04	-0,04	-0,03	-0,05	-0,03	-0,03	-0,04	-0,03	-0,03
120	0,3	-0,04	-0,04	-0,03	-0,05	-0,03	-0,03	-0,04	-0,03	-0,03

Tab. A.25: Ergebnisse der Versuche zum Erosionswiderstand für UB2 bei $v = 0,4$ m/s

		PK 1			PK 2			PK 3		
t	v	Mess-								
		punkt								
h	m/s	1	2	3	1	2	3	1	2	3
		Δh								
		[cm]								
0	0,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,4	-0,02	0,00	0,00	-0,01	-0,00	0,00	-0,01	-0,00	0,01
5	0,4	-0,02	-0,01	-0,02	-0,03	-0,02	-0,02	-0,03	-0,00	-0,02
12	0,4	-0,02	-0,02	-0,03	-0,05	-0,04	-0,03	-0,05	-0,02	-0,03
24	0,4	-0,02	-0,02	-0,03	-0,05	-0,04	-0,03	-0,05	-0,05	-0,03
48	0,4	-0,02	-0,02	-0,03	-0,05	-0,04	-0,03	-0,05	-0,05	-0,03
72	0,4	-0,03	-0,02	-0,03	-0,05	-0,04	-0,03	-0,05	-0,05	-0,03
96	0,4	-0,03	-0,02	-0,03	-0,05	-0,04	-0,03	-0,05	-0,05	-0,04
120	0,4	-0,03	-0,02	-0,03	-0,05	-0,04	-0,03	-0,05	-0,05	-0,04

Tab. A.26: Ergebnisse der Versuche zum Erosionswiderstand für UB2 bei $v = 0,6$ m/s

		PK 1			PK 2			PK 3		
t	v	Mess-								
		punkt								
h	m/s	1	2	3	1	2	3	1	2	3
		Δh								
		[cm]								
0	0,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,6	-0,05	0,00	0,00	-0,02	-0,05	0,00	-0,08	-0,03	0,00
5	0,6	-0,05	-0,05	-0,03	-0,03	-0,05	-0,05	-0,10	-0,05	-0,03
12	0,6	-0,09	-0,08	-0,05	-0,03	-0,15	-0,05	-0,12	-0,10	-0,05
24	0,6	-0,09	-0,10	-0,11	-0,03	-0,15	-0,10	-0,15	-0,12	-0,11
48	0,6	-0,12	-0,10	-0,12	-0,05	-0,15	-0,10	-0,20	-0,16	-0,15
72	0,6	-0,12	-0,10	-0,13	-0,05	-0,15	-0,10	-0,20	-0,16	-0,15
96	0,6	-0,12	-0,10	-0,13	-0,05	-0,15	-0,10	-0,20	-0,16	-0,15
120	0,6	-0,12	-0,10	-0,13	-0,05	-0,15	-0,10	-0,20	-0,16	-0,15

Anlage 8: Widerstand gegen steigenden Grundwasserstand

Zeitraffer Videos als digitale Anlage:

Ordner:	Anlage D8 Videos Widerstand gegen steigenden Grundwasserstand	
Inhalt:	Anlage D8 Ansteigendes_GW_UB1	Mp4
	Anlage D8 Ansteigendes_GW_UB2	Mp4

Tab. A.27: Ergebnisse der Versuche zum Widerstand gegen steigenden Grundwasserstand für UB1

		PK 1			PK 2			PK 3		
Zeit	Wasserstand	Messpunkt 1	Messpunkt 2	Messpunkt 3	Messpunkt 1	Messpunkt 2	Messpunkt 3	Messpunkt 1	Messpunkt 2	Messpunkt 3
t	h	Δh								
[h]	[cm]									
0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,1	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,1	0,03	0,01	0,02	0,04	0,05	0,05	0,03	0,02	0,02
5	0,1	0,08	0,07	0,08	0,13	0,14	0,14	0,19	0,17	0,19
12	0,1	0,25	0,23	0,27	0,27	0,26	0,26	0,25	0,24	0,25
24	0,1	0,5	0,40	0,47	0,48	0,46	0,48	0,47	0,45	0,47
48	0,2	0,51	0,49	0,50	0,52	0,50	0,54	0,50	0,50	0,50
72	0,3	0,51	0,51	0,50	0,54	0,54	0,54	0,50	0,51	0,51
96	0,4	0,51	0,51	0,50	0,54	0,54	0,54	0,50	0,51	0,51
120	0,5	0,51	0,51	0,50	0,54	0,54	0,54	0,50	0,51	0,51

Tab. A.28: Ergebnisse der Versuche zum Widerstand gegen steigenden Grundwasserstand für UB2

		PK 1			PK 2			PK 3		
Zeit	Wasserstand	Messpunkt 1	Messpunkt 2	Messpunkt 3	Messpunkt 1	Messpunkt 2	Messpunkt 3	Messpunkt 1	Messpunkt 2	Messpunkt 3
t	h	Δh								
[h]	[cm]									
0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	0,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24	0,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
48	0,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
72	0,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
96	0,4	-0,15	-0,14	-0,19	-0,09	-0,08	-0,09	-0,12	-0,10	-0,13
120	0,5	-0,19	-0,14	-0,20	-0,13	-0,13	-0,15	*	-0,12	-0,17

* Probekörperkante abgesackt, keine Messung möglich

Fotodokumentation Vorversuche



UB1 PK1 t = 0 min



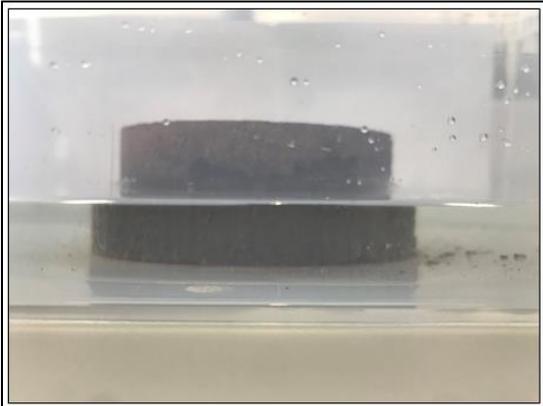
UB2 PK1 t = 0 min



UB1 PK1 t = 0 min



UB2 PK1 t = 0 min



UB1 PK1 t = 5 min



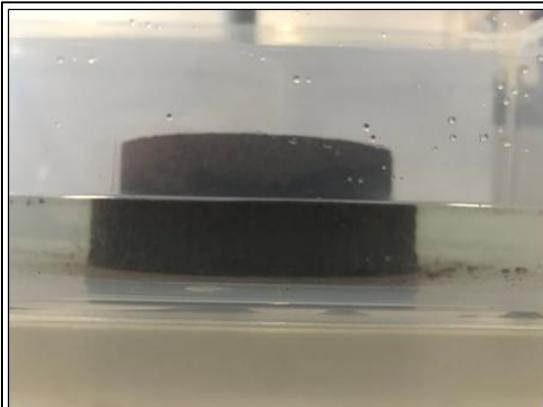
UB2 PK1 t = 5 min



UB1 PK1 t = 5 min



UB2 PK1 t = 5 min



UB1 PK1 t = 10 min



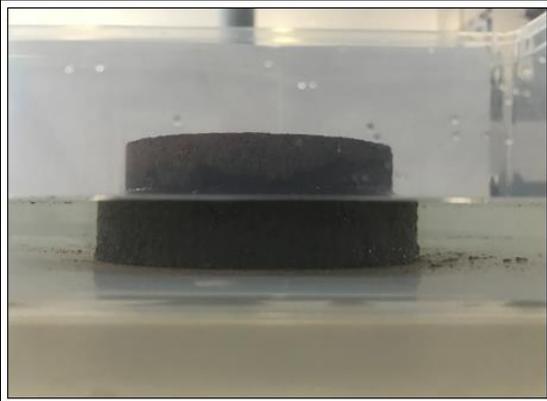
UB2 PK1 t = 10 min



UB1 PK1 t = 10 min



UB2 PK1 t = 10 min



UB1 PK1 t = 15 min



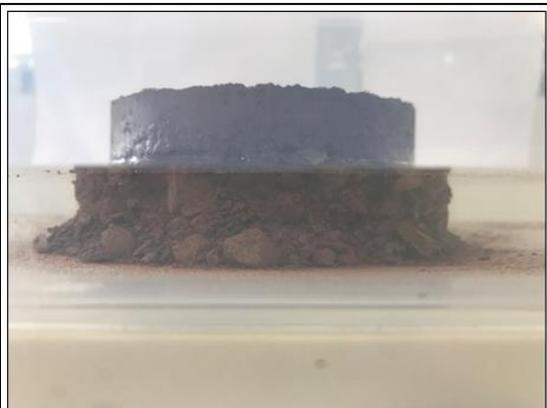
UB2 PK1 t = 15 min



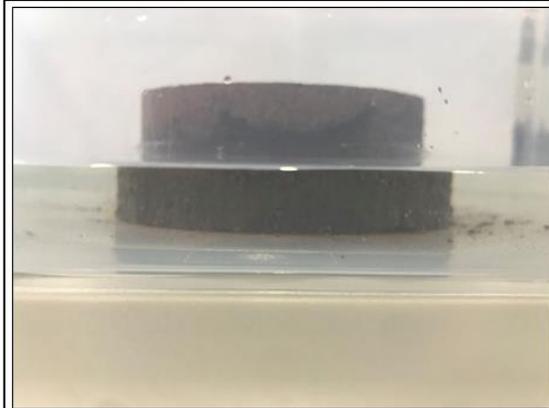
UB1 PK1 t = 15 min



UB2 PK1 t = 15 min



UB2 PK1 t = 30 min



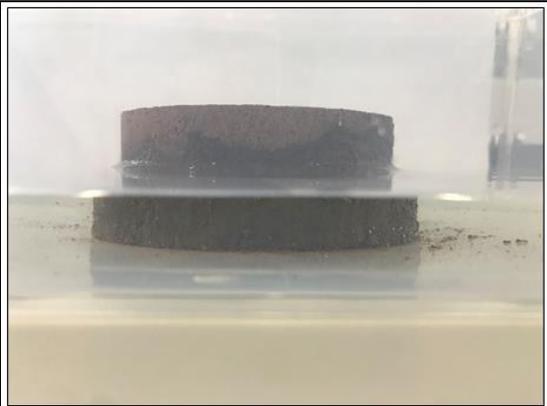
UB1 PK1 t = 30 min



UB2 PK1 t = 30 min



UB1 PK1 t = 30 min



UB1 PK1 t = 60 min



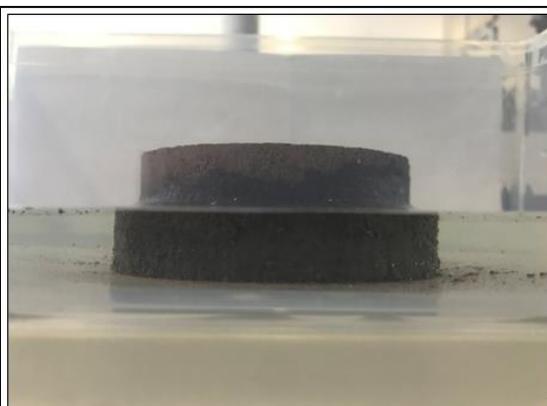
UB2 PK1 t = 60 min



UB1 PK1 t = 60 min



UB2 PK1 t = 60 min



UB1 PK1 t = 120 min



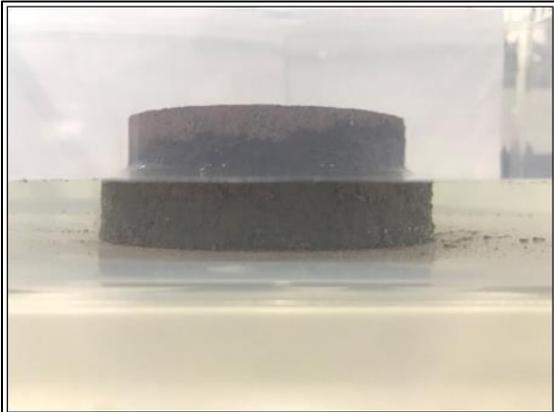
UB2 PK1 t = 120 min



UB1 PK1 t = 120 min



UB2 PK1 t = 120 min



UB1 PK1 t = 180 min



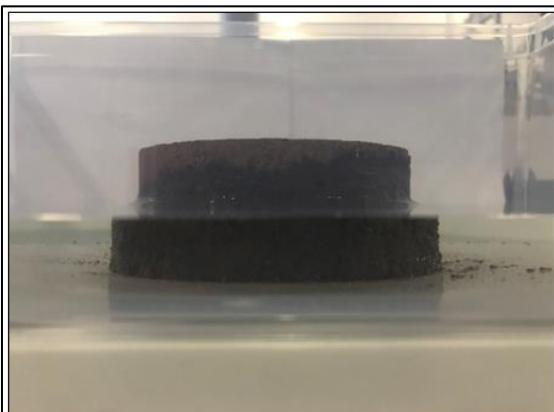
UB2 PK1 t = 180 min



UB1 PK1 t = 180 min



UB2 PK1 t = 180 min



UB1 PK1 t = 360 min



UB2 PK1 t = 360 min



UB1 PK1 t = 360 min



UB2 PK1 t = 360 min



UB1 PK1 t = 24 h



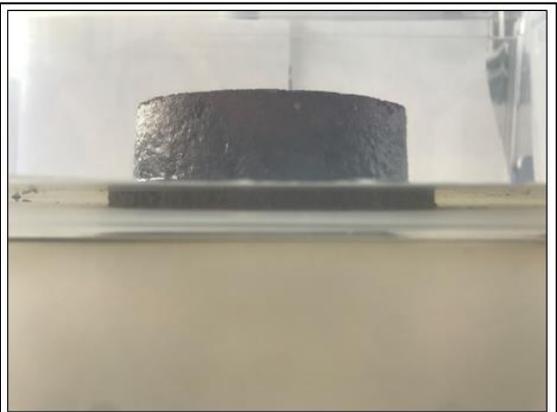
UB2 PK1 t = 24 h



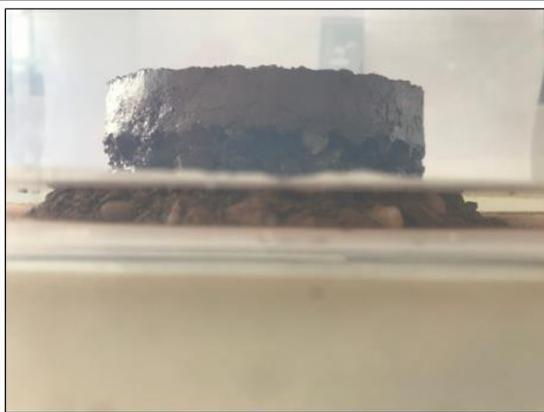
UB1 PK1 t = 24 h



UB2 PK1 t = 24 h



UB1 PK1 t = 5 d



UB2 PK1 t = 5 d



UB1 PK1 t = 5 d



UB2 PK1 t = 5 d

Ökobilanzierung Wegedecken Sachsen-Anhalt

Abschlussbericht

Auftraggeber:

Hochschule Magdeburg Stendal

Autor: Sebastian Bernhard Fischer (M.Sc.)

Frankfurt am Main, August 2022

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung.....	3
2. Einleitung.....	5
2.1 Projektbeschreibung	5
2.2 Erläuterung Ökobilanz	5
3. Ökobilanz.....	6
3.1 Ziel- und Untersuchungsrahmen.....	6
3.2 Sachbilanz	8
3.3 Wirkungsabschätzung	11
3.3.1 Treibhausgaspotenzial (GWP)	12
3.3.2 Versauerungspotenzial (AP)	15
3.3.3 Gesamtprimärenergiebedarf (PEges)	16
3.4 Auswertung	18
3.4.1 Zusammenfassung der Ergebnisse	18
3.4.2 Analyse: Bitumengebundene Wegebauweisen.....	19
3.4.3 Sensitivitätsanalyse Epoxidharz.....	20
3.4.4 Transport	21
3.4.5 Sensitivitätsanalyse Lebensdauer.....	22
3.4.6 Sensitivitätsanalyse Erneuerung	23
3.4.7 Diskussion Modul D	24
4. Ausblick.....	26
5. Anhang.....	27
5.1 Anhang eLCA Berichte Wegebauweisen	27
5.1.1 Wassergebundene Wegebauweisen	27
5.1.2 Bitumengebundene Wegebauweisen	32
5.1.3 Epoxidharzgebundenen Wegebauweisen	34

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Aufbau Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040	5
Abbildung 2 - Systemgrenzen Ökobilanzierung	7
Abbildung 3 - Wassergebundene Wegebauweise; Beispiel: 50mm Sand 0/2, 400 mm Schotter 16/32	8
Abbildung 4 - Bitumengebundene Wegebauweise; Beispiel: 70mm Tragdeckschicht, 200 mm Schotter 16/32	9
Abbildung 5 - EP Harzgebundene Wegebauweise; Beispiel: 50mm Sand 0/2, 450 mm Kies 2/32, EP Harz gefüllt, mit niedrigem Gehalt an Füllstoffen	9
Abbildung 6 - Erläuterung Boxplot	11
Abbildung 7 - GWP: Wassergebundene Wegebauweisen	12
Abbildung 8 - GWP: Bitumengebundene Wegebauweisen.....	13
Abbildung 9 - EP Harz gebundene Wegebauweisen 1	14
Abbildung 10 - EP Harzgebundene Wegebauweisen 2	15
Abbildung 11 - Prozesskette Asphalttragdeckschicht eLCA	19
Abbildung 12 - Sensitivitätsanalyse EP Harze.....	20
Abbildung 13 - Sensitivitätsanalyse Lebensdauer Wassergebundene Wegebauweisen	22
Abbildung 14 – Sensitivitätsanalyse Lebensdauer EP Wegebauweisen.....	22
Abbildung 15 – Sensitivitätsanalyse Lebensdauer Bitumengebundene Wegebauweisen	22
Abbildung 16 - Sensitivitätsanalyse Erneuerungsmaßnahmen Wassergebundene Wegebauweisen ..	23
Abbildung 17 - Sensitivitätsanalyse Erneuerungsmaßnahmen Epoxidharzgebundene Wegebauweisen	24
Abbildung 18 - Sensitivitätsanalyse Erneuerungsmaßnahmen Bitumengebundene Wegebauweisen	24
Abbildung 19 - Modul D: Wassergebundene Wegebauweisen	24
Abbildung 20 - Modul D: Wassergebundene Wegebauweisen (inkl. Bindemittel).....	24
Abbildung 21 - Modul D: Bitumengebundene Wegebauweisen.....	25
Abbildung 22 - Modul D: Epoxidharzgebunden Wegebauweisen.....	25

Abkürzungsverzeichnis

AP	Acification potential (Versauerungspotenzial)
CO ₂ Äqv.	Kohlenstoffdioxid Äquivalente
EP Harz	Epoxidharz
EPD	Umweltproduktdeklaration
GWP	Global warming potential (Treibhausgaspotenzial)
LCA	Life Cycle Assessment
PEges	Primärgesamtenergiebedarf

1. Zusammenfassung

Das Projekt Ökobilanzierung Wegedecken Sachsen-Anhalt hat eine näherungsweise Betrachtungsweise der Umweltwirkungen ausgewählter Wegebauweisen zum Gegenstand der Untersuchung. Hierzu wurden wassergebundene, bitumengebundene und epoxidharzgebundene Wegebauweisen nach der DWA-A 904 und RStO und Erweiterungen bilanziert. Als zentrale Umweltwirkungskategorien wurde das Treibhausgaspotenzial (GWP), Versauerungspotenzial (AP) und der Primärgesamtenergiebedarf (PEges) gemäß ISO 14040/44 bilanziert. Die Systemgrenzen beinhalten die Herstellung der Baustoffe, sowie deren Transport vom Werk und zum Entsorgungsort sowie Erneuerungsmaßnahmen (an Wegedecken). Als funktionelle Einheit wurde 1 m² Nettogrundfläche gewählt, sowie ein Bilanzierungszeitraum von 30 Jahren gesetzt. Signifikante Parameter wurden identifiziert und mittels Sensitivitätsanalyse variiert. Durch einen Bilanzierungsumfang von insgesamt 114 Wegebauweisen wird die Aussagekraft der erzielten Ergebnisse unterstrichen.

Festzustellen ist, dass die wassergebundenen Wegebauweisen in sämtlichen Umweltwirkungskategorien die geringste Umweltbelastung aufweisen. So erzielen diese im Mittel ein Treibhausgaspotenzial - GWP (alle Werte in: kg CO₂-Äqv./m² NGFa) von 0,31 welches sich nur geringfügig durch eine alternative Deckschicht aus Brechsand 0,38 und Zusatz von Bindemittel (Lehmpulver 0,32 und Kalk 0,35) verändert. Die epoxidharzgebundenen Wegedecken erzielen ein GWP von 0,38 bis 0,64, wobei hier der Anteil an Reaktivverdünnern als signifikanter Parameter mit hohem Einfluss auf die Umweltwirkungen identifiziert wurde. Die bitumengebundenen Wegedecken erzielen ein GWP von 11,38 bis 13,01. Hierbei haben zusätzlich zur Gewinnung der Zuschläge, die energieintensive Herstellung von Bitumen als auch die jeweiligen Transporte der Rezepturbestandteile zur Asphaltmischanlage einen hohen Einfluss.

In der Umweltwirkungskategorie Versauerungspotenzial – AP (alle Werte in: g SO₂-Äqv./m²NGFa) zeichnet sich eine ähnliche Wertigkeit ab, mit den wassergebundenen Wegebauweisen von 1,40 bis 1,51, den epoxidharzgebundenen Wegebauweisen von 1,58 bis 1,98 und den bitumengebundenen Wegebauweisen von 7,17 bis 8,19.

Der Gesamtprimärenergiebedarf – Peges (alle Werte in: MJ/m²NGFa) folgt dieser Wertigkeit ebenfalls, mit den wassergebundenen Wegebauweisen von 6,06 bis 6,12, den epoxidharzgebundenen Wegebauweisen von 8,57 bis 13,45 und den bitumengebundenen Wegebauweisen von 60,71 bis 69,73.

Einen nicht unerheblichen Einfluss hat die Applikationsmenge der Epoxidharze auf die Umweltwirkungskategorien. So steigert sich das GWP im Mittel von 0,47 auf 0,81 kg CO₂-Äqv./m² NGFa, erhöht sich die Menge EP Harz von 405 auf 1,250 g/m². Ebenfalls gilt es an dieser Stelle auf die Humantoxizität der Epoxidharze hinzuweisen, da Epoxidharze starke Reizwirkung auf Haut und Schleimhaut aufweisen können.

Gütertransportdistanzen vom Werk erwiesen sich ebenfalls als signifikanter Parameter, so steigert sich das GWP im Mittel etwa um 0,20 kg CO₂-Äqv./m² NGFa pro 100 km Transportdistanz. Als Schlussfolgerung gilt es hier, bei einer ökologischen Bewertung verschiedener Wegebauweisen dies mit einzubeziehen und möglichst kurze Transportwege zu wählen.

Fachgerechter Einbau und regelmäßige Pflegemaßnahmen weisen ebenfalls einen nicht unbedeutenden Einfluss auf die Umweltwirkungskategorien auf. Bei den wassergebundenen Wegebauweisen konnte durch regelmäßige kleinflächige Erneuerungsmaßnahmen so ein erhöhtes

GWP von bis zu 29%, bei den bitumengebundenen Wegebauweisen bis zu 12% und den epoxidharzgebundenen von bis zu 36% ermittelt werden. Auch Beschädigungen durch beispielsweise Starkregenereignisse oder Hochwasser und eine dadurch verringerte Lebensdauer der Deckschichten spiegelt sich in der Bilanzierung des GWP deutlich wieder. So erhöht sich das GWP bei Verringerung von 5 Jahren Lebensdauer der Deckschicht der wassergebundenen Wegedecken um 37% und den epoxidharzgebundenen Wegedecken um 31%. Eine Herabsetzung der Lebensdauer der Asphalttragdeckschicht der bitumengebundenen Wegebauweisen von 25 auf 15 Jahre erhöht das GWP sogar um 49%.

Abschließend lässt sich feststellen, dass die wassergebundenen Wegebauweisen in den Wirkungskategorien GWP, AP und PEges die geringsten Umweltwirkungen aufweisen, gefolgt von den epoxidharzgebundenen und den schließlich bitumengebundenen Wegebauweisen, wobei die epoxidharzgebundene Wegebauweisen stark von den Eigenschaften der EP-Harze und deren Applikationsmengen abhängig sind.

2. Einleitung

2.1 Projektbeschreibung

Die vorliegende Ökobilanzierung wurde vom Fachgebiet Verkehrswegebau der Hochschule Magdeburg-Stendal (h2) in Auftrag gegeben.

Ziel der Untersuchung ist eine näherungsbezogene Betrachtung der Umweltwirkungen ausgewählter Wegebauweisen, die in Sachsen-Anhalt zurzeit gebaut werden, durch eine vergleichende Ökobilanzierung.

Hierzu wurden wassergebundene, bitumengebundene und epoxidharzgebundene Wegebauweisen nach den Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO) und dem DWA-Regelwerk 904 bilanziert und um Praxisbeispiele und Erweiterungen ergänzt.

Der Ziel- und Untersuchungsrahmen mit den gesetzten Systemgrenzen, sowie getroffenen Annahmen der Ökobilanzierung wurden in Zusammenarbeit mit der Projektarbeitsgruppe getroffen.

Für den Wegebau aussagekräftige Umweltwirkungskategorien wurden bilanziert, signifikante Parameter durch Sensitivitätsanalysen identifiziert und eine Beurteilung der Ergebnisse der Wirkungsabschätzungsanalyse gegeben. Die Ökobilanzierung wurden den geforderten Bestandteilen entsprechend der ISO 14040/44 durchgeführt.

2.2 Erläuterung Ökobilanz

Die Ökobilanz (engl.: Life Cycle Assessment – LCA) ist eine systematische Analyse der Umweltwirkungen von Produkten, Verfahren oder Dienstleistung über den gesamten Lebensweg („von der Wiege bis zur Bahre“).

Dabei werden alle Umweltauswirkungen während der Produktion, der Nutzungsphase und der Entsorgung eines Produkts sowie die damit verbundenen vor- und nachgelagerten Stoffströme von Prozesse, wie die Herstellung von Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen, untersucht (Stoffstromintegrierte Betrachtung). Des Weiteren werden relevante potenzielle Umweltwirkungen auf die Umweltmedien Boden, Luft und Wasser berücksichtigt (Medienübergreifende Betrachtung).

Grundsätze und Regeln zur Durchführung von Ökobilanzen sind in DIN EN ISO 14040/44 standardisiert und umfassen folgende vier Bestandteile:

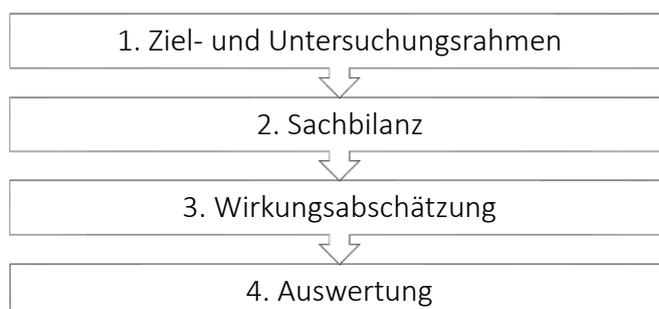


Abbildung 1 - Aufbau Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040

3. Ökobilanz

3.1 Ziel- und Untersuchungsrahmen

Geographischer Rahmen:	Deutschland
Bilanzierungsjahr:	2022
Bilanzierungszeitraum:	30 Jahre
Gesamte Netto-Grundfläche (NGF):	1 m ²
Funktionelle Einheit:	1 m ² Netto-Grundfläche (NGF)

Der Zielrahmen dieser vergleichenden Ökobilanzierung ist die näherungsweise Betrachtung der Umweltwirkungen ausgewählter Wegebauweisen in den folgenden Umweltwirkungskategorien:

- Treibhausgaspotenzial (GWP)
- Versauerungspotenzial (AP)
- Gesamtprimärenergiebedarf (PEges)

Im Untersuchungsrahmen sind folgende Wegebauweisen bilanziert worden:

1. Wassergebundene Wegebauweisen	
1.1. Nach DWA Regelwerk 904:	22
1.2. Nach RStO:	1
1.3. Wegebauweise 1.1 plus Bindemittel:	22
2. Bitumengebundene Wegebauweisen	
2.1. Nach DWA Regelwerk 904:	11
2.2. Nach RStO:	1
3. Epoxidharzgebundene Wegebauweisen	
3.1. Praxisbeispiel:	2
3.2. Wegebauweisen 1.1 plus EP Harz	55

Die wassergebundenen Wegebauweisen nach DWA Regelwerk 904 wurden durch die Bindemittel Lehm- und Kalkpulver (1.3), epoxidharzgebundene Wegebauweisen durch verschiedene Epoxidharze (3.2) ergänzt und ebenfalls bilanziert. Im folgenden Kapitel der Sachbilanz werden die Wegebauweisen im Einzelnen vorgestellt.

Allokation und Gutschriften wurden in dieser Ökobilanzierung nicht vorgenommen.

Die funktionelle Einheit wurde auf 1 m² Nettogrundfläche als nutzbare Fläche für die untersuchten Wegebauweisen gesetzt, wobei die jeweiligen Schichtbauweisen hierzu berücksichtigt werden.

Systemgrenzen

X = Bilanziert; MND = Modul nicht deklariert; MD = Modul diskutiert

Produktionsstadium			Stadium der Errichtung des Bauwerkes		Nutzungsstadium							Entsorgungsstadium				Gutschriften und Lasten außerhalb der System-grenzen
Rohstoffversorgung	Transport	Herstellung	Transport vom Hersteller zum Verwendungsort	Montage	Nutzung/Anwendung	Instandhaltung	Reparatur	Ersatz	Erneuerung	Energieeinsatz für das Betreiben des Gebäudes	Wassereinsatz für das Betreiben des Gebäudes	Rückbau/Abriss	Transport	Abfallbehandlung	Beseitigung	Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs- oder Recyclingpotenzial
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
X	X	X	X	MND	MND	X	X	MND	MND	MND	MND	MND	X	X	X	MD

Abbildung 2 - Systemgrenzen Ökobilanzierung

3.2 Sachbilanz

Das folgende Kapitel fasst die verwendete Datengrundlage sowie den Aufbau der Wegebauweisen mit getroffenen Annahmen der vorliegenden Arbeit zusammen und ist konform der ISO 14040/44 aufgeführt.

Ökobilanzierungstool: eLCA - Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)

Datensätze: OEKOBAU.DAT - Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI)

Für die Datensätze genutzte Datenquellen: GaBi Datenbank

Eigentümer der Datensätze: thinkstep AG

Die untersuchten Wegebauweisen werden im nachfolgenden Abschnitt zusammengefasst und anhand eines Beispiels der Kombinationen der Schichtdicken dargestellt.

Die Beanspruchungsklassen der bilanzierten Wegebauweisen beinhalten wegebauweiseübergreifend geringe Schwierigkeitsgrade (seltene Überfahrten), mittlere Schwierigkeitsgrade (gelegentliche/saisonale Überfahrten) bis hin zu großen Schwierigkeitsgraden (häufige Überfahrten) mit Tragfähigkeiten des Untergrundes von $E_v = 30/45/80 \text{ MN/m}^2$.

Hierzu wurden sämtliche Kombinationen bilanziert und der Übersicht halber im nachfolgenden Kapitel der Wirkungsabschätzung zusammengefasst dargestellt.

1. Wassergebundene Wegebauweisen

Die wassergebundenen Wegebauweisen werden, gemäß der DWA-A 904 und RStO mit einer 50 mm Deckschicht (Sand 0/2; Brechsand 0/2) und einer Tragschicht 200-400 mm (Schotter 16/32) und alternativ einer Tragschicht 200-450 mm (Kies 2/32) bilanziert.

Des Weiteren beinhaltet der Untersuchungsrahmen die Wegebauweisen inklusive der Bindemittel Lehmputer und Kalk (CaO, Feinkalk) mit einem Anteil von 4,5 kg/t.

Die Lebensdauer der Deckschicht beträgt 10 Jahre und die der Tragschicht 30 Jahre.

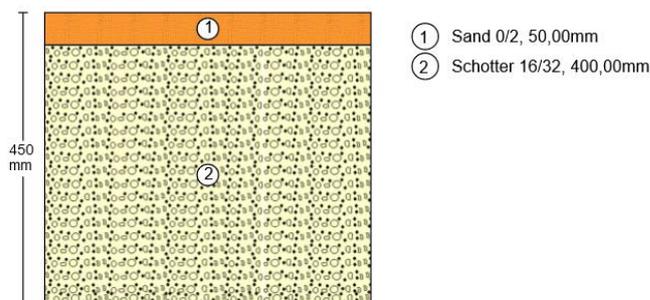


Abbildung 3 - Wassergebundene Wegebauweise; Beispiel: 50mm Sand 0/2, 400 mm Schotter 16/32

2. Bitumengebundene Wegebauweisen

Die bitumengebundenen Wegebauweisen werden, gemäß der DWA-A 904 und RStO mit einer Asphalt-Tragdeckschicht von 70-80 mm, sowie einer Tragschicht von 200-350 mm (Schotter 16/32) und einer Tragschicht 200-400 mm (Kies 2/32) bilanziert.

Die Lebensdauer der Asphalt-Tragdeckschicht beträgt 25 Jahre und die der Tragschicht 30 Jahre.

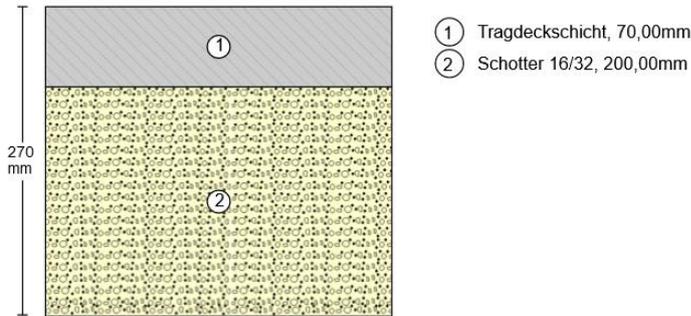


Abbildung 4 - Bitumengebundene Wegebauweise; Beispiel: 70mm Tragdeckschicht, 200 mm Schotter 16/32

3. Epoxidharzgebundene Wegebauweisen

Die epoxidharzgebundenen Wegedecken basieren auf den wassergebundenen Wegedecken mit einer 50 mm Deckschicht (Sand 0/2) und einer Tragschicht 200-400 mm (Schotter 16/32) sowie alternativ einer Tragschicht von 200-450 mm (Kies 2/32). Zusätzlich werden Epoxidharze mit folgenden unterschiedlichen Eigenschaften bilanziert:

- Lösemittelfrei mit hohem Gehalt an Reaktivverdünnern
- Gefüllt mit niedrigem Gehalt an Füllstoffen
- Lösemittelfrei mit niedrigem Gehalt an Reaktivverdünnern
- Wässrig, ungefüllt
- Gefüllt mit hohem Gehalt an Füllstoffen

Reaktivverdünner: Additive für Epoxidharzsysteme zur Verarbeitungviskosität

Füllstoffe: Polyamine als organische Verbindung zum Härten der Epoxidharze

Die Lebensdauer der Deckschicht beträgt 15 Jahre und die der Tragschicht 30 Jahre. Die Epoxidharze wurden mit 6 kg/t bilanziert.

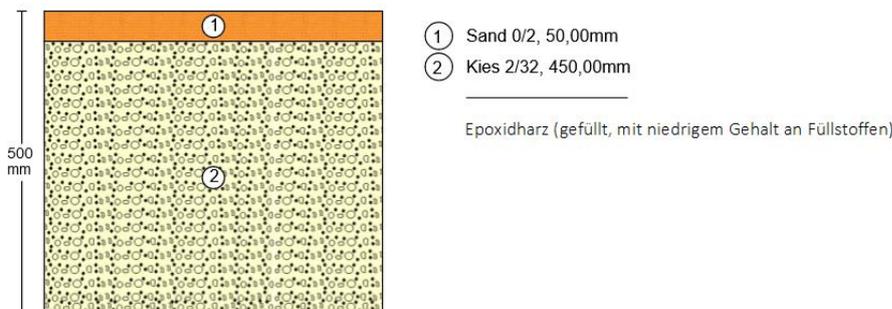


Abbildung 5 - EP Harzgebundene Wegebauweise; Beispiel: 50mm Sand 0/2, 450 mm Kies 2/32, EP Harz gefüllt, mit niedrigem Gehalt an Füllstoffen

Des Weiteren wurden zwei Praxisbeispiele aus bestehenden Parkanlagen in Sachsen-Anhalt bilanziert, mit den gleichen Annahmen der oben beschriebenen Epoxidharzgebundenen Wegebauweisen.

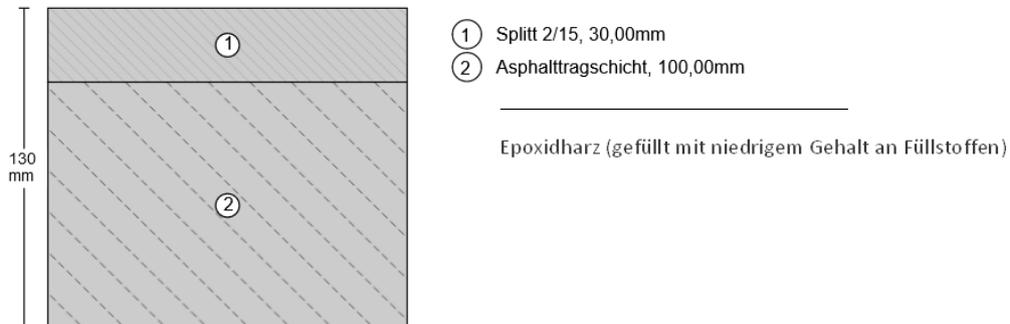


Abbildung 6 - Epoxidharzgebundene Wegebauweisen - Praxisbeispiel 1; 30 mm Splitt 2/15, 100 mm Asphalttragschicht

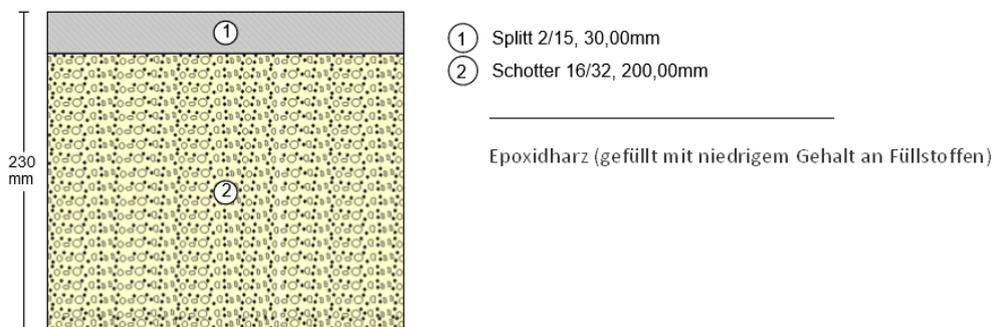


Abbildung 7 - Epoxidharzgebundene Wegebauweisen - Praxisbeispiel 2: 30 mm Splitt 2/15, 200 mm Schotter 16/32

3.3 Wirkungsabschätzung

Für die Wirkungsabschätzung wird gemäß der ISO 14040/44 die Struktur der CML-Methode verwendet. Folgenden Wirkungskategorien werden zur Bewertung herangezogen:

- Treibhauspotenzial - GWP (Global Warming Potential)
- Versauerungspotenzial - AP (Acification Potential)
- Gesamtprimärenergiebedarf - PEges (Total Primary Energy)

Weitere Wirkungskategorien werden der Vollständigkeit halber mit im Anhang aufgeführt. Die jeweiligen Wirkungskategorien werden einleitend erläutert und anschließend im Kapitel 3.4 (Auswertung) interpretiert.

Einleitende Erläuterung zur Boxplot-Darstellung

Um die Boxplots der Wirkungsabschätzung der nachfolgenden Kapitel zu interpretieren wird die Logik anhand des nachfolgenden Boxplot-Beispiels erläutert:

Die Zahlenreihe 1 bis 11 wird im Boxplot mit dem ersten Quartil 1 bis 3, dem zweiten Quartil 3 bis 6, dem dritten Quartil 6 bis 9 und dem vierten Quartil 9 bis 11 dargestellt. Jedes Quartil umfasst 25% der Datenpunkte. Die Box, die das zweite und dritte Quartil aufspannt umfasst genau 50% der Datenpunkte. Des Weiteren wird der Median in der Mitte der Box, in diesem Beispiel mit 6 angegeben und mit einem X markiert dargestellt.

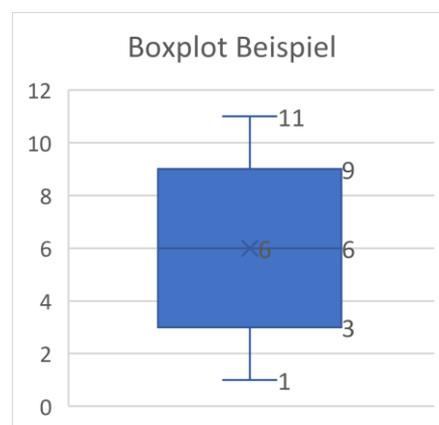


Abbildung 8 – Beispiel zur Erläuterung der Boxplot-Darstellung

3.3.1 Treibhausgaspotenzial (GWP)

Definition Treibhausgaspotenzial (GWP)

Das Treibhausgaspotenzial (engl.: Global Warming Potential – GWP) ist eine Maßzahl für den relativen Beitrag einer chemischen Verbindung zum Treibhauseffekt, also der mittleren Erwärmung der Erdatmosphäre über einen Zeitraum von 100 Jahren.

Die Wirkung verschiedener Treibhausgase werden in dieser Wirkungskategorie zusammengefasst, in Kohlenstoffdioxid (CO₂) umgerechnet und in einer CO₂-Äquivalenten ausgedrückt.

So trägt beispielsweise Methan (CH₄) zum Treibhausgaspotenzial über den betrachteten Zeitraum mit dem Faktor 28 und Lachgas (N₂O) mit dem Faktor 265 bei.

Im nachfolgenden Abschnitt werden die zusammengefassten Ergebnisse der Wirkungsabschätzung mit der Umweltwirkungskategorie GWP dargestellt.

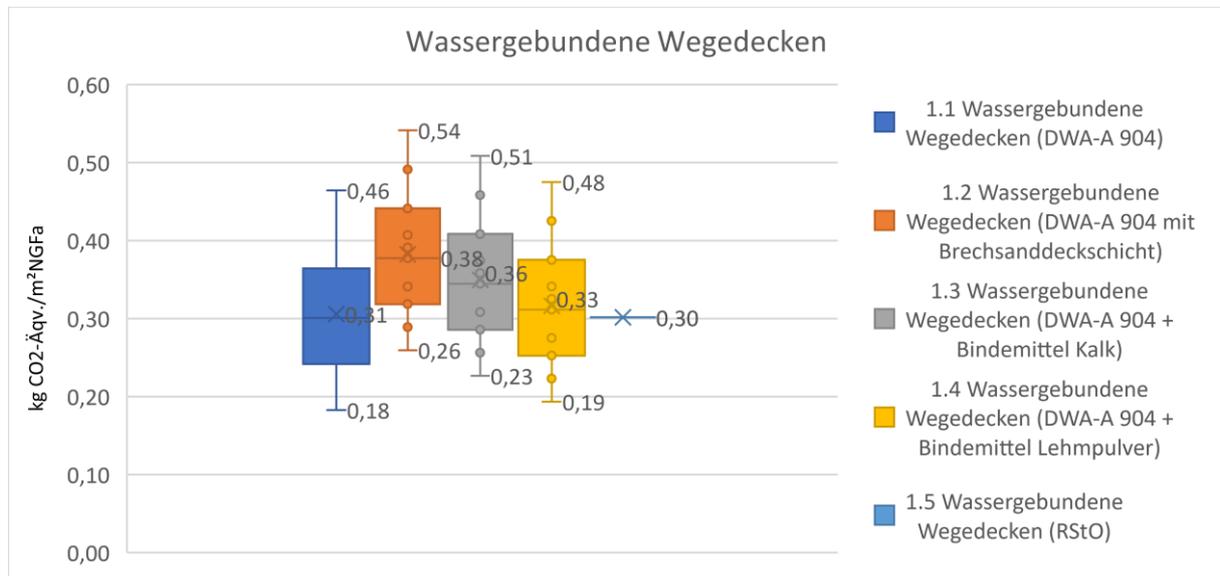


Abbildung 9 - GWP: Wassergebundene Wegebauweisen

Die 1.1 wassergebundenen Wegedecken nach DWA-A 904, sowie der Schichtaufbau der 1.5 wassergebundenen Wegedecken nach RStO erzielen mit Median 0,31 und 0,30 kg CO₂Äqv. pro m² und Jahr das niedrigste Treibhausgaspotenzial.

Für den gleichen Wegeaufbau, jedoch Brechsand anstelle Sand als Deckschicht (1.2), erhöht sich das GWP auf 0,38 kg CO₂Äqv./m²a durch den Prozess der Vor- und Nachzerkleinerung, Mahlen und Sieben des Brechsandes.

Die wassergebundene Wegedecke mit Zusatz von Lehmpulver (1.4) erzielt ein GWP von 0,33 kg CO₂Äqv./m²a durch die zusätzliche Tongewinnung und Mahltrocknung und der Zusatz durch Feinkalk (1.3) erzielt ein GWP von 0,36 kg CO₂Äqv./m². Durch die geringen Mengen des Bindemittels von 4,5 kg/t fällt dieser Zusatz allerdings kaum ins Gewicht.

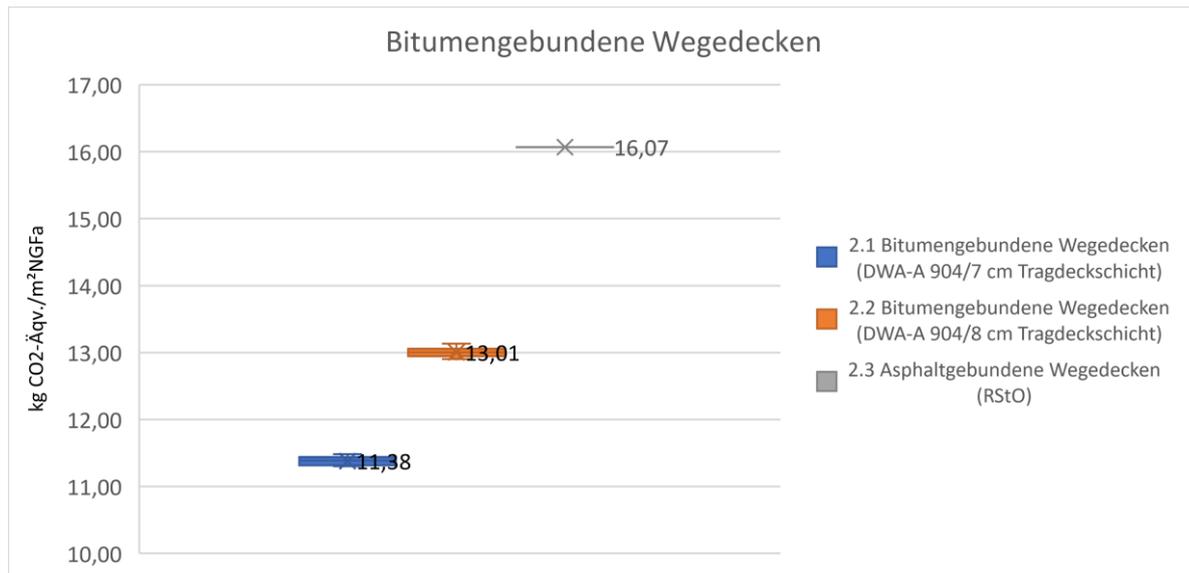


Abbildung 10 - GWP: Bitumengebundene Wegebauweisen

Die bitumengebundene Wegedecken nach DWA-A 904 mit einer Tragdeckschicht von 70 mm (2.1) erzielt ein GWP von 11,38 kg CO₂Äqv./m². Dies liegt insbesondere an dem Prozesse der Gewinnung der Zuschläge und der Herstellung von Bitumen, sowie dem Herstellungsaufwand in der Asphaltmischanlage. Es sei darauf hingewiesen, dass das Recyclingpotenzial welches in der Praxis durch Recyclingasphalt Anwendung findet und die Umweltwirkung positiv beeinflussen könnte nicht Teil des Datensatzes und damit nicht Teil dieser Bilanzierung ist.

Die bitumengebundene Wegedecke nach DWA-A 904 mit einer Tragdeckschicht von 80 mm erzielt ein GWP von 13,01 kg CO₂Äqv./m², welches in dem zusätzlichen 10 mm Materialaufwand begründet liegt.

Die bitumengebundene Wegedecke nach RStO (2.3) erzielt ein GWP von 16,07 kg CO₂Äqv./m², welches wiederum an der Asphalttragdeckschicht von 100 mm und gleichem Datensatz begründet liegt.

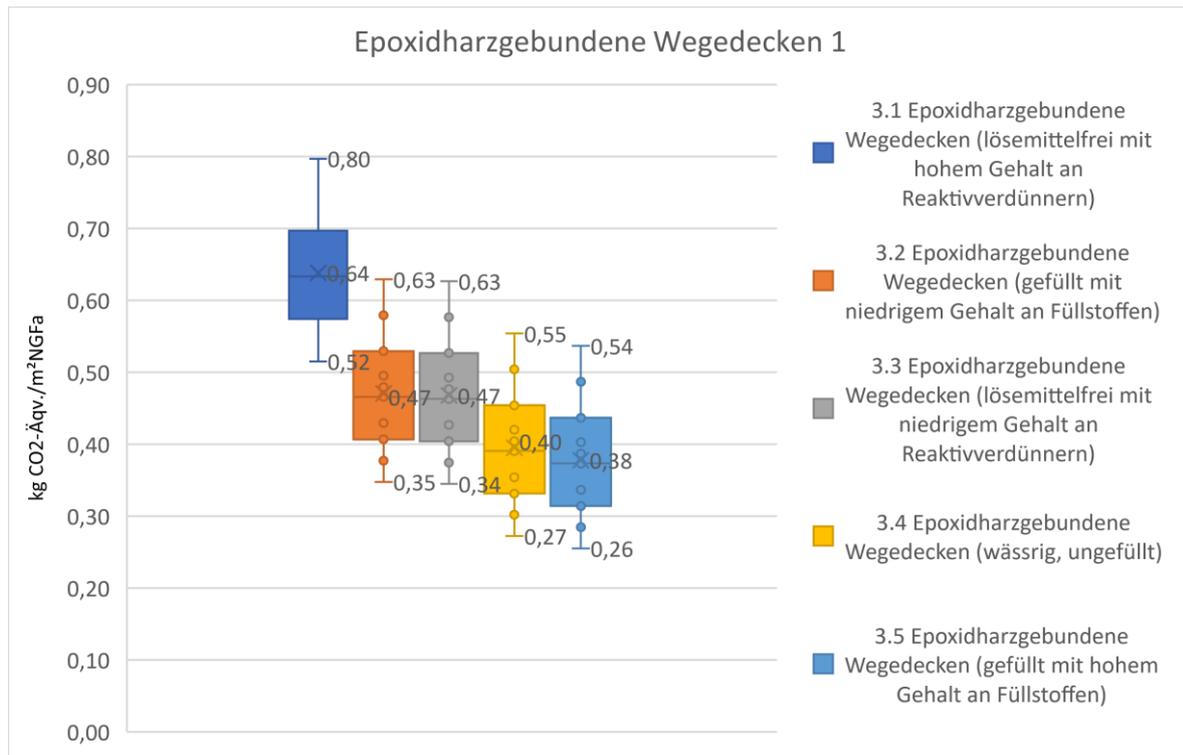


Abbildung 11 - EP Harz gebundene Wegebauweisen 1

Die epoxidharzgebundenen Wegedecken mit Zusatz der beschriebenen Epoxidharze 3.1-3.5 erzielen ein GWP von 0,38 bis 0,64 kg CO₂Äqv./m²a im Median.

Die Epoxidharze bestehen aus einer Harz- und einer Härterkomponente und zur Viskositätseinstellung werden Reaktivverdünner (Glycidylether) auf Basis aliphatischer Alkohole eingesetzt. Die Härtung erfolgt im eingebauten Zustand vor Ort mit der Härterkomponente.

Hierbei erzielen die EP-Harze 3.5 und 3.4 (bei Betrachtung der unterschiedlichen EP-Harze) das niedrigste GWP mit 0,38 und 0,40 kg CO₂Äqv./m²NGFa, gefolgt von 3.2 und 3.3 mit jeweils einem GWP von 0,47 kg CO₂Äqv./m²NGFa und letztlich der EP harzgebundenen Wegedecke mit hohem Gehalt an Reaktivverdünner 3.1 mit 0,64 kg CO₂Äqv./m²NGFa. Den größten Anteil am GWP hat der Reaktivverdünner, welcher insgesamt durch den Einsatz von 6 kg/t vergleichsweise geringe Auswirkungen auf das Gesamtergebnis erzielt.

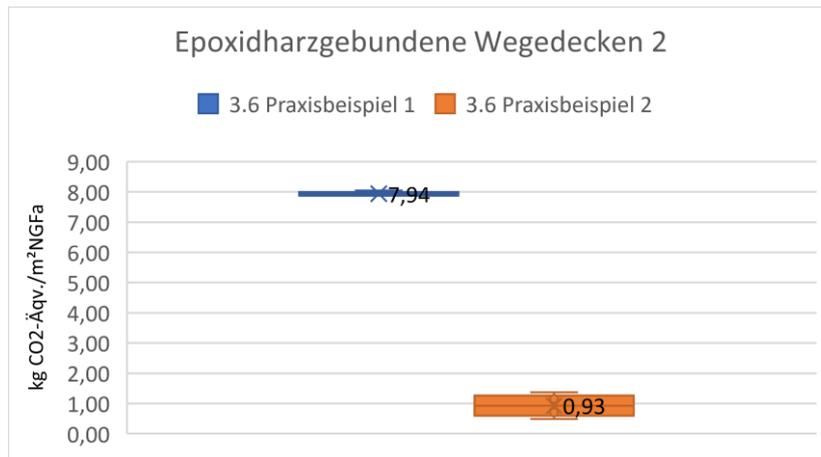


Abbildung 12 - EP Harzgebundene Wegebauweisen 2

Die epoxidharzgebundene Wegedecke aus Praxisbeispiel 1 erzielt ein GWP von 7,94 kg CO₂Äqv./m². Bei diesem Wegeaufbau wurde auf eine Asphalttragschicht eine epoxidharzgebundene Splitt-Deckschicht gebaut. Durch den Einsatz des Asphaltes erzielt diese Wegebauweise eine vergleichsweise hohes GWP.

Die epoxidharzgebundene Wegedecke aus Praxisbeispiel 2 erzielt ein GWP von 0,93 CO₂Äqv./m², mit einer Tragschicht von 200 mm (Schotter 16/32) und einer epoxidharzgebundenen Deckschicht aus Splitt 2/4. Die Ergebnisse dieser aus der Wegebaupraxis entnommenen Wegebauweisen (Praxisbeispiele 1 und 2) werden in diesem Kapitel aufgeführt, für die weitere Betrachtung aufgrund der fehlenden Vergleichbarkeit der Bauweisen jedoch nicht weiter berücksichtigt.

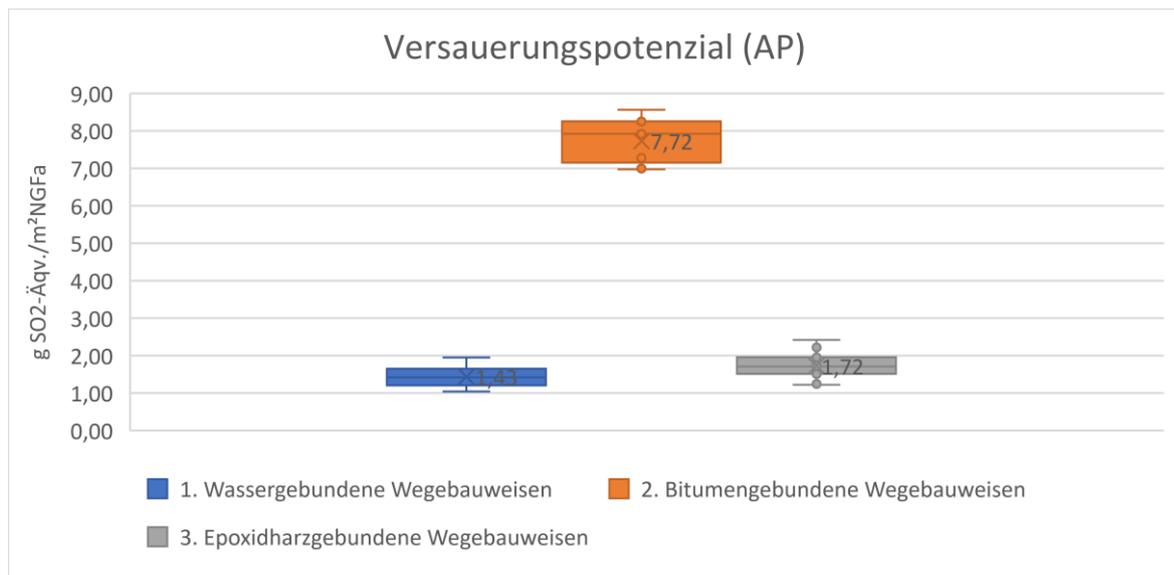
3.3.2 Versauerungspotenzial (AP)

Unter Versauerung wird die Erhöhung der Konzentration von H⁺-Ionen in Luft, Wasser und Boden verstanden. Sowohl terrestrische als auch aquatische Systeme können von einer Versauerung betroffen sein. Verantwortlich sind die Emissionen säurebildender Substanzen, welche aus Emissionen in der Luft (Industrieanlagen) und aus der Landwirtschaft stammen können.

Potentielle Auswirkungen der Versauerung sind:

- Schäden an der Vegetation (z. B. Waldschäden)
- Auswaschung von Nährstoffen
- Remobilisierung von Schwermetallen

Zur Charakterisierung der Schädwirkung ist das Versauerungspotenzial der Schadstoffe geeignet, die auf Schwefeldioxid (SO₂)- Äquivalente umgerechnet werden.

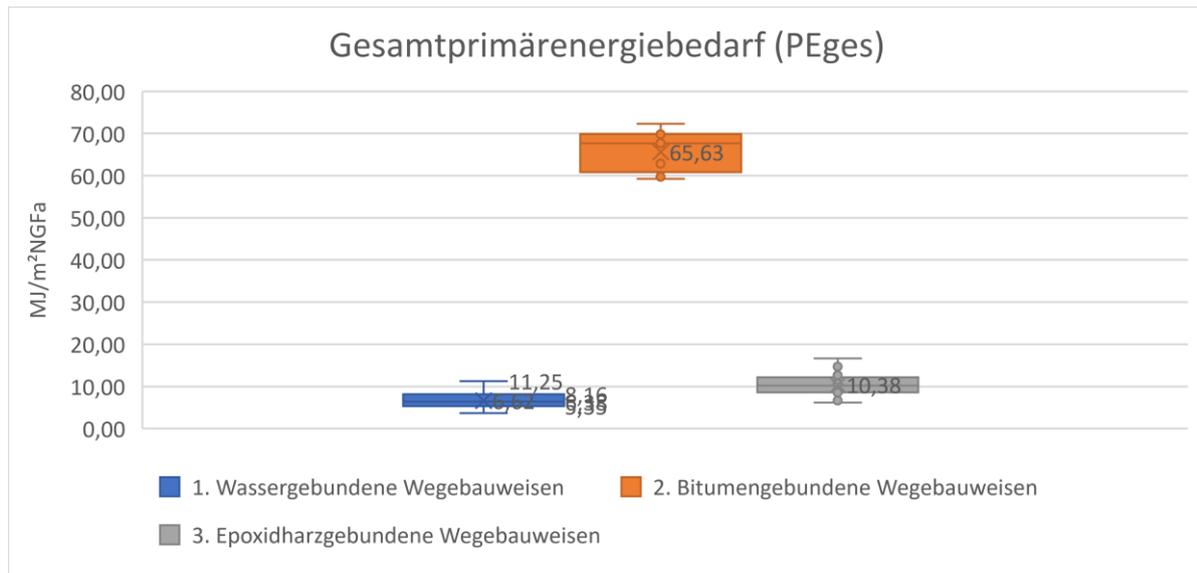


Die wassergebundenen Wegedecken (1.) erzielen ein Versauerungspotenzial im Median von 1,08 g SO₂-Äqv./m²NGFa, verglichen zu den bitumengebundenen Wegebauweisen (2.) mit 7,72 g SO₂-Äqv./m²NGFa und den epoxidharzgebundenen Wegebauweisen (3.) mit 1,72 g SO₂-Äqv./m²NGFa.

Die Interpretation des Versauerungspotenzials eines Ökosystems ist komplex und kann im Zuge einer Ökobilanzierung lediglich Tendenzen aufzeigen. Festzustellen gilt, die epoxidharzgebundenen Wegedecken erzielen ein 59% höheres Versauerungspotenzial verglichen mit den wassergebundenen Wegedecken, wobei diese bei dem Treibhausgaspotenzial lediglich 38% höher lagen. Ergo, den Epoxidharzen wird eine überdurchschnittlich versauernde Wirkung, verglichen mit den wassergebundenen Wegebauweisen, in den Datensätzen zugewiesen.

3.3.3 Gesamtprimärenergiebedarf (PEges)

Der Gesamt Primärenergiebedarf (PEges) beschreibt die Energiemenge, die zur Deckung des Endenergiebedarfs der Baustoffe im vollständigen Herstellungsverfahren benötigt wird. Dabei ist auch die zusätzliche Energiemenge zu berücksichtigen, die durch zeitlich oder örtlich vorgelagerte Prozessketten außerhalb des Systems bei der Gewinnung, Umwandlung und Verteilung der eingesetzten Brennstoffe entsteht.



Der Gesamtprimärenergiebedarf der wassergebundenen Wegebauweisen erzielt ein PEges von 5,19 MJ/m²NGFa, die bitumengebundenen Wegebauweisen ein PEges von 65,63 MJ/m²NGFa und die epoxidharzgebundenen Wegebauweisen ein PEges von 10,38 MJ/m²NGFa.

Bei der Betrachtung des Gesamtprimärenergiebedarfes ist festzustellen, dass die epoxidharzgebundenen Wegedecken einen höheren Energieaufwand durch vorgelagerte Prozessketten, verglichen zu den wassergebundenen Wegedecken, besitzen und in der gesamten Betrachtung der Umweltwirkungen der Wegebauweisen Berücksichtigung finden sollten.

Die bitumengebundene Wegebauweisen erzielen ebenfalls beim PEges den höchsten Einfluss der Umweltwirkungen, welches vertiefend im nachfolgenden Kapitel der Auswertung betrachtet wird.

3.4 Auswertung

3.4.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

In der nachfolgenden Tabelle werden die Ergebnisse des Treibhausgaspotenzials (GWP), des Versauerungspotenzials (AP) und des Gesamtprimärenergiebedarf (PEges) der jeweiligen Wegebauweisen mit erzieltem Median der Umweltwirkungen zusammengefasst.

	GWP	AP	PEges
	kg CO ₂ -Äqv./m ² NGFa	g SO ₂ -Äqv./m ² NGFa	MJ/m ² NGFa
1.1 Wassergebundene Wegedecken (DWA-A 904)	0,31	1,40	6,06
1.2 Wassergebundene Wegedecken (DWA-A 904 mit Brechsanddeckschicht)	0,38	1,51	8,07
1.3 Wassergebundene Wegedecken (DWA-A 904 + Bindemittel Kalk)	0,35	1,41	6,25
1.4 Wassergebundene Wegedecken (DWA-A 904 + Bindemittel Lehm-pulver)	0,32	1,41	6,12
2.1 Bitumengebundene Wegedecken (DWA-A 904/7 cm Tragdeckschicht)	11,38	7,17	60,71
2.2 Bitumengebundene Wegedecken (DWA-A 904/8 cm Tragdeckschicht)	13,01	8,19	69,73
3.1 Epoxidharzgebundene Wegedecken (lösemittelfrei mit hohem Gehalt an Reaktivverdünnern)	0,64	1,98	13,45
3.2 Epoxidharzgebundene Wegedecken (gefüllt mit niedrigem Gehalt an Füllstoffen)	0,47	1,72	10,45
3.3 Epoxidharzgebundene Wegedecken (lösemittelfrei mit niedrigem Gehalt an Reaktivverdünnern)	0,47	1,72	10,42
3.4 Epoxidharzgebundene Wegedecken (wässrig, ungefüllt)	0,40	1,63	9,02
3.5 Epoxidharzgebundene Wegedecken (gefüllt mit hohem Gehalt an Füllstoffen)	0,38	1,58	8,57

Zusammenfassend lässt sich über die bilanzierten Umweltwirkungskategorien eine Tendenz der allgemeinen Wertigkeit der Umweltwirkung feststellen. Die wassergebundene Wegedecken erzielen in GWP, AP und PEges die geringsten Umweltwirkungen, welche sich marginal durch den Einsatz einer Tragedecke aus Brechsandstein und den Bindemitteln Lehm-pulver und Kalk verschlechtert.

Die Epoxidharzgebundenen Wegedecken mit den fünf bilanzierten EP-Harzen folgen in den bilanzierten Umweltwirkungskategorien in deren Wertigkeit, wobei anzumerken ist, dass ein höherer Einsatz von Reaktivverdünnern signifikanten Einfluss auf die Umweltwirkungen aufweist, als auch die gesamten epoxidharzgebundenen Wegebauweisen in den Umweltwirkungen AP und PEges eine höhere Umweltwirkung aufweisen.

Die Ermittlung von Toxizitätspotenzialen ist methodisch schwierig und in Ökobilanzen umstritten (vgl. UBA: Eco Design Kit). Da für die Epoxidharze Wechselwirkungen von Expositions-dauer, Konzentration und Kontaktart unbekannt sind, werden Toxizitätswirkungen nicht in der OEKOBAU.DAT aufgeführt. Jedoch lässt sich eine qualitative Aussage über deren Humantoxizität treffen, da durch die

verwendeten Härter teilweise starke Reizwirkung auf Haut und Schleimhaut auftreten können. Bei der Anwendung von Epoxidharzen auf der Baustelle ist der Kontakt mit den flüssigen Komponenten und dem angemischten Harz unbedingt zu vermeiden und auf Hautschutz und Augenschutz zu achten. Der Härter ist nach dem Aushärten unbedenklich. Ebenfalls gilt zu erwähnen, dass Epoxidharze giftig für Wasserorganismen sind, welches sich durch das Versauerungspotenzial dieser Arbeit widerspiegelt. Ebenfalls können bei der Verarbeitung von Epoxidharzen produktspezifisch unterschiedlich große Emissionen auftreten (vgl. Wecobis).

Die bitumengebundenen Wegebauweisen folgen in den bilanzierten Umweltwirkungskategorien in allen bilanzierten Schichtaufbauten mit großem Abstand. Wie diese Ergebnisse zu werten sind wird in den Kapiteln 3.4.2 und 3.4.7 beschrieben.

3.4.2 Analyse: Bitumengebundene Wegebauweisen

Bei genauerer Betrachtung der Asphalttragdeckschicht der bitumengebundenen Wegebauweisen wird schnell deutlich weshalb diese sich in der Gesamtbilanz entscheidend von den anderen Wegebauweisen abheben. Der Prozess beinhaltet eine mehrstufige Prozesskette, welche sowohl die Gewinnung der Zuschläge und die energieintensive Herstellung von Bitumen auf hohen Temperaturen als auch die jeweiligen Transporte der Rezepturbestandteile zur Asphaltmischanlage beinhalten. Verglichen mit den simpleren Herstellungsprozessen der Wegebauweisen im Vergleich, insbesondere denen der wassergebundenen Wegebauweisen, sind hier mehr energie- und transportintensive Prozesse beinhaltet (vgl. OEKOBAU.dat).

Des Weiteren, wie eingangs bereits erwähnt, wird dem Asphalt in dieser Bilanzierung kein Recyclingpotenzial zugeschrieben, welches in der Praxis zunehmend an Bedeutung gewinnt und die Umweltwirkungskategorien durch Gutschriften deutlich verbessern könnte.

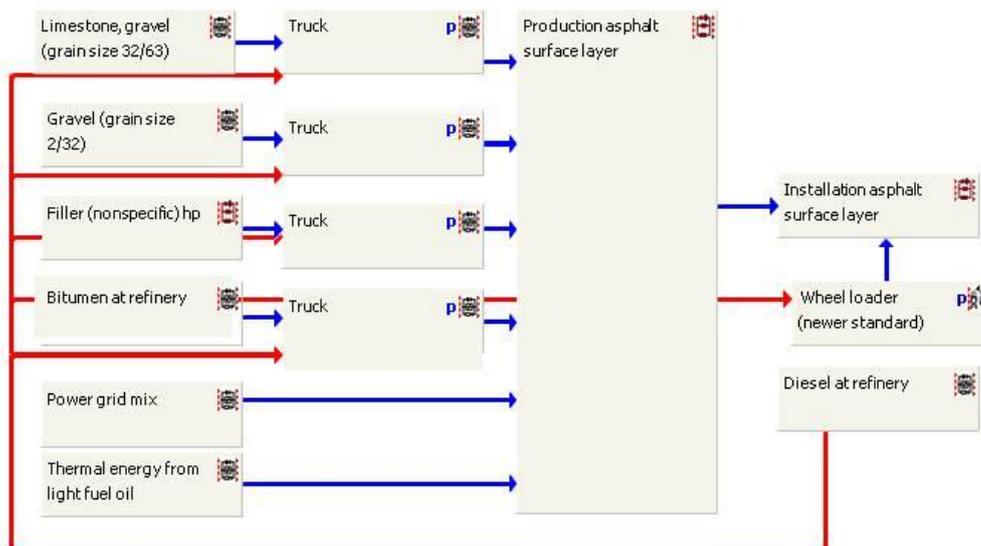


Abbildung 13 - Prozesskette Asphalttragdeckschicht eLCA

3.4.3 Sensitivitätsanalyse Epoxidharz

Die bilanzierten epoxidharzgebundenen Wegebauweisen wurden mit einem Einsatz von 6kg/t Epoxidharz bilanziert, welches bei der Massenbilanz der Deckschicht des OEKOBAD.DAT - Datensatzes eine Gesamtmasse von 0,405 kg pro m² ergibt.

Die dem Datensatz zugrundeliegende Umweltproduktdeklaration (Environmental Product Declaration, EPD) verweist in der Technischen Beschreibung der Hintergrundsysteme auf den Reaktionsharzeinsatz wie folgt:

„Die Verbands-EPD bezieht sich auf die deklarierte Einheit von 1 kg Reaktionsharzprodukt in dem zur Verarbeitung nötigen Mischungsverhältnis der beiden Komponenten. Der Verbrauch pro Flächeneinheit der Produkte, die flächig aufgebracht werden, kann zwischen wenigen hundert Gramm bis über 1 kg pro m² liegen. Bei Produkten, die injiziert werden, hängt die Applikationsmenge vom zu injizierenden Bauteil ab.“

Folglich liegt eine Sensitivitätsanalyse des Einsatzes der EP-Harze nahe, welche in der nachfolgenden Abbildung durch den Median sämtlicher Epoxidharzgebundenen Wegebauweisen dargestellt wird:

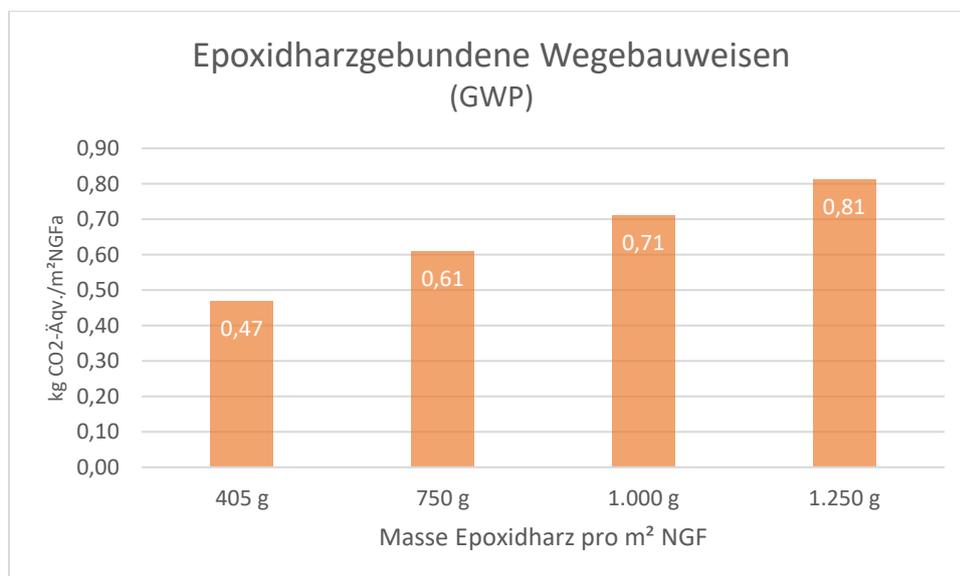


Abbildung 14 - Sensitivitätsanalyse EP Harze

Es gilt anzumerken, dass der Einsatz der EP-Harze einen signifikanten Parameter bezogen auf die Gesamtbilanz des Treibhausgaspotenzials darstellt. Nicht nur die Eigenschaften der einzelnen EP-Harze haben, insbesondere mit dem Anteil der Reaktivverdünner, einen erheblichen Einfluss auf die Umweltwirkungen, sondern auch kleine Änderungen der Applikationsmengen.

3.4.4 Transport

Die Lebenszyklusanalyse der jeweiligen Baustoffe der OEKOBAUT.DAT umfasst die Gewinnung der Rohstoffe, deren Weiterverarbeitung inklusiver sämtlicher verbundenen Prozessketten bis zum Werkstor. Transporte vom Werk zur Baustelle sind nicht berücksichtigt und müssen bei der Systembetrachtung eingerechnet werden.

Da die Bilanzierung der jeweiligen Wegebauweisen nicht konkrete Baustellen mit verknüpften Zulieferern beinhaltet, wird Modul A4 Transport vom Hersteller zum Verwendungsort und Modul C2 Transport näherungsweise betrachtet.

Hierzu wird die folgende Tabelle¹ bereitgestellt, welche eine Übersicht der kumulierten Treibhausgaspotenzialemissionswerte über die Wegebauweisen mit entsprechenden Transportentfernungen bereitstellt.

	1. Wassergebunden	2. Bitumengebunden	3. Epoxidharzgebunden	
25 km	0,39	12,63	0,52	kg CO ₂ Äqv./m ² NGFa
50 km	0,44	12,68	0,57	kg CO ₂ Äqv./m ² NGFa
75 km	0,49	12,74	0,62	kg CO ₂ Äqv./m ² NGFa
100 km	0,54	12,79	0,67	kg CO ₂ Äqv./m ² NGFa
200 km	0,74	12,99	0,87	kg CO ₂ Äqv./m ² NGFa
300 km	0,94	13,20	1,07	kg CO ₂ Äqv./m ² NGFa
400 km	1,14	13,41	1,27	kg CO ₂ Äqv./m ² NGFa
500 km	1,34	13,62	1,47	kg CO ₂ Äqv./m ² NGFa
600 km	1,54	13,82	1,67	kg CO ₂ Äqv./m ² NGFa
700 km	1,74	14,03	1,87	kg CO ₂ Äqv./m ² NGFa
800 km	1,94	14,24	2,07	kg CO ₂ Äqv./m ² NGFa

Beispiel: So sind epoxidharzgebundene Wegebauweisen mit einem Transportweg vom Werk und zum Entsorgungsort von insgesamt 75 km und damit erzieltm GWP von 0,62 kg CO₂Äqv./m²NGFa, bezogen auf das Treibhausgaspotenzial einer wassergebundenen Wegebauweise mit einer Gesamttransportdistanz von 200 km und einem GWP von 0,74 kg CO₂Äqv./m²NGFa zu bevorzugen.

¹ Quelle: ProBas mit Gütertransport, Lkw und Nutzfahrzeug; Größenklasse/max. Beladung, Schadstoffklasse & Straßenkategorie = Durchschnittswerte; Berücksichtigte Treibhausgase: CO₂, N₂O, CH₄

3.4.5 Sensitivitätsanalyse Lebensdauer

Die getroffenen Annahmen der Lebensdauer der jeweiligen Deckschichten wird durch eine Sensitivitätsanalyse der Parameter getestet. In der Praxis können Starkregenereignisse, Hochwasser, anhaltende Dürreperioden oder andere Umweltereignisse die Wegebauweisen so sehr beschädigen, dass die erwartete Lebensdauer drastisch sinkt und ein vollständiger Ersatz der Deckschichten unausweichlich ist.

In den nachfolgenden Abbildungen wird das GWP der jeweiligen Wegebauweisen durch Variation der Lebensdauer der Deckschichten untersucht:

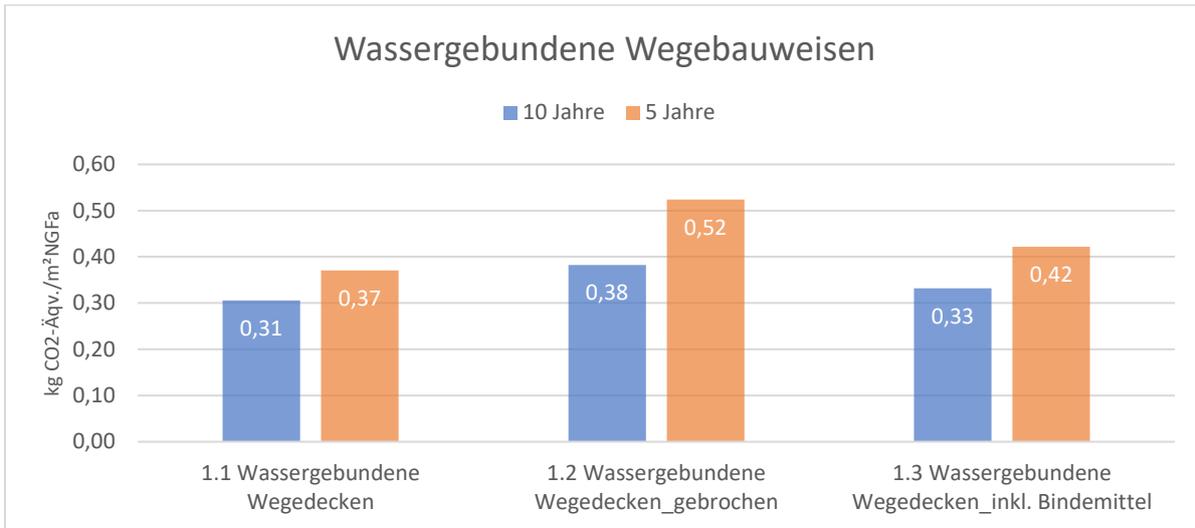


Abbildung 15 - Sensitivitätsanalyse Lebensdauer Wassergebundene Wegebauweisen

Bei den wassergebundenen Wegebauweisen erhöht sich durch verringerte Lebensdauer der Deckschichten das GWP um 21% bei den wassergebundenen Wegedecken ohne Zusätze (1.1), um 37% bei der Deckschicht mit Brechsand (1.2) und um 27% bei den wassergebundenen Wegedecken inklusive Bindemittel (1.3).

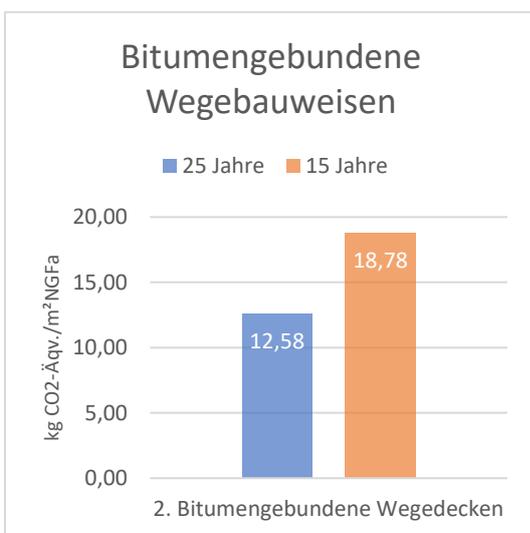


Abbildung 16 – Sensitivitätsanalyse Lebensdauer EP Wegebauweisen

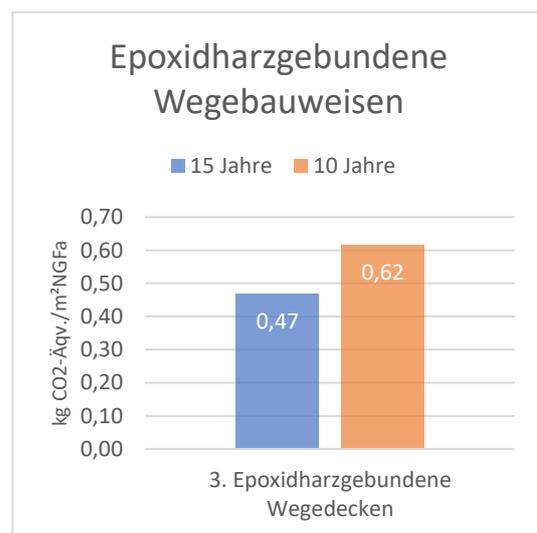


Abbildung 17 – Sensitivitätsanalyse Lebensdauer Bitumengebundene Wegebauweisen

Das GWP der bitumengebundenen Wegedecken (2.) erhöht sich im Median um 49% und das der Epoxidharzgebundenen Wegedecken (3.) um 31%.

Epoxidharze können nicht recycelt werden. Produktionsabfälle können höchstens als Zuschlagstoffe erneut in der Produktion eingesetzt werden.

3.4.6 Sensitivitätsanalyse Erneuerung

Die Pflege der wassergebundenen Wegebauweisen bedarf regelmäßiger Unterhaltungsmaßnahmen, wie das Ausbessern von Unebenheiten (insbesondere nach dem Winter) durch Schlepplatte/Laubrechen, übermäßig loses Korn planieren, Laub-, Unkraut- und Schneebeseitigung. Diesen regelmäßigen Pflegemaßnahmen werden bezogen auf das GWP keine bis verschwindend geringe Umweltwirkungen zugesprochen, weshalb sie außerhalb der Systemgrenzen liegen.

Kleinflächige Erneuerungsmaßnahmen durch beschädigte Wegedecken hingegen werden durch einen Materialmehraufwand in einer Sensibilitätsanalyse betrachtet. Für die bitumengebundenen Wegebauweisen wurden ebenfalls Erneuerungsmaßnahmen angenommen, verhältnismäßig jedoch geringer als bei den wassergebundenen und epoxidharzgebundenen Wegedecken. Der Materialmehraufwand ist in den nachfolgenden Abbildungen in % der Gesamtmaterialaufwendungen pro Jahr angegeben:

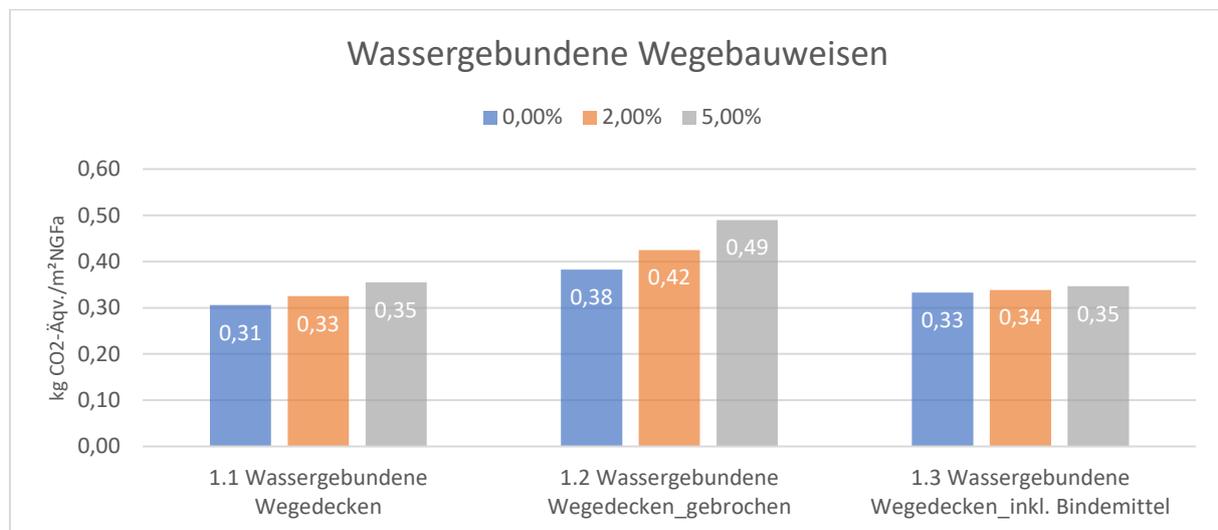


Abbildung 18 - Sensitivitätsanalyse Erneuerungsmaßnahmen Wassergebundene Wegebauweisen

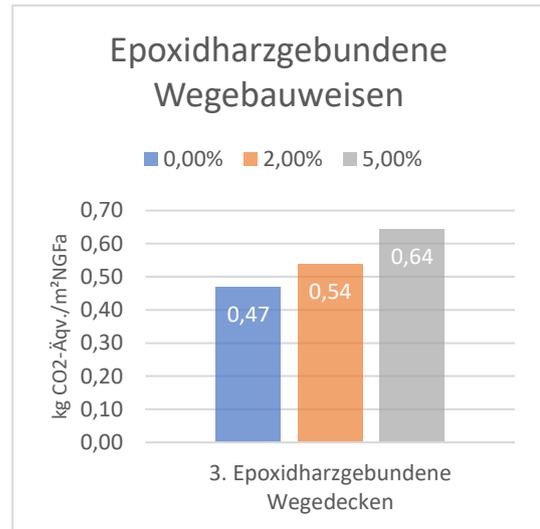
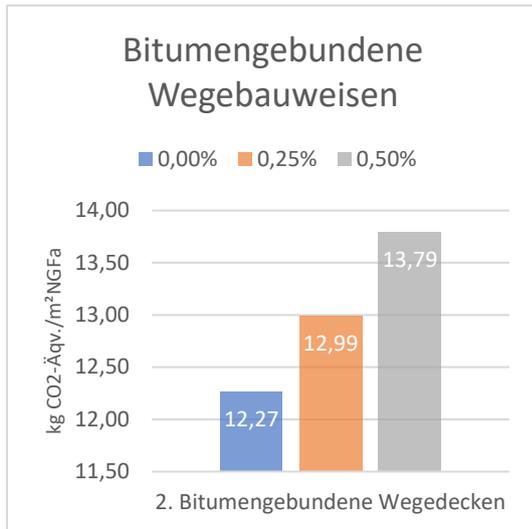


Abbildung 19 - Sensitivitätsanalyse Erneuerungsmaßnahmen Epoxidharzgebundene Wegebauweisen

Abbildung 20 - Sensitivitätsanalyse Erneuerungsmaßnahmen Bitumengebundene Wegebauweisen

3.4.7 Diskussion Modul D

Die Verrechnung des Moduls D (Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs- oder Recyclingpotenzial) ist mit der von OEKOBAU.DAT zur Verfügung gestellten Datensätze nicht normkonform. Dennoch werden energetische und stoffliche Gutschriften mit dem eLCA zur Verfügung gestellt. Es gilt zu bemerken, dass diese lediglich für eine annäherungsweise Betrachtung herangezogen werden können und eine vertiefende Betrachtung des Gesamtsystems für aussagekräftige Rückschlüsse benötigt.

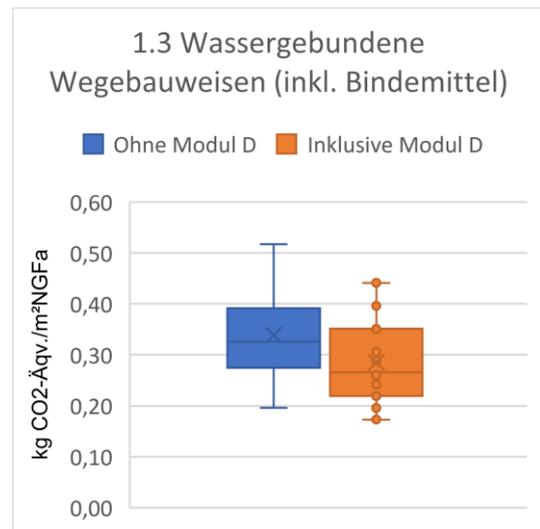
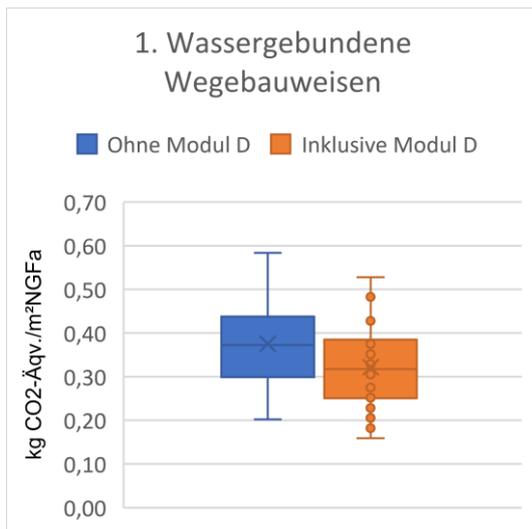


Abbildung 21 - Modul D: Wassergebundene Wegebauweisen

Abbildung 22 - Modul D: Wassergebundene Wegebauweisen (inkl. Bindemittel)

Die wassergebundenen Wegebauweisen (1.) verringern das GWP durch stoffliche Gutschriften von 0,37 auf 0,32 kg CO₂-Äqv./m²NGFa (-14%). Die wassergebundenen Wegebauweisen (inkl. Bindemittel) verringern durch Modul D das GWP von 0,34 auf 0,29 kg CO₂-Äqv./m²NGFa (-15%).

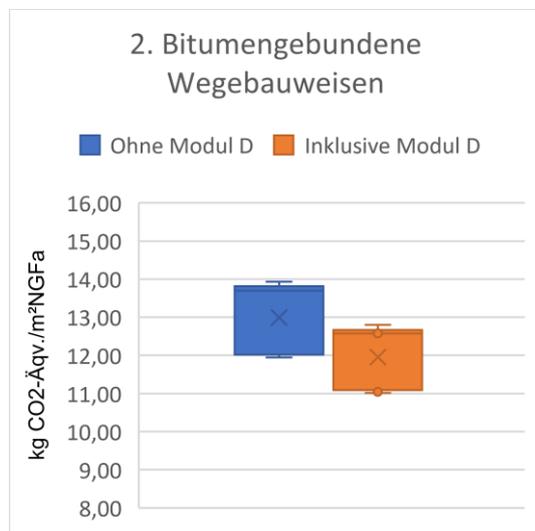


Abbildung 23 - Modul D: Bitumengebundene Wegebauweisen

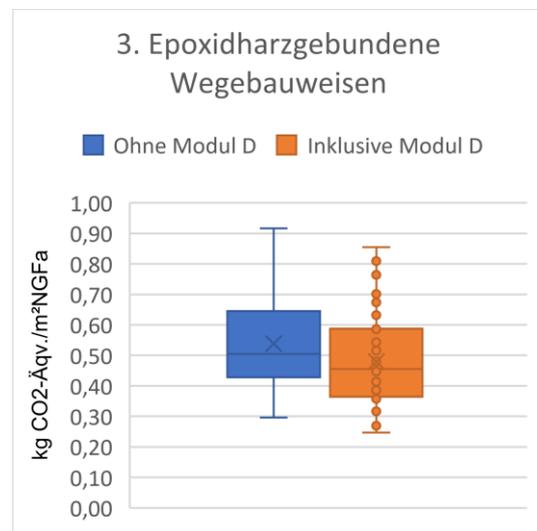


Abbildung 24 - Modul D: Epoxidharzgebunden Wegebauweisen

Die bitumengebundenen Wegebauweisen verringern durch das Modul D-Anwendung das GWP von 12,99 auf 11,95 kg CO₂-Äqv./m²NGFa (-8%) wodurch eine potentielle Schwäche dieser Betrachtungsweise offenkundig wird. Transportaufwendungen in dem Herstellungsprozess können nicht gutgeschrieben werden, jedoch Energieaufwendungen der Vorketten. Es gilt zu vermuten, dass bei einer näheren Betrachtung des Gesamtsystems inklusive der Wiederverwertung abweichende Ergebnisse erzielt werden könnten. Grundsätzlich kann Bitumen wieder eingeschmolzen werden, womit einer erneuten Verwendung von Produktionsabfällen nichts entgegensteht. Rückgebaute Beläge können wiederverwendet werden, wenn der Teeranteil den gesetzlichen Anforderungen genügt (vgl. Wecobis).

Die Epoxidharzgebundene Wegedecken verringern durch die Verrechnung des Moduls D das GWP von 0,54 auf 0,48 kg CO₂-Äqv./m²NGFa (-11%).

4. Ausblick

Neben der hauptsächlichen Anwendung von wassergebundenen Wegedecken wird im Wegebau in Sachsen-Anhalt in wenigen Bereichen auch sogenannter „farbiger Asphalt“, eine bitumengebundene Wegedecke aus Kalkstein oder Natursand oder Granit verschiedener Körnungen mit Farbpigmenten in hochwassergefährdeten Bereichen getestet. Aufgrund der verwendeten Datenbank OEKOBAU.DAT konnte diese Wegebauweise nicht bilanziert werden und könnte Teil einer vertiefenden Arbeit sein.

Darüber hinaus kann bei Aktualisierungen der Datenbankbasis zusätzlich ein Kaliwasserglas ausgewählter Bindemittelzusammensetzungen verschiedener Gesteinskörnungen für den Wegebau zusätzlich bilanziert werden.

Ebenfalls gilt es das Recyclingpotenzial, gerade der bitumengebundenen Wegebauweisen näher zu untersuchen um quantifizierbare Aussagen für weitere Bilanzierungen treffen zu können. Hierzu sollte die Frage beantwortet werden wie Bitumen als Nebenprodukt der Rohöldestillation für Benzin und Kerosin gutgeschrieben wird.

Die Human- und Ökotoxizität kann für Epoxidharze mit einem bestimmten Produkt und vorhandener Umweltproduktdeklaration vertiefend untersucht werden.

5. Anhang

5.1 Anhang eLCA Berichte Wegebauweisen

5.1.1 Wassergebundene Wegebauweisen

	Wegedecken
	LCA - Ökologische Qualität -
	<small>Seite 1 / 5</small>

Gesamtbilanz AUSWERTUNG

Projekt:	Wegedecken
Projektvariante:	Vorplanung
Bearbeiter:	Bernhard Fischer
Stand:	03.04.2022
Bilanzierungszeitraum:	30 Jahre
Bezugsfläche (NGF):	1 m ²
Masse gesamt:	0,628 t
Masse NGF:	627,50 kg/ m ² _{NGF}
Masse BGF:	627,50 kg/ m ² _{BGF}
Hinweis:	Diese Projektvariante enthält 2 Baustoffe mit einer abweichenden Nutzungsdauer.
Datensätze:	Diese Projektvariante verwendet 17 - davon 9 verschiedene - Herstelungsdatensätze, die sich wie folgt gliedern:
	Generische Datensätze: 17

<small>eLCA Version 0.9.7</small>	<small>OBD_2020 II</small>	<small>Stand 03.04.2022</small>	<small>Bearbeiter Bernhard Fischer</small>
-----------------------------------	----------------------------	---------------------------------	--

	Wegedecken LCA - Ökologische Qualität -
Seite 2 / 5	

Gesamt INKL. A1 - A3, C3

Indikator	Einheit	Gesamt / m ² Weg ^a
GWP	kg CO ₂ -Äqv.	0,4645172571
ODP	kg R11-Äqv.	1,1547357739E-14
POCP	kg Ethen-Äqv.	1,0863943948E-4
AP	kg SO ₂ -Äqv.	1,5380422332E-3
EP	kg PO ₄ -Äqv.	2,7942703665E-4
PE Ges.	MJ	8,8839201831
PENRT	MJ	6,6212396758
PENRM	MJ	0,0000000000
PENRE	MJ	6,6212396758
PERT	MJ	2,2626805073
PERM	MJ	0,0000000000
PERE	MJ	2,2626805073
ADP elem.	kg Sb-Äqv.	1,9727173744E-7
ADP fossil	MJ	5,9657034451

GWP Anteile

Bereich	Prozent	Gesamt / m ² Weg ^a
GWP	100,00	0,46451726
B6	0,00	0,00000000

	Wegedecken
LCA - Ökologische Qualität -	
Seite 3 / 5	

A1 - A3

Indikator	Einheit	Gesamt / m ² _{GGP}	%
GWP	kg CO2-Äqv.	0,2807273281	60,4
ODP	kg R11-Äqv.	1,0307890170E-14	89,3
POCP	kg Ethen-Äqv.	1,0933029582E-5	10,1
AP	kg SO2-Äqv.	4,0185804469E-4	26,1
EP	kg PO4-Äqv.	8,5345574066E-5	30,5
PE Ges.	MJ	5,5130021033	62,1
PENRT	MJ	3,6111490944	54,5
PENRM	MJ	0,0000000000	0
PENRE	MJ	3,6111490944	54,5
PERT	MJ	1,9018530089	84,1
PERM	MJ	0,0000000000	0
PERE	MJ	1,9018530089	84,1
ADP elem.	kg Sb-Äqv.	1,0230127731E-7	51,9
ADP fossil	MJ	3,0399271028	51,0

C3

Indikator	Einheit	Gesamt / m ² _{GGP}	%
GWP	kg CO2-Äqv.	0,1406809808	30,3
ODP	kg R11-Äqv.	7,9691575879E-16	6,9
POCP	kg Ethen-Äqv.	8,2564486868E-5	76,0
AP	kg SO2-Äqv.	9,0979049444E-4	59,2
EP	kg PO4-Äqv.	1,5480432117E-4	55,4
PE Ges.	MJ	2,5881370350	29,1
PENRT	MJ	2,3359891368	35,3
PENRM	MJ	0,0000000000	0
PENRE	MJ	2,3359891368	35,3
PERT	MJ	0,2521478982	11,1
PERM	MJ	0,0000000000	0
PERE	MJ	0,2521478982	11,1
ADP elem.	kg Sb-Äqv.	7,5593838338E-8	38,3
ADP fossil	MJ	2,2791195781	38,2

	Wegedecken
LCA - Ökologische Qualität -	
Seite 4 / 5	

D GESAMT (ENERGETISCH UND STOFFLICH)

Indikator	Einheit	Gesamt / m ² _{Wegf}	%
GWP	kg CO2-Äqv.	-0,0429624387	■
ODP	kg R11-Äqv.	-8,2917454995E-16	■
POCP	kg Ethen-Äqv.	9,3261560149E-6	■
AP	kg SO2-Äqv.	-1,0145455788E-4	■
EP	kg PO4-Äqv.	-1,9741427011E-5	■
PE Ges.	MJ	-0,7368323587	■
PENRT	MJ	-0,5733136162	■
PENRM	MJ	0,0000000000	■
PENRE	MJ	-0,5733136162	■
PERT	MJ	-0,1635187425	■
PERM	MJ	0,0000000000	■
PERE	MJ	-0,1635187425	■
ADP elem.	kg Sb-Äqv.	-9,5484025243E-9	■
ADP fossil	MJ	-0,5194229744	■

D ENERGETISCH (GEMÄSS DIN EN 15978)

Indikator	Einheit	Gesamt / m ² _{Wegf}	%
GWP	kg CO2-Äqv.	0,0000000000	■
ODP	kg R11-Äqv.	0,0000000000	■
POCP	kg Ethen-Äqv.	0,0000000000	■
AP	kg SO2-Äqv.	0,0000000000	■
EP	kg PO4-Äqv.	0,0000000000	■
PE Ges.	MJ	0,0000000000	■
PENRT	MJ	0,0000000000	■
PENRM	MJ	0,0000000000	■
PENRE	MJ	0,0000000000	■
PERT	MJ	0,0000000000	■
PERM	MJ	0,0000000000	■
PERE	MJ	0,0000000000	■
ADP elem.	kg Sb-Äqv.	0,0000000000	■
ADP fossil	MJ	0,0000000000	■

	Wegedecken
	LCA - Ökologische Qualität -
	Seite 5 / 5

D STOFFLICH (GEMÄSS DIN EN 15804)

Indikator	Einheit	Gesamt / m ² _{GGP}	%
GWP	kg CO2-Äqv.	-0,0429624387	■
ODP	kg R11-Äqv.	-8,2917454995E-16	■
POCP	kg Ethen-Äqv.	9,3261560149E-6	■
AP	kg SO2-Äqv.	-1,0145455788E-4	■
EP	kg PO4-Äqv.	-1,9741427011E-5	■
PE Ges.	MJ	-0,7368323587	■
PENRT	MJ	-0,5733136162	■
PENRM	MJ	0,0000000000	■
PENRE	MJ	-0,5733136162	■
PERT	MJ	-0,1635187425	■
PERM	MJ	0,0000000000	■
PERE	MJ	-0,1635187425	■
ADP elem.	kg Sb-Äqv.	-9,5484025243E-9	■
ADP fossil	MJ	-0,5194229744	■

Instandhaltung INKL. A1-3, C3, C4

Indikator	Einheit	Gesamt / m ² _{GGP}	%
GWP	kg CO2-Äqv.	0,0431089482	9,3 ■
ODP	kg R11-Äqv.	4,4255180974E-16	3,8 ■
POCP	kg Ethen-Äqv.	1,5141923026E-5	13,9 ■
AP	kg SO2-Äqv.	2,2639369406E-4	14,7 ■
EP	kg PO4-Äqv.	3,9277141420E-5	14,1 ■
PE Ges.	MJ	0,7827810448	8,8 ■
PENRT	MJ	0,6741014445	10,2 ■
PENRM	MJ	0,0000000000	■
PENRE	MJ	0,6741014445	10,2 ■
PERT	MJ	0,1086796003	4,8 ■
PERM	MJ	0,0000000000	■
PERE	MJ	0,1086796003	4,8 ■
ADP elem.	kg Sb-Äqv.	1,9376621789E-8	9,8 ■
ADP fossil	MJ	0,6466567642	10,8 ■

5.1.2 Bitumengebundene Wegebauweisen

	<p>Wegedecken</p> <hr/> <p>LCA - Ökologische Qualität -</p> <hr/> <p style="text-align: right; font-size: small;">Seite 1 / 2</p>				
<p>Ranking Baustoffe MASSENBILANZ</p> <p>Projekt: Wegedecken Projektvariante: Vorplanung Bearbeiter: Bernhard Fischer Stand: 03.04.2022</p> <p>Bilanzierungszeitraum: 30 Jahre Bezugsfläche (NGF): 1 m²</p>					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: x-small;"> <tr> <td style="width: 25%;">eLCA Version 0.9.7</td> <td style="width: 25%;">OBD_2020_II</td> <td style="width: 25%;">Stand 03.04.2022</td> <td style="width: 25%;">Bearbeiter Bernhard Fischer</td> </tr> </table>		eLCA Version 0.9.7	OBD_2020_II	Stand 03.04.2022	Bearbeiter Bernhard Fischer
eLCA Version 0.9.7	OBD_2020_II	Stand 03.04.2022	Bearbeiter Bernhard Fischer		

	Wegedecken
	LCA - Ökologische Qualität -
Seite 2 / 2	

#	Prozess	Modul	Bauteil	Menge Bauteil	Kostengruppe	Masse in kg
1	Schotter 16/32	A1 - A3 Aggregation	2.1 Asphaltgebundene Wegedecke [1537824]	1,00 m ²	521 Wege	280,00
2	Tragdeckschicht	A1 - A3 Aggregation	2.1 Asphaltgebundene Wegedecke [1537824]	1,00 m ²	521 Wege	168,00

eLCA Version 0.9.7	OBD_2020_II	Stand 03.04.2022	Bearbeiter Bernhard Fischer
--------------------	-------------	------------------	-----------------------------

5.1.3 Epoxidharzgebundenen Wegebauweisen

	Wegedecken LCA - Ökologische Qualität -	Seite 1 / 5
---	--	-------------

Gesamtbilanz AUSWERTUNG

Projekt:	Wegedecken
Projektvariante:	Vorplanung
Bearbeiter:	Bernhard Fischer
Stand:	03.04.2022
Bilanzierungszeitraum:	30 Jahre
Bezugsfläche (NGF):	1 m ²
Masse gesamt:	0,901 t
Masse NGF:	901,00 kg/ m ² NGF
Masse BGF:	901,00 kg/ m ² BGF
Hinweis:	Diese Projektvariante enthält 2 Baustoffe mit einer abweichenden Nutzungsdauer.
Datensätze:	Diese Projektvariante verwendet 21 - davon 14 verschiedene - Herstelungsdatensätze, die sich wie folgt gliedern:
	Generische Datensätze: 16
	Durchschnitt Datensätze: 5

eLCA Version 0.9.7	OekoBAUDAT 2016-I	Stand 03.04.2022	Bearbeiter Bernhard Fischer
--------------------	-------------------	------------------	-----------------------------

	Wegedecken LCA - Ökologische Qualität -	Seite 2 / 5
---	--	-------------

Gesamt INKL. A1 - A3, C3, C4

Indikator	Einheit	Gesamt / m ² WGA
GWP	kg CO2-Äqv.	0,6031376756
ODP	kg R11-Äqv.	2,9533282295E-9
POCP	kg Ethen-Äqv.	2,1900227891E-4
AP	kg SO2-Äqv.	1,5850380824E-3
EP	kg PO4-Äqv.	3,1412575082E-4
PE Ges.	MJ	11,8952762775
PENRT	MJ	11,3103592162
PENRM	MJ	1,9200000000
PENRE	MJ	9,3903592162
PERT	MJ	0,5849170613
PERM	MJ	0,0000000000
PERE	MJ	0,5849170613
ADP elem.	kg Sb-Äqv.	9,7373887391E-7
ADP fossil	MJ	11,0081644313

GWP Anteile

Bereich	Prozent	Gesamt / m ² WGA
GWP	100,00	0,60313768
B6	0,00	0,00000000

	Wegedecken
	LCA - Ökologische Qualität -
	Seite 3 / 5

A1 - A3

Indikator	Einheit	Gesamt / m ² _{WGP}	%
GWP	kg CO2-Äqv.	0,2916449508	48,4
ODP	kg R11-Äqv.	1,4778407037E-9	50,0
POCP	kg Ethen-Äqv.	6,0502396304E-5	27,6
AP	kg SO2-Äqv.	5,7096144527E-4	36,0
EP	kg PO4-Äqv.	9,6053032963E-5	30,6
PE Ges.	MJ	5,5677024303	46,8
PENRT	MJ	5,2503782096	46,4
PENRM	MJ	0,9600000000	50,0
PENRE	MJ	4,2903782096	45,7
PERT	MJ	0,3173242206	54,3
PERM	MJ	0,0000000000	0,0
PERE	MJ	0,3173242206	54,3
ADP elem.	kg Sb-Äqv.	4,1344866500E-7	42,5
ADP fossil	MJ	5,0575072754	45,9

C3

Indikator	Einheit	Gesamt / m ² _{WGP}	%
GWP	kg CO2-Äqv.	0,0818439957	13,6
ODP	kg R11-Äqv.	1,2703457536E-12	0,0
POCP	kg Ethen-Äqv.	8,2344210748E-5	37,6
AP	kg SO2-Äqv.	5,7844185743E-4	36,5
EP	kg PO4-Äqv.	1,4429247840E-4	45,9
PE Ges.	MJ	1,7025458401	14,3
PENRT	MJ	1,5908448995	14,1
PENRM	MJ	0,0000000000	0,0
PENRE	MJ	1,5908448995	16,9
PERT	MJ	0,1117009406	19,1
PERM	MJ	0,0000000000	0,0
PERE	MJ	0,1117009406	19,1
ADP elem.	kg Sb-Äqv.	1,3974508565E-7	14,4
ADP fossil	MJ	1,5460846515	14,0

	Wegedecken LCA - Ökologische Qualität -
Seite 4 / 5	

C4

Indikator	Einheit	Gesamt / m ² _{Weg}	%
GWP	kg CO2-Äqv.	5,3769356616E-4	0,1
ODP	kg R11-Äqv.	8,5946293940E-15	0,0
POCP	kg Ethen-Äqv.	3,0600706822E-7	0,1
AP	kg SO2-Äqv.	3,2621421449E-6	0,2
EP	kg PO4-Äqv.	4,4753971000E-7	0,1
PE Ges.	MJ	8,0287166160E-3	0,1
PENRT	MJ	7,3096536615E-3	0,1
PENRM	MJ	0,0000000000	0,0
PENRE	MJ	7,3096536615E-3	0,1
PERT	MJ	7,1906295447E-4	0,1
PERM	MJ	0,0000000000	0,0
PERE	MJ	7,1906295447E-4	0,1
ADP elem.	kg Sb-Äqv.	1,9969699787E-10	0,0
ADP fossil	MJ	7,0168576554E-3	0,1

D GESAMT (ENERGETISCH UND STOFFLICH)

Indikator	Einheit	Gesamt / m ² _{Weg}	%
GWP	kg CO2-Äqv.	-5,2333333333E-3	0,0
ODP	kg R11-Äqv.	-2,0233333333E-12	0,0
POCP	kg Ethen-Äqv.	-2,406666667E-6	0,0
AP	kg SO2-Äqv.	-1,636666667E-5	0,0
EP	kg PO4-Äqv.	-1,366666667E-6	0,0
PE Ges.	MJ	-0,0654700000	0,0
PENRT	MJ	-0,0643333333	0,0
PERT	MJ	-1,136666667E-3	0,0
ADP elem.	kg Sb-Äqv.	-2,270000000E-10	0,0
ADP fossil	MJ	-0,0643333333	0,0

D ENERGETISCH (GEMÄSS DIN EN 15978)

Indikator	Einheit	Gesamt / m ² _{Weg}	%
GWP	kg CO2-Äqv.	0,0000000000	0,0
ODP	kg R11-Äqv.	0,0000000000	0,0
POCP	kg Ethen-Äqv.	0,0000000000	0,0
AP	kg SO2-Äqv.	0,0000000000	0,0
EP	kg PO4-Äqv.	0,0000000000	0,0
PE Ges.	MJ	0,0000000000	0,0
PENRT	MJ	0,0000000000	0,0
PERT	MJ	0,0000000000	0,0
ADP elem.	kg Sb-Äqv.	0,0000000000	0,0
ADP fossil	MJ	0,0000000000	0,0

	Wegedecken
LCA - Ökologische Qualität -	
Seite 5 / 5	

D STOFFLICH (GEMÄSS DIN EN 15804)

Indikator	Einheit	Gesamt / m ² Weg ²	%
GWP	kg CO2-Äqv.	-5,23333333333E-3	■
ODP	kg R11-Äqv.	-2,02333333333E-12	■
POCP	kg Ethen-Äqv.	-2,40666666667E-6	■
AP	kg SO2-Äqv.	-1,63666666667E-5	■
EP	kg PO4-Äqv.	-1,36666666667E-6	■
PE Ges.	MJ	-0,0654700000	■
PENRT	MJ	-0,0643333333	■
PERT	MJ	-1,13666666667E-3	■
ADP elem.	kg Sb-Äqv.	-2,2700000000E-10	■
ADP fossil	MJ	-0,0643333333	■

Instandhaltung INKL. A1-3, C3, C4

Indikator	Einheit	Gesamt / m ² Weg ²	%
GWP	kg CO2-Äqv.	0,2291110355	38,0
ODP	kg R11-Äqv.	1,4742085854E-9	49,9
POCP	kg Ethen-Äqv.	7,5849664793E-5	34,6
AP	kg SO2-Äqv.	4,3237263755E-4	27,3
EP	kg PO4-Äqv.	7,3332699748E-5	23,3
PE Ges.	MJ	4,6169992905	38,8
PENRT	MJ	4,4618264534	39,4
PENRM	MJ	0,9600000000	50,0
PENRE	MJ	3,5018264534	37,3
PERT	MJ	0,1551728371	26,5
PERM	MJ	0,0000000000	■
PERE	MJ	0,1551728371	26,5
ADP elem.	kg Sb-Äqv.	4,2034542626E-7	43,2
ADP fossil	MJ	4,3975556467	39,9