

# Untersuchungen zu mineralischen Tränkungen von technischen Textilien für die flächige Instandsetzung von gerissenen Bauwerken mit Textilbeton

Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften  
von der Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen  
der Technischen Universität Dortmund

vorgelegt von  
Martin Lenting M. Sc.  
aus Ahaus

1. Gutachterin: Frau Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Jeanette Orłowsky
2. Gutachter: Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Raupach
3. Gutachter: Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang M. Willems

Tag der mündlichen Prüfung: 22.06.2023

## **Danksagung**

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Labor Bauphysik der FH Münster in Kooperation mit dem Lehrstuhl Werkstoffe des Bauwesens der Technischen Universität Dortmund.

In erster Linie möchte ich mich bei meiner Doktormutter Frau Prof. Dr.-Ing. Jeanette Orłowsky bedanken, die mir die Möglichkeit gegeben hat, an ihrem am Lehrstuhl promovieren zu können. Ich habe stets große Freude bei der Mitarbeit an ihrem Lehrstuhl gehabt und konnte mit dem mir entgegengebrachten Vertrauen meine Ideen und Vorstellungen in der Forschung verfolgen und weiterentwickeln. Zahlreiche gute Ratschläge und intensive wissenschaftliche Diskussionen waren wegweisend für den Erfolg dieser Arbeit.

Ein großer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Martin Homann, der mich bereits seit dem Bachelorstudium gefördert hat und mir die Möglichkeit gibt bei ihm als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig zu sein. Er hat mich maßgeblich dazu bewegt, zu promovieren. Seine stetige Unterstützung und Förderung sowie die Freiheit, eigenen Forschungsideen nachzugehen, haben mich über die letzten Jahre geprägt.

Weiterhin möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Michael Raupach und Prof. Dr.-Ing. Wolfgang M. Willems für die Übernahme der Begutachtung dieser Arbeit bedanken.

Bei Prof. Dr.-Ing. Jörg Harnisch möchte ich mich für den Kontakt zu Jeanette Orłowsky sowie für einige gute Diskussionen zu Themengebieten dieser Arbeit bedanken.

Ein großer Dank gilt auch allen Mitarbeitenden des Lehrstuhls Werkstoffe des Bauwesens der TU Dortmund sowie den Mädels und Jungs aus der Halle, ohne deren Hilfe die Versuche zu dieser Arbeit nicht hätten durchgeführt werden können. Monika Sander und Alina Kalke ein Dank für jegliche Unterstützung und das regelmäßige Ausschalen meiner Probekörper. Weiterhin gilt ein Dank Adrian Vörös, der mich bei der Mikroskopie zahlreicher Rovingquerschnitte unterstützt hat. Ein besonderes Dankeschön gilt Markus Beßling. Seine fachliche Kompetenz sowie zahlreiche gemeinsame Diskussionen waren unabdingbar für den Erfolg dieser Arbeit. Allen Kolleginnen und Kollegen aus Dortmund möchte ich im Besonderen für das kollegiale Miteinander in den letzten Jahren danken.

Des Weiteren möchte ich mich bei meinen Kolleginnen und Kollegen des Fachbereichs Bauingenieurwesen der FH Münster herzlich bedanken. Sie haben jederzeit für persönliche oder fachliche Anliegen ein offenes Ohr und sorgen jeden Tag dafür, dass ich seit Jahren gerne zur Arbeit gehe.

Meinem Bruder Christoph danke ich für die fachliche und persönliche Unterstützung sowie für die Möglichkeit, Messgeräte der Universität zu Köln und der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster nutzen zu können. In diesem Zusammenhang gilt auch ein Dank an Christian Vollmer und Kollegen des Instituts für Mineralogie der WWU Münster. Sie haben mich bei der Rasterelektronenmikroskopie und Röntgenfluoreszenzanalyse tatkräftig unterstützt.

Dem Team des ibac der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen gilt ein großer Dank für die Unterstützung bei der Probenvorbereitung und der Durchführung von Rissüberbrückungsversuchen nach MITEX in deren Laborräume. Insbesondere sei Cynthia Morales Cruz genannt, die sich Zeit für gute Diskussionen und wertvolle Ratschläge genommen hat.

Ich danke einigen Industriepartnern für die Bereitstellung von Probenmaterialien. Henning von Daake und der Fa. Pagel Spezial-Beton danke ich für Dutzende Säcke TF10 und die Unterstützung bei der Spritzbetonapplikation. Eugen Wolf und Kollegen der Fa. Remmers danke ich für einige Gebinde Kieselsäureester, fachliche Diskussionen und der Herstellung von Kieselsäureester 100 ohne Lösemittel. Weiterhin danke ich der Fa. SGL Carbon und der Fa. Tejin Carbon für zahlreiche Spulen Carbonendlosfasern.

Ein besonderer Dank gilt meiner Frau, die mir immer ein liebevoller Rückhalt ist und mich insbesondere in den letzten Monaten dieser Arbeit bedingungslos unterstützte. Danke, Anna!

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
1.1	Ausgangslage und Motivation .....	1
1.2	Ziel der Arbeit .....	3
1.3	Vorgehensweise .....	4
2	Stand der Wissenschaft .....	7
2.1	Verbundwerkstoff Textilbeton .....	7
2.1.1	Beton/Mörtel/Feinbeton .....	7
2.1.2	Textile Bewehrung .....	9
2.1.3	Tränkungsmaterialien/Textiltränkung .....	11
2.1.4	Herstellung des Verbundwerkstoffes .....	13
2.2	Tragverhalten von Textilbeton .....	14
2.2.1	Tragverhalten – Faserstrangzugversuche am Roving .....	17
2.2.2	Tragverhalten – Einaxiale Zugversuche an Dehnkörperproben .....	18
2.2.3	Versagensarten bei Dehnkörperproben .....	20
2.2.4	Rissbildung .....	21
2.2.5	Einfluss von Rovingquerschnitt und Rovingumfang .....	25
2.3	Einsatzgebiete .....	26
2.3.1	Instandsetzung mit Textilbeton zur Rissüberbrückung .....	26
2.3.2	Instandsetzung nach dem Konzept DURTEX .....	27
2.3.3	Instandsetzung nach BAW-Merkblatt (MITEX) .....	28
2.3.4	Rissheilung (bewehrter) Bauteile aus Beton .....	28
2.4	Mineralisch basierte Tränkungen und Beschichtungen textiler Bewehrung .....	30
2.5	Zusammenfassung und offene Fragen .....	33
3	Materialauswahl und Versuchskonzept .....	35
3.1	Materialkomponenten .....	35
3.1.1	Technische Textilien – AR-Glas, Basalt und Carbon .....	35
3.1.2	Tränkungsmaterial – Kieselsäureester .....	36
3.1.3	Feinbetone .....	39
3.2	Herstellungsverfahren .....	39
3.2.1	Textiltränkung .....	40
3.2.2	Dehnkörperproben .....	42
3.2.3	Faserstrangzugproben .....	44
3.3	Versuchsaufbauten und Durchführung .....	44
3.3.1	Durchführung einaxialer Zugversuche an Dehnkörperproben .....	44
3.3.2	Photogrammetrische Messtechnik .....	49
3.3.3	Durchführung von Faserstrangzugversuchen .....	56
3.4	Weiterführende Untersuchungen an Verbundprobekörpern .....	57
3.4.1	Untersuchungen zum Rovingumfang und zur Rovingquerschnittsfläche .....	57
3.4.2	Untersuchungen zur Rissheilung von bewehrten Feinbetonproben .....	62

3.4.3	Durchführung von Rissüberbrückungsversuchen nach MITEX .....	64
4	Ergebnisse der einaxialen Zugversuche an Dehnkörperproben und am Faserstrang .....	69
4.1	Einaxiale Zugversuche an Dehnkörperproben .....	69
4.1.1	Zugtragverhalten – Spannungs-Dehnungsbeziehung .....	69
4.1.2	Rissbildung / Rissbreiten .....	73
4.1.3	Versagensmechanismen .....	77
4.2	Faserstrangzugversuche.....	78
4.3	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	80
5	Interpretation und Analyse der Ergebnisse und Einflussgrößen .....	83
5.1	Einflussgrößen auf das Zugtragverhalten und die Rissbildungseigenschaften .....	83
5.1.1	Einflussbetrachtung des Tränkungsmaterials auf den Faservolumengehalt.....	83
5.1.2	Einflussbetrachtung der Trängung auf den Umfang und die Querschnittsfläche .....	86
5.1.3	Einflussbetrachtung der Textilgeometrie auf die Zugtragfähigkeit und Rissbildung	90
5.1.4	Einflussbetrachtung gealterter Proben auf die Zugtragfähigkeit und Rissbildung....	91
5.1.5	Zusammenfassung der unterschiedlichen Einflussgrößen.....	94
5.2	Analytische Untersuchungen.....	95
5.2.1	Rasterelektronenmikroskopie-Analyse.....	95
5.2.2	Thermogravimetrische Analyse des Tränkungsmaterials.....	101
5.2.3	Zusammenfassung der Ergebnisse aus den analytischen Untersuchungen .....	104
6	Weitergehende Untersuchungen am entwickelten Instandsetzungssystem.....	105
6.1	Dehnkörperproben mit unterschiedlicher Beanspruchung im einaxialen Zugversuch	105
6.1.1	Dehnkörperproben nach beschleunigter Alterung durch temperierte Wasserlagerung	105
6.1.2	Dehnkörperproben unter Temperatureinfluss.....	108
6.1.3	Dehnkörperproben mit Bewehrung aus Textilgelegen.....	110
6.2	Bewertung der Rissüberbrückungsfähigkeit.....	113
6.2.1	Rissheilung gerissener Dehnkörperproben.....	113
6.2.2	Zugversuche an Rissüberbrückungsprobekörpern nach BAW-Merkblatt.....	118
6.3	Zusammenfassung der weitergehenden Untersuchungsergebnisse.....	122
7	Zusammenfassung, Schlussfolgerung und Ausblick .....	124
7.1	Zusammenfassung .....	124
7.2	Schlussfolgerungen.....	126
7.3	Ausblick.....	128
8	Literatur .....	130
9	Anhang .....	142

## Bildverzeichnis

Bild 1-1: Übersicht zur Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit.....	5
Bild 2-1: Zugprüfapparatur für textile Bewehrungen nach [Bie17]: a) Faserstrang, b) Gelegeausschnitt, c) Dehnkörper.....	15
Bild 2-2: Qualitativer Verlauf von Spannungs-Dehnungslinien (Dehnkörper) mit Steifigkeitsdefiziten, idealisierter Verlauf der Spannungs-Dehnungsbeziehung nach [Ku13].....	17
Bild 2-3: Probekörpergeometrie für Dehnkörperversuche gemäß [Sch18a] .....	19
Bild 2-4: Einfluss des Tränkungsgrades auf die Spannungsverteilung im Roving gemäß [Jes10, Lor15b] 21	
Bild 2-5: Einfluss der Tränkungsmaterialien von Textilgelegen auf das Zugtragverhalten von carbonbewehrtem Textilbeton [Mor20], a) Spannungs-Dehnungskurven, b) Rissbreiten-Spannungskurven .....	24
Bild 2-6: Aufbau und Funktionsweise des Instandsetzungssystems nach [BAW19a] in Anlehnung an [Orl11, Büt12b] .....	28
Bild 3-1: Ausreagierte Kieselsäureester a) KSE 100, b) KSE 300, c) KSE 500E, d) KSE 100 o. L.....	38
Bild 3-2: Tränkungsanlage mit Drei-Walzen-Foulard und Umlenkrollen.....	40
Bild 3-3: a) Propellerrahmen, b) Aufgerollte einfach getränkte Carbonendlosfasern, c) Aufweitung durch Propellerrahmen (1) und geglättete Knickstellen (2) nach zweiter Tränkung.....	41
Bild 3-4: Kunststoffschalung mit getränkten Carbonrovings auf Rütteltisch befestigt.....	43
Bild 3-5: Faserstrangzugprobe mit geklebten Lasteinleitungsbereichen.....	44
Bild 3-6: a) Schematische Probekörperhalterung, b) Eingebaute Dehnkörperprobe in der Zugprüfmaschine .....	45
Bild 3-7: a) Probekörper mit induktiven Wegaufnehmern, b) Visualisierung der Dehnung mittels ARAMIS <sup>®</sup> -Messsystem GOM Correlate Pro (Flächenkomponente mit Hauptformänderung) .....	46
Bild 3-8: a) Temperaturprüfkammer mit ARAMIS <sup>®</sup> -Messsystem, b) Visualisierung der Dehnung mit GOM Correlate Pro (Flächenkomponente mit Hauptformänderung).....	47
Bild 3-9: a) 15x15 Pixelfacetten mit 2 Pixel Überschneidung, b) linke und rechte Bildaufnahme eines Facettenpaares nach Deformation [Gom13].....	49
Bild 3-10: Beispielflächen stochastischer Muster, a) Feines Muster, b) Mittleres Muster, c) Grobes Muster [Ull19] .....	50
Bild 3-11: Einfluss der Facettenauswahl im Rissrandbereich auf die Rissbreite, a) Stochastisches Muster mit Einzelriss, b) Dehnungsdarstellung bis 3 %, c) Dehnungsdarstellung bis 1,5 % .....	51
Bild 3-12: Rissvermessung über Extensometer (grüne Pfeile) bei unterschiedlicher Dehnungsdarstellung von 0,0 bis 1,0 % in a) und 0,0 bis 3,0 % in b).....	52
Bild 3-13: a) Spannungs-Dehnungsbeziehung von Einzelmesswertkurven und Mittelwertkurve, b) Detail mit Spannungssprüngen der Mittelwertkurve.....	55
Bild 3-14: Rissbreiten-Spannungs-Diagramm mit Einzelrissen und Mittelwertgraphen .....	55
Bild 3-15: Oberes Keilschraubspannzeug mit eingebauter Faserstrangzugprobe (SGL KSE 100 o. L.) ....	56
Bild 3-16: Mikroskopieaufnahmen von Rovingquerschnitten aus Dehnkörperproben, a) ovaler Roving mit KSE 500E Tränkung, b) flacher Roving mit zweifacher KSE 100 ohne Lösemittel-Tränkung.....	57
Bild 3-17: Probenzuschnitt für mikroskopische Aufnahmen: Dehnkörperprobe mit Zuschnitt der Einzelproben (oben), Querschnitt linke Probe (L), Querschnitte mittlere Probe (M), Querschnitt rechte Probe (R) .....	58
Bild 3-18: Erzeugte Binärgrafik aus Graustufenbild über Schwellwertbestimmung .....	59
Bild 3-19: Isolierte Rovingfläche mit definierter Umfangslänge durch Partikelreduzierung.....	60

Bild 3-20: Visualisierter Ablauf der Ermittlung von Rovingquerschnittsfläche und Rovingumfang mit ImageJ, a) Mikroskopieaufnahme b) 8-Bit-Graustufenbild, c) Kontrastverbesserung durch Minimum-Filter, d) Binärgrafik über Schwellwertverfahren, e) Auffüllen von Löchern, f) Egalisieren von Splitterpixel, g) Weichzeichnen über Gauß-Funktion, h) Scharfzeichnen und Glätten, i) Überlagerung von erzeugter Grenzfläche mit Graustufenbild .....	61
Bild 3-21: Geprüfte Dehnkörperproben mit Sägeschnitten und schematischer Probenpräparation für Rissheilungsuntersuchungen .....	62
Bild 3-22: Schematische Darstellung der Rissheilungsuntersuchung (100 mm Proben) in Anlehnung an den Versuchsaufbau zum Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen bei teilweisem Eintauchen nach DIN 15148.....	63
Bild 3-23: a) Druckwasserprüfanlage b) Probenhalterung zur rückseitigen Druckwasserbeanspruchung ..	63
Bild 3-24: Längsschnitt der Rissüberbrückungsprobekörper (gesägt aus Verbundprobekörper) .....	65
Bild 3-25: a) Schematischer Aufbau der Prüfeinrichtung zur Rissverteilung der Rissüberbrückungsprobekörper [BAW19a], b) Fotoaufnahme eines eingebauten Rissüberbrückungsprobekörpers in der Prüfeinrichtung .....	66
Bild 4-1: Spannungs-Dehnungsbeziehung von Dehnkörperproben mit ungetränkten und KSE 100 o. L. x2 getränkten Rovings, a) Einzelmesswerte über den ganzen Messbereich, b) Mittelwertkurven mit SD.....	69
Bild 4-2: Mittelwertkurven der Spannungs-Dehnungsbeziehung von Dehnkörperproben, a) AR-Glas-, Basalt- und Carbonrovings mit KSE 100-Tränkung, b) Carbonrovings mit unterschiedlicher KSE-Tränkung .....	71
Bild 4-3: Linearer Verlauf der Rissbreiten-Spannungsbeziehung von Dehnkörperproben mit unterschiedlich getränkten Rovings, a) mittlere Rissbreiten, b) maximale Rissbreiten .....	73
Bild 4-4: Darstellung des Verhältnisses von maximaler Rissbreite zu mittlerer Rissbreite von Dehnkörperproben mit mineralisch getränkten Carbonrovings .....	75
Bild 4-5: Mittlere Rissbreiten und mittlerer Rissabstand von Dehnkörperproben bei 1.000 N/mm <sup>2</sup> Zugspannung – Prüfserien mit unterschiedlicher Rovingtränkung und Tränkungshäufigkeit .....	75
Bild 4-6: Entwicklung primärer und sekundärer (diffuser) Rissbildung einer Dehnkörperprobe mit KSE 100 x2 Rovings in Bezug zur Spannungs-Dehnungslinie: (1) Erstriss, (2) primäre Risbildung, (3) Ende primäre Rissbildung, (4) endgültiges Rissbild .....	76
Bild 4-7: Versagenszustände und Bruchbild beim Erreichen der Bruchspannung, a) Versagen im Übergang zur Klemmvorrichtung (KSE 100), b) Bruchbild Mischversagen mit teleskopartigem Kernfaserauszug (KSE 100), c) Bruch der Bewehrung im Übergang zur Klemmvorrichtung (KSE 100 o. L. x2), d) Versagen mittig in der freien Weglänge (KSE 100 o. L. x2) .....	77
Bild 4-8: Zugfestigkeit $\sigma_{\text{tex}}$ einzelner Rovings mit unterschiedlicher Tränkung.....	78
Bild 5-1: Gelabscheidungsraten (Verkieselung) am Roving in Petrischalen bei unterschiedlichen Luftfeuchten .....	84
Bild 5-2: Querschnittsaufnahmen eines ungetränkten Rovings (SGLnat), a) links, b) mittig, c) rechts aus der freien Messlänge einer Dehnkörperprobe (siehe Abschnitt 3.4.1) .....	86
Bild 5-3: Querschnittsaufnahmen eines Rovings mit KSE 100-Tränkung, a) links, b) mittig, c) rechts aus der freien Messlänge einer Dehnkörperprobe .....	87
Bild 5-4: Querschnittsaufnahmen eines Rovings mit KSE 100 x2-Tränkung, a) links, b) mittig, c) rechts aus der freien Messlänge einer Dehnkörperprobe .....	87
Bild 5-5: Querschnittsaufnahmen eines Rovings mit einfacher KSE 100 o. L.-Tränkung, a) links, b) mittig, c) rechts aus der freien Messlänge eines Dehnkörpers.....	88

Bild 5-6: Querschnittsaufnahmen eines Rovings mit KSE 100 o. L. x2-Tränkung, a) links, b) mittig, c) rechts aus der freien Messlänge eines Dehnkörpers .....	88
Bild 5-7: Graustufenbild einer KSE 100 o. L. x2 Probe mit entsprechendem Histogramm für die Schwellwertbildung einer Binärgrafik.....	89
Bild 5-8: Rovingquerschnitt KSE 100 o. L. x2 mit unterschiedlich definiertem Umfang (rot/weiß) in a) und Detailansicht einzelner Filamente in b) .....	90
Bild 5-9: Einfluss des mittleren Rovingumfangs auf die Textilizugspannung und den mittleren Rissabstand .....	91
Bild 5-10: Dehnkörperproben nach 365 Tagen Wasserlagerung bei 20 °C mit KSE 100 getränkten Rovings, a) Spannungs-Dehnungsbeziehung, b) Rissbreiten-Spannungsbeziehung.....	92
Bild 5-11: Dehnkörperproben nach 720 Tagen Lagerung im Klimaschrank bei 20 °C und 65 % r. F. mit KSE 100 getränkten Rovings, a) Spannungs-Dehnungsbeziehung, b) Rissbreiten-Spannungsbeziehung .	93
Bild 5-12: REM-Aufnahmen Rovingquerschnitte in EP-Harz, a) SGLnat, b) KSE 100, c) KSE 100 o. L., d) KSE 100 o. L. x2. REM-Einstellungen: Spannung 20 kV, Strahldurchmesser 60, Druck 50-70 Pa, Signal BES.....	96
Bild 5-13: FIB-REM-Aufnahme eines KSE 100 o. L. x2 getränkten Carbonrovings in Faserlängsrichtung mit Schalen- und Rissbildung der Tränkung (S&R), Längsrisse (LR) in der Tränkung zwischen Filamenten, Tränkungsfragmente (FR) am teilweise getränkten Einzelfilament (FIL) .....	97
Bild 5-14: REM-EDX-Aufnahme KSE 100 o. L. x2 getränkter Roving in EP-Mount gebettet mit Element-Counts über Spottmessung, a) Zwischenraum mit KSE 100, b) Zwischenraum mit KSE 100, c) Mittig auf Filamentquerschnitt, d) EP-Matrix .....	98
Bild 5-15: REM-Aufnahme eines KSE 100 o. L. x2 getränkten Rovings in Feinbeton aus einer geprüften Dehnkörperprobe mit Detailbestimmung für qualitative Elementbestimmung mittels EDX-Detektor. Filamentbündel (FB), Filamentansammlung (FS), Einzelfilamente (FIL) und Gesteinskörnung (GK).....	99
Bild 5-16: REM-EDX-Aufnahme KSE 100 o. L. x2 getränkter Roving im Feinbeton mit Element-Counts .....	100
Bild 5-17: EDX-Mapping mit Elementverteilung, a) REM Referenzbild, b) Calcium, c) Silicium, d) Kohlenstoff. Rovingbereiche: Filamentbündel (FB), Filamentansammlung (FS) und Einzelfilamente (FIL) .....	100
Bild 5-18: Messkurven aus thermogravimetrischer Analyse (TGA) und dynamischer Differenzkalorimetrie (DSC) von ausreagiertem Kieselgel der KSE 100 o. L.-Tränkung .....	102
Bild 5-19: Kieselgel (KSE 100 o. L.) a) ausreagiert unbehandelt und b) nach TGA bis 1.050 °C .....	103
Bild 6-1: Spannungs-Dehnungsbeziehung, a) Einzelreferenzen zu den wassergelagerten Proben und Referenzprüfseriem KSE 100 x2, b) Mittelwertkurven nach Wasserlagerung bei 50 °C .....	106
Bild 6-2: Linearer Verlauf der Rissbreiten-Spannungsbeziehung der Prüfserien nach beschleunigter Alterung bei 50 °C Wasserlagerung mit unterschiedlich getränkten Rovings, a) Mittlere Rissbreiten, b) Maximale Rissbreiten .....	107
Bild 6-3: Dehnkörperproben unter Temperaturbeanspruchung (160 °C) mit KSE 100 x2 getränkten Rovings a) Spannungs-Dehnungsbeziehung, b) Rissbreiten-Spannungsbeziehung.....	109
Bild 6-4: Gelege 18/15 mm mit 50k Ketrovings (0 °-Richtung) und 24k Schussrovings (90 °-Richtung) .....	110
Bild 6-5: Dehnkörperproben mit KSE 100 o. L. x2 getränkten Gelegen a) Spannungs-Dehnungsbeziehung, b) Rissbreiten-Spannungsbeziehung.....	111
Bild 6-6: Entwicklung primärer und sekundärer (diffuser) Rissbildung einer Dehnkörperprobe mit KSE 100 o. L. x2 Gelege in Bezug zur Spannungs-Dehnungslinie.....	112



Bild 6-7: Rissheilung von mehrfachgerissenen Dehnkörperproben mit Rissen $\leq 0,1$ mm im entlasteten Zustand.....	113
Bild 6-8: Rissheilung von mehrfachgerissenen Dehnkörperproben mit Rissen $> 0,1$ mm im entlasteten Zustand.....	114
Bild 6-9: Rissheilung von mehrfachgerissenen Dehnkörperproben mit Rissen $w_{cr} < 0,10$ mm bei 0,5 bar [Len21a] .....	115
Bild 6-10: Rissheilung von mehrfachgerissenen Dehnkörperproben mit Rissen $w_{cr} < 0,10$ mm bei 1,0 bar [Len21a] .....	116
Bild 6-11: Mikroskopieaufnahmen von Dehnkörperproben mit a) Riss vor Heilungsversuch, b) geheiltem Riss und c) teilweise geheiltem Riss (Wasserdruck 0,5 bar) [Len21b].....	117
Bild 6-12: Rissüberbrückungsprobekörper I mit KSE 100 o. L. x2 Gelegen – Rissaufweitung 0,6 mm...	118
Bild 6-13: Rissüberbrückungsprobekörper II mit Fehlstelle im Textilbeton (rote Ellipse) .....	120
Bild 6-14: Rissüberbrückungsprobekörper II mit KSE 100 o. L. x2 Gelegen – Rissaufweitung 0,9 mm .	120

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1 Eigenschaften unterschiedlicher Textilfasern .....	10
Tabelle 2-2: Übersicht über die Rissbreiten kurz vor dem Versagen von carbonbewehrten Proben unter Zugbeanspruchung nach [Mor20] mit Ergänzungen aus [Wil21] .....	23
Tabelle 3-1: Eigenschaften der verwendeten Rovings .....	35
Tabelle 3-2: Eigenschaften unterschiedlicher Steinfestiger auf Kieselsäureester-Basis .....	37
Tabelle 3-3: Eigenschaften der verwendeten Feinbetone.....	39
Tabelle 3-4: Tränkungsablauf, Lagerungszeiten und Klimarandbedingungen.....	42
Tabelle 3-5: Nomenklatur der Prüfserien .....	48
Tabelle 4-1: Prüfserie I – Dehnkörperproben mit Textilvariation ungetränkt und mit KSE 100-Tränkung – Bruchlast, Bruchspannung und Rissanzahl .....	72
Tabelle 4-2: Prüfserie II – Dehnkörperproben mit KSE-Variation an SGL Rovings – Bruchlast, Rissbreiten und Rissanzahl.....	81
Tabelle 5-1: Fasertränkungs- und Faservolumengehalt getränkter Carbonrovingproben .....	85
Tabelle 5-2: Prüfserie III – Dehnkörperproben KSE 100 und Alterung klimatisch und wassergelagert – Bruchlast, Rissbreiten und Rissanzahl.....	94
Tabelle 6-1: Prüfserie IV – Dehnkörperproben beschleunigt gealtert – Bruchlast, Rissbreiten und Rissanzahl.....	108
Tabelle 6-2: Prüfserie V – Dehnkörperproben temperiert auf 160 °C – Bruchlast, Rissbreiten und Rissanzahl.....	109
Tabelle 6-3: Prüfserie VI – Dehnkörperproben mit Textilgelegen – Bruchlast, Rissbreiten und Rissanzahl .....	111
Tabelle 6-4: Massenänderung gerissener Dehnkörperproben unter druckloser Wasserbeanspruchung ...	115

## Gleichungen

$$A = \frac{f}{\rho} \quad [\text{mm}^2] \quad (2-1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 1000 \quad [-] \quad (3-1)$$

$$\sigma_{DKP} = \frac{F}{A_{Rov} \cdot n} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (3-2)$$

$$120 \text{ mm} \leq l_E = \left( \frac{w_{min,lab}}{0,1} \right) * \gamma * MaW \leq 200 \text{ mm} \quad [\text{mm}] \quad (6-1)$$

**Symbole**

$A_i$	mm <sup>2</sup>	Querschnittsfläche eines Roving einer Dehnkörperprobe
$A_{Rov,L}$	mm <sup>2</sup>	Querschnittsfläche eines Einzelroving (linke Schnittkante im Dehnkörper)
$A_{Rov,M}$	mm <sup>2</sup>	Querschnittsfläche eines Einzelroving (mittige Schnittkante im Dehnkörper)
$A_{Rov,R}$	mm <sup>2</sup>	Querschnittsfläche eines Einzelroving (rechte Schnittkante im Dehnkörper)
$A_{tex}$	mm <sup>2</sup>	Rechnerische Querschnittsfläche Einzelroving
$d$	mm	Dicke
$D_{max}$	mm	Korndurchmesser
$\varepsilon$	[-]	Dehnung
$EW f_{HZ}$	MPa	Einzelwert der Haftzugfestigkeit
$F$	kN	Kraft
$F_u$	kN	Bruchlast
$f$	tex	Textilfeinheit
$\gamma$	[-]	Sicherheitsbeiwert
$K_\alpha$	-	Charakteristische Linie des Röntgenspektrums
$\Delta l$	mm	Längenänderung
$l_0$	mm	Ausgangslänge
$l_E$		Länge Enthftungsbereich
$MW f_{HZ}$	MPa	Mittelwert der Haftzugfestigkeit
$n$	-	Anzahl
$\rho$	kg/dm <sup>3</sup>	Dichte
$\sigma_{DKP}$	N/mm <sup>2</sup>	Zugspannung einer Dehnkörperprobe
$\sigma_{RÜPK}$	N/mm <sup>2</sup>	Zugspannung eines Rissüberbrückungsprobekörpers
$\sigma_{tex}$	N/mm <sup>2</sup>	Textilzugspannung eines Faserstrangs
$\sigma_u$	N/mm <sup>2</sup>	Bruchspannung
$U_i$	mm	Mittlerer Rovingumfang einer Dehnkörperprobe
$U_{Rov,L}$	mm	Rovingumfang eines Einzelroving (linke Schnittkante im Dehnkörper)
$U_{Rov,M}$	mm	Rovingumfang eines Einzelroving (mittige Schnittkante im Dehnkörper)
$U_{Rov,R}$	mm	Rovingumfang eines Einzelroving (rechte Schnittkante im Dehnkörper)
$w_{0,95}$	mm	Rissbreite des 95 % Perzentils
$w_{cr}$	mm	Rissbreite
$w_{cr,mean}$	mm	Mittlere Rissbreite
$w_{cr,max.}$	mm	Maximale Rissbreite
$w_{GK}$	mm	Rissaufweitung im Grundkörper des RÜPK
$w_{min,lab}$	mm	Minimale Rissaufweitung in der Systemprüfung nach MITEX
$\Delta w_{op}$	mm	Rissaufweitung im Bauwerk
$\omega_i$	mm	Mittlerer Rissabstand

**Abkürzungen**

AbZ	Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung
AR	Alkaliresistent
BAS	Basalt
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
BES	<i>Backscattered Electron Shadow Image</i> / Rückstreuелеktronenbild (SE + BSE)
BSE	<i>Backscattered Electron</i> / Rückgestreute Elektronen
C3/C <sup>3</sup>	Carbon Concrete Composite e. V.
DAfStb	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton
DDK	Dynamische Differenzkalorimetrie
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DIC	<i>Digital Image Correlation</i> / Digitale Bildkorrelation
DIN	Deutsche Industrienorm
DKP	Dehnkörperprobe
DMS	Dehnungsmessstreifen
DSC	<i>Differential Scanning Calorimetry</i> / siehe DDK
DURTEX	Dauerhaft Wasserundurchlässiger Rissüberbrückender Textilbeton
EDX	<i>Energy Dispersive X-ray spectroscopy</i> / Energiedispersive Röntgenspektroskopie
EN	Europäische Norm
EPI	<i>Epoxy Impregnated</i> / Epoxidharzgetränkt
FB	Filamentbündel
FIL	Filament
FR	Tränkungsfragmente der Kieselsäureestertränkung
FS	Filamentansammlung
GK	Gesteinskörnung
GZG	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
IBAC	Institut für Baustoffforschung der RWTH Aachen University
ISO	Internationale Organisation für Normung
KSE	Kieselsäureester
L	Links
LR	Längsriss
M	Mitte

MaW	Maschenweite
MDF	Mitteldichte Faserplatte
MITEX	Flächige Instandsetzung von Wasserbauwerken mit textilbewehrten Mörtel- und Betonschichten
NAT	<i>natural</i> / steht für ungetränkt
NMB	Nichtmetallische Bewehrung
NMR	<i>nuclear magnetic resonance</i> / Kernspinresonanzspektroskopie
PA	Polyacrylat
PECVD	<i>Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition</i> / plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung
PU	Polyurethan
R	Rechts
Ri	Riss ( <i>i</i> = Rissnummer)
REM	Rasterelektronenmikroskop
RGB	Rot-Grün-Blau Farbraum
RL	Richtlinie
RÜK	Rissüberbrückungsklasse
RÜPK	Rissüberbrückungsprobekörper
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
S & R	Schalen- und Rissbildung
SBR	<i>styrene-butadiene rubber</i> / Styrolbutadien Kautschuk
SE	<i>Secondary Electrons</i> / Sekundärelektronen
SFB	Sonderforschungsbereich
TEOS	Tetraethylorthosilicat
TF	Textilfeinbeton
TGA	Thermogravimetrische Analyse
TRC	<i>Textile Reinforced Concrete</i> / Textilbewehrter Beton
TRM	<i>Textile Reinforced Mortar</i> / Textilbewehrter Mörtel
TSP	Taillierte Streifenproben
TU	Technische Universität
TW	Trinkwassermörtel
WU	Wasserundurchlässig
ZTV	Zusätzliche technische Vertragsbedingung



## 1 Einleitung

### 1.1 Ausgangslage und Motivation

Stahlbeton hat sich für die Realisierung verschiedenster Ingenieurbauwerke als wichtigster Baustoff etabliert. Die jährlich verbaute Menge allein in Deutschland wird mit 70 bis 100 Millionen Kubikmeter angegeben [C322c, VDZ22]. Korrekt geplant und ausgeführt ist Stahlbeton ein Material mit hoher Lebensdauer. Jedoch zeigt sich in der Praxis, dass auch vor dem Ende der geplanten Gesamtnutzungsdauer die Gebrauchstauglichkeit eingeschränkt sein kann oder die Standsicherheit gefährdet ist. Planungs- und Ausführungsfehler, wie zu geringe Betondeckungen oder unerwartete Expositions- und Witterungseinflüsse, führen zu Schäden am Bauwerk. Hinzu kommen innere Zwangsspannungen durch Temperaturwechsel oder äußere Zwänge infolge von Baugrundbewegungen, die zu Rissen führen können.

Insgesamt weist die heutige Bausubstanz aus Stahlbeton, die durch das starke Wirtschaftswachstum der 1950er und 1960er Jahre geprägt ist, in umfassenden Teilen einen Instandsetzungsbedarf auf. Datenerhebungen des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung e. V. bezifferten den Aufwand der jährlichen Bauleistung zur Erhaltung bestehender Bauwerke des Nichtwohngebäudesektors im Jahr 2021 mit über 60 % über dem Aufwand des Neubaus [Gor22]. Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit durchgeführter Instandsetzungsmaßnahmen zeigten jedoch erhebliche Unzulänglichkeiten in der Qualität auf [BRE04]: Lediglich 50 % von Instandsetzungsmaßnahmen wurden erfolgreich ausgeführt, von denen nach 10 Jahren nur noch 30 % und nach 25 Jahren nur noch 10 % zufriedenstellend waren. Als Hauptursache für Schäden werden Risse und Enthaltungen aufgrund mangelnder Verbundfestigkeit und Bewehrungskorrosionen genannt. Für Wasserbauwerke, WU-Konstruktionen oder andere Stahlbetonbauwerke mit zwingend wasserdichter Bauteilschicht sind durch die Schäden die Dichtheit und somit die Gebrauchstauglichkeit gefährdet.

Die Konsequenzen sind oftmals Ersatzneubauten oder häufig wiederkehrende Instandsetzungsmaßnahmen. Konventionelle flächige Instandsetzungsmaßnahmen mit Oberflächenschutzsystemen auf Polymerbasis weisen entweder hohe Verschleißwiderstände mit geringen Dehnfähigkeiten und Rissneigungen oder hohe Dehnfähigkeiten mit geringem Verschleißwiderstand auf [Rau08]. Instandsetzungen mit Stahlbeton sind z. B. aus Gründen der erforderlichen Betonüberdeckung und damit einhergehenden deutlichen Querschnittsvergrößerungen wenig zielführend. Unter Berücksichtigung der immer wichtigeren effizienten Materialnutzung, der Ressourcenschonung und dem kreislauforientierten Bauen und Betreiben von Bauwerken sollte der Ersatzneubau immer die letzte Alternative bleiben. Auf diesem Gebiet bietet Textilbeton seit einigen Jahren Instandsetzungsmöglichkeiten mit Alleinstellungsmerkmalen. Da für die Dauerhaftigkeit der Textilien keine Betondeckung erforderlich ist, kann diese auf das für den Verbund entbehrliche Minimum reduziert werden. Entsprechend sind Bauteile mit Querschnitten ab zehn Millimetern möglich. Gleichzeitig weist der Verbundwerkstoff Zugfestigkeitskennwerte auf, die Stahlbeton übertreffen. Gegenüber polymerbasierten Instandsetzungsschichten weist Textilbeton eine robuste mineralische Oberfläche auf.

Umfangreiche Forschungsprojekte [SFB528, SFB532, C322a] und Pilotprojekte in der Praxis, wie der Mariendom Neviges [Rem18b] oder das Wehr Horkheim [Orl11, Büt12b], zeigen, dass die Lebensdauer von Beton- und Stahlbetonbauwerken mit Instandsetzungsschichten aus Textilbeton verlängert werden kann. Durch die Instandsetzung wird die Wiederherstellung der Gebrauchstauglichkeit erreicht, indem z. B. wasserführende Risse überbrückt werden. Untersuchungen zum Pilotprojekt am Werk Horkheim zeigen, dass auch unter temperaturbedingten Rissbewegungen eine dauerhafte Schutzschicht mit Verhinderung des Rissdurchschlags bzw. einer geplanten Rissverteilung gegeben ist [Mor14]. Die instandgesetzten Flächen des Bauwerks weisen nach mehrjähriger Beanspruchung der Textilbetonschicht weiterhin eine Gebrauchstauglichkeit auf. Weitere aktuelle Verstärkungs- und Instandsetzungsprojekte sind z. B. die Hyperschale in Magdeburg und verschiedene Brückenprojekte [Sch21].

Die heute schon anwendungsreifen Textilbetonsysteme bestehen aus unterschiedlichen Fasermaterialien und Textiltränkungen. Tränkungen sind erforderlich, um einen höheren Ausnutzungsgrad der Textilien zu erreichen. Bei Fasern aus alkaliresistentem Glas (AR-Glas) dient die Tränkungs-schicht auch der Erhöhung der Dauerhaftigkeit der Bewehrung. Als Textiltränkungs-materialien kommen vorwiegend Polymerdispersionen, Acrylate, Polystyrol und Reaktionsharze auf Epoxid-harzbasis, die die Tragfähigkeitseigenschaften von Textilbeton positiv beeinflussen, zum Einsatz. In Bezug auf die Temperaturbeständigkeit weisen diese Tränkungen bereits ab circa 80 °C Schwä-chen auf [SFB528]. Des Weiteren sind Instandsetzungsbereiche wie Trinkwasserbehälter aus Stahlbeton zu nennen, bei denen der Einsatz von Polymermaterialien indiskutabel ist. Unter Be-achtung von kreislauforientiertem Materialeinsatz kommt hinzu, dass bei den Kompositen aus Tex-tilien und Tränkungs-material erhöhte Recyclingaufwendungen zu berücksichtigen sind.

Nach über 30-jähriger Entwicklung findet die Anwendung von Textilbetonsystemen nun auch Ein-zug in erste Regelwerke, z. B. im Bereich der Instandsetzung von Wasserbauwerken [BAW19a] oder in der sich im Aufbau befindlichen Richtlinie für die Anwendung von nichtmetallischer Be-wehrung des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton e. V. (DAfStb) [Wil22]. Neben diesen wich-tigen Schritten für eine einfache und einheitliche Umsetzung von Textilbetonprojekten gilt es wei-ter zu überprüfen, welche alternativen Materialien in Textilbetonsystemen zur Anwendung kom-men können. Technische Textilien mit mineralischen Tränkungs-materialien sind bisher nur in we-nigen Forschungsarbeiten betrachtet worden, [z. B. Coh10, Pel15, Dvo16, Nad17, Sch17b, Zah20, Wil21] und bezogen sich auf silikatische Füllstoffe und Zementsuspensionen.



### 1.2 Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines flächigen Instandsetzungssystems für Stahlbetonbauwerke aus Textilbeton mit mineralisch getränkten technischen Textilien. Der Fokus liegt auf Untersuchungen zum Materialverhalten und der Bewertung verschiedener Materialkombinationen hinsichtlich ihrer Eignung. Das Instandsetzungssystem soll Anwendung in der Erhaltung bzw. Wiedererlangung der Gebrauchstauglichkeit von Bestandsbauwerken finden, eine konstruktive Verstärkung wird nur untergeordnet angestrebt. Beispielsweise sind gerissene Stahlbetonbauwerke mit wasserführenden Rissen und Rissbewegungen mehrerer Zehntelmillimeter infolge von Temperaturschwankungen als potentieller Einsatzbereich zu nennen.

Entsprechend der etablierten Untersuchungsmethoden werden die erforderlichen Materialkennwerte ermittelt. Weitere Versuchsaufbauten für z. B. nichtregulierte Kennwertermittlungen werden ergänzt. Bei der Entwicklung des Instandsetzungssystems sind folgende Teilziele zu nennen:

- Identifizierung von geeigneten Materialkombinationen aus Fasermaterialien und mineralischen Tränkungsmiteln unter Berücksichtigung einer ausreichenden Zugfestigkeit und Rissbildung in Dehnkörperproben
- Einfache Tränkungsapplikation
- Untersuchungen zur Wirkungsweise der Materialkombinationen im Verbundprobekörper
- Bewertung des Tragverhaltens nach Alterung und unter Temperaturbeanspruchung
- Untersuchungen zur Rissüberbrückungsfähigkeit
- Prüfung der Anwendbarkeit des Instandsetzungssystems durch eine richtlinienbasierte Systemprüfung

### 1.3 Vorgehensweise

Bild 1-1 zeigt schematisch die gewählte Vorgehensweise zur Erreichung der Ziele dieser Arbeit.

Die vorliegende Arbeit beginnt mit einem Überblick zum Stand der Wissenschaft des Verbundwerkstoffs Textilbeton und mit relevanten Erläuterungen zum Tragverhalten in Bezug auf die folgenden Untersuchungen (Kapitel 2). Es werden Einsatzgebiete für Textilbeton in der Instandsetzung von Bauwerken mit dem Schwerpunkt der Rissüberbrückung aufgezeigt. Entsprechend sind das Konzept einer *dauerhaft wasserundurchlässigen rissüberbrückenden Textilbetonschicht* (DURTEX) sowie das darauf aufbauende System für die *flächige Instandsetzung von Wasserbauwerken mit textildbewehrten Mörtel- und Betonschichten* (MITEX) Teil der Betrachtung. Abschließend werden die bisherigen Forschungsergebnisse zu mineralisch basierten Tränkungen und Beschichtungen textiler Bewehrung aufgeführt und diskutiert.

In Kapitel 3 wird der Entwurf eines mineralischen Instandsetzungssystems mit den Materialkomponenten und Herstellungsverfahren erläutert. Das geplante Versuchskonzept mit den unterschiedlichen Untersuchungsmethoden und Messtechniken zu den Prüfkörpern wird aufgezeigt. Im Rahmen der eigenen Untersuchungen erfolgt zunächst eine Betrachtung verschiedener technischer Textilien in Form von Endlosfasern mit einer mineralischen Tränkungsvariante in einaxialen Zugversuchen an Dehnkörperproben. Mit der textilen Vorauswahl erfolgt dann die Tränkungsvariation. Es wird die Zugfestigkeit im Verbundprobekörper sowie am Faserstrang untersucht. Des Weiteren wird eine Bewertung des Rissverhaltens an Dehnkörperproben vorgenommen. Die Ergebnisse zu den Untersuchungen sind in Kapitel 4 zusammengefasst.

Die Interpretation der Ergebnisse in Kapitel 5 erfolgt in einem ersten Schritt mithilfe der Betrachtung von Einflussparametern auf das Zugtragverhalten und die Rissbildungseigenschaften der Dehnkörperproben (Abschnitt 5.1). Der Einfluss des Tränkungsmaterials auf den Faservolumengehalt, den Rovingumfang und die Querschnittsfläche sind dabei maßgebliche Faktoren. Die entsprechenden geometrischen Unterschiede werden in Bezug zur Zugtragfähigkeit gesetzt, um die Varianten mit den größten Potentialen zu identifizieren. Im zweiten Schritt steht die Untersuchung des Materialverhaltens in Bezug auf den Verbund von Feinbetonmatrix und getränkten Rovings mittels analytischer Methoden (Abschnitt 5.2). Auf Basis rasterelektronenmikroskopischer Untersuchungen wird die Wirkungsweise der mineralischen Tränkungen untersucht. Thermogravimetrische Analysen am Tränkungsmaterial werden zur Einschätzung des Einflusses erhöhter Temperatureinwirkungen genutzt.

In Kapitel 6 werden anhand der zuvor generierten Erkenntnisse weitergehende Untersuchungen für das entwickelte Instandsetzungssystem aufgezeigt. Beschleunigte Alterung und Temperaturbeanspruchung von bis zu 160 °C sind maßgebliche Parameter der Untersuchungen an Dehnkörperproben. Des Weiteren werden eigens hergestellte Textilgelege betrachtet. Die Rissheilungsfähigkeit gerissener Dehnkörperproben und die Systemprüfung von Rissüberbrückungsprobekörpern in Anlehnung an das Merkblatt MITEX der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) nach dem Konzept DURTEX bilden abschließend eine praxisnahe Untersuchung des Instandsetzungssystems.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse, einer Schlussfolgerung zu den ermittelten Materialeigenschaften und einem Ausblick auf die nächsten Forschungsschritte für eine Etablierung des entworfenen Instandsetzungssystems.

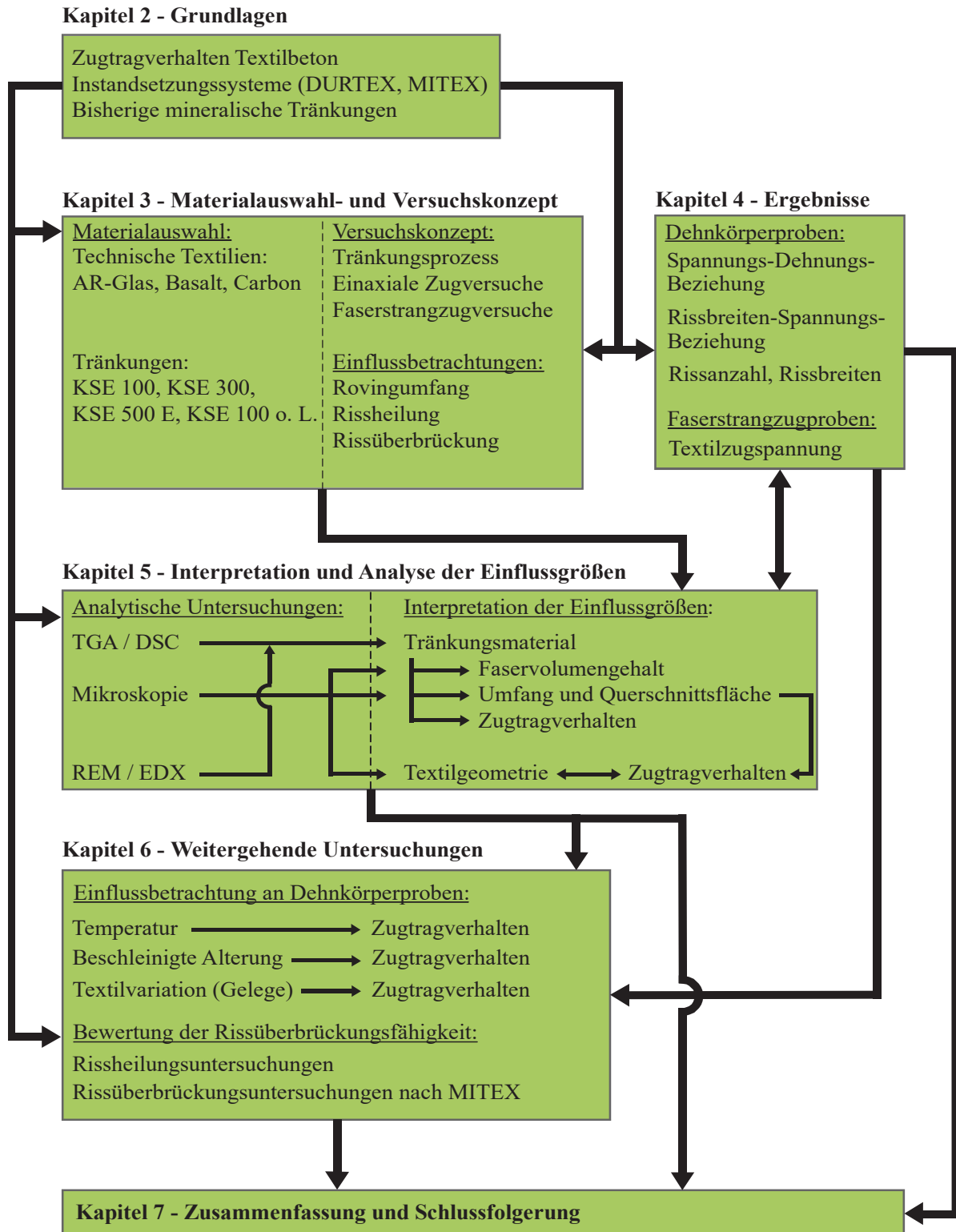


Bild 1-1: Übersicht zur Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit



## 2 Stand der Wissenschaft

### 2.1 Verbundwerkstoff Textilbeton

Der Verbundwerkstoff Textilbeton unterliegt dem gleichen Funktionsprinzip wie Stahlbeton. Beim Lastabtrag übernimmt Beton die einwirkenden Druckkräfte, auftretende Zugkräfte, z. B. durch Biegebeanspruchungen, werden über die Bewehrungsmaterialien abgeleitet. Anders als bei konventionellem Stahlbeton werden Betone mit geringerem Größtkorn verwendet, auch sind die Bewehrungsmaterialien im Textilbeton filigraner und zugleich komplexer als der bekannte Rippenstahl. Die Bewehrungsmaterialien, technische Textilien, erhalten für eine generelle Verarbeitbarkeit während der Produktion eine Schlichte und werden mit Tränkungsmaterialien versehen, um eine höhere Zugtragfähigkeit sowie eine verbesserte Verbundeigenschaft zum Beton zu erreichen. Des Weiteren kann die Textiltränkung zu einer Erhöhung der Dauerhaftigkeit der Textilien im alkalischen Milieu des Betons beitragen. Textilbeton wird auch als „*miniaturisierter Stahlbeton*“ bezeichnet [Jes10]. Maßgeblich zur Erforschung von Textilbeton in Deutschland trugen die von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereiche (SFB) 528 und 532 [SFB528, SFB532] bei. Der SFB 528 *Textile Bewehrung zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung* wurde an der TU Dresden bearbeitet. Die Bearbeitung des SFB 532 *Textilbewehrter Beton – Grundlagen für die Entwicklung einer neuartigen Technologie* erfolgte an der RWTH Aachen. Des Weiteren trugen der Industrieverband TUDALIT e. V. sowie das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Projekt C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite [C322a] zu der Entwicklung von Textilbeton bei.

#### 2.1.1 Beton/Mörtel/Feinbeton

Im Textilbeton werden in der Regel Betone mit einem Größtkorndurchmesser von ein bis vier Millimeter, maximal acht Millimeter [Sch17], verwendet [Jes10, Sch15a]. Insbesondere bei der Verwendung von textilen Gelegen ist die Maschenweite ausschlaggebend für die Wahl des maximalen Größtkorns. Aufgrund des geringen Größtkorns ist auch der Begriff Mörtel im Zusammenhang mit Textilbeton zu finden, da Mörtel Gesteinskörnungen bis maximal vier Millimeter aufweisen. Textilbetone erreichen durch die spezifische Materialzusammensetzung aus Zement, Gesteinskörnung, Wasser und weiteren Zuschlagsstoffen, wie Mikrosilika, Flugasche und Fließmitteln, wesentlich höhere Festigkeiten als Mörtel. Da Textilbeton auch als Konstruktionsbeton verwendet wird, unterscheidet er sich damit vom allgemeinen Verwendungszweck von Mörteln. Vor allem durch die Sonderforschungsbereiche 528 und 532 etablierte sich der Begriff Feinbeton beziehungsweise Feinkornbeton [z. B. Jes10, Heg11 Bra16]. In aktueller Literatur [z. B. Mor20, Her16] werden sowohl die Begriffe Mörtel als auch Beton verwendet, sodass mit Beton, Mörtel, Feinbeton und Feinkornbeton vier Begriffe für ein Produkt zu finden sind. Im internationalen Kontext wird in der Regel „Textile Reinforced Concrete“ (TRC), seltener „Textile Reinforced Mortar“ (TRM) und kaum „Fine-Grained Concrete“, verwendet.

Die Suche nach einer klaren Definition ist nach aktuellen Veröffentlichungen und bekannten Normenwerken schwierig. Der Begriff Mörtel entspringt maßgeblich der DIN EN 206 [DIN206], dem-

nach können besondere Betonarten, z. B. mit einem Größtkorn von  $D_{\max} < 4$  mm, als Mörtel bezeichnet werden. Der DIN EN 206 zufolge wird auch im Bereich der Instandsetzung von Bauwerken häufig der Begriff Mörtel verwendet [z. B. Orl11, Büt12, Rem18], aber auch Feinbeton ist zu finden [z. B. Weil 13, Erh15]. In der Regel werden Korngrößen kleiner vier Millimeter eingesetzt, womit der Begriff Mörtel gestützt wird. Die Materialeigenschaften entsprechen aber Hochleistungsbetonen, wodurch Feinbeton als Begriffsverwendung zielführender ist.

Im Bereich von Neubaukonstruktionen und Fertigteilen aus Textilbeton wird vermehrt der Begriff Beton verwendet [z. B. DAfStb RL NMB, Orl21]. Bei der Richtlinie für nichtmetallische Bewehrung des Deutschen Ausschusses für Stahlbetonbau e. V. liegt der Fokus auf Neubaukonstruktionen, entsprechend wurde der Gültigkeitsbereich auf Betone nach DIN EN 206 eingegrenzt. Neubaukonstruktionen aus Textilbeton können in der Regel auch mit Standardbetonen, wie nach DIN EN 206 definiert, realisiert werden. Durch ausreichend große Maschenweiten der textilen Bewehrungen von Neubaukonstruktionen sind Korngrößen von bis zu acht Millimeter möglich.

Betone mit Korngrößen über vier Millimeter enthalten feine und grobe Gesteinskörnungen (entsprechend DIN 12620) und sind dadurch nach DIN EN 206 als Beton zu bezeichnen [DIN206, DIN12620]. Textilbetone müssten den vorangestellten Erläuterungen folgend je nach Einsatzgebiet und verwendetem Größtkorn als Beton oder Mörtel bzw. Feinbeton bezeichnet werden.

Ein begrifflicher Vergleich mit Normalbeton ist auch nicht zielführend [Hei21], da die Bezeichnung Normalbeton nach DIN EN 206 eine Einteilung entsprechend der Rohdichte darstellt. In diesen definierten Rohdichtebereich von  $2.000 \text{ kg/m}^3$  bis  $2.600 \text{ kg/m}^3$  fallen sowohl Mörtel, Betone wie auch Textilbeton.

Zur korrekten Begriffsdefinition bedarf es der Anpassung von Normen und anderen Regelwerken, welche diese Sonderbetone noch nicht ausreichend betrachten. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird der Begriff Feinbeton verwendet, da im Wesentlichen Textilbeton für die Instandsetzung von Bauwerken betrachtet wird.

Die verschiedenen Einsatzgebiete für Textilbeton wie konstruktive Neubauteile, Fassaden- und Fahrbahnelemente oder konstruktive wie abdichtende Instandsetzungsschichten stellen unterschiedlichste Anforderungen an den Feinbeton. JESSE und CURBACH führen neben bekannten Betoneigenschaften wie ausreichende Druck- und Zugfestigkeiten zur Übertragung von Kräften, gute Verbundeigenschaften zum Altbeton (bei Verstärkungs- und Instandsetzungsmaßnahmen), möglichst niedrige Schwind- und Kriechverformungen und eine gute Dauerhaftigkeit beziehungsweise gute Frost- und Frosttaumittelbeständigkeit, auch spezifischere Eigenschaften von Feinbeton für den Einsatz im Textilbeton auf [Jes10]. Dazu zählt, dass die Feinbetonmatrix eine ausreichende Benetzung zur Bewehrung ermöglichen muss, sodass ein guter Verbund zwischen Feinbeton und der getränkten textilen Bewehrung entsteht. Des Weiteren bedarf es einer chemischen Kompatibilität von Feinbeton und textiler Bewehrung, insbesondere bei der Verwendung von Basalt oder AR-Glas ist eine geringe Alkalität erforderlich. Aufgrund der zum Teil geringen Maschenweiten der Textilgelege, ist auch die Wahl des Größtkorns anzupassen.

Feinbetone für Textilbeton wurden insbesondere in den genannten SFB 528 und 532 entwickelt [SFB528, SFB532]. Weiterentwicklungen der Betonzusammensetzungen finden kontinuierlich projektbezogen statt. Im Rahmen der C<sup>3</sup>-Verbundforschungsprojekte (Carbon Concrete Composite) sind weitere Rezepturen für normalfeste und hochfeste Feinbetone entworfen worden [C322a, Sch17]. Für die Anwendung spritzfähiger Feinbetone sind in [Jes10] Beispiele aufgeführt. Die üblichen Druckfestigkeiten liegen im Bereich von 65 bis 90 N/mm<sup>2</sup> [Sch15a], bei hochfesten Feinbetonen sind auch Werte über 130 N/mm<sup>2</sup> erreichbar [Pre19]. Der Elastizitätsmodul (E-Modul) liegt im Bereich von 25.000 bis 30.000 N/mm<sup>2</sup>. Aus den im SFB 528 entworfenen Feinbetonrezepturen ist der Textilfeinbeton Pagel TF10 entwickelt worden [Jes10]. TF10 ist eine Feinbetonmischung speziell für die Spritzbetonanwendung im Instandsetzungsbereich mit Textilbeton, die in der Verarbeitung lediglich durch Wasserzugabe angemischt wird.

### 2.1.2 Textile Bewehrung

Bewehrungsmaterialien für Textilbeton können aus zahlreichen Fasermaterialien und Halbzeugen hergestellt werden. Ausgangsmaterialien sind in der Regel AR-Glas, Carbon, Basalt, Stahl, Kunstfasern (z. B. Polypropylen) oder Naturfasern. Im Bauwesen am weitesten verbreitet sind Textilien aus AR-Glas und Carbon. AR-Glas, Carbon, Basalt oder auch andere Ausgangsmaterialien haben gemeinsam, dass die Ausgangsprodukte aus Endlosfasern bestehen, die als Spulenware weiterverarbeitet werden. Im Weiteren werden hauptsächlich die Eigenschaften von Carbonfasern näher betrachtet, AR-Glas und Basalt nahmen in den Untersuchungen zu dieser Arbeit eine untergeordnete Rolle ein.

Carbonfasern bestehen aus einzelnen Filamenten, auch als Elementarfaser bezeichnet, mit Durchmessern von 5 bis 7 µm. Diese Einzelfilamente werden unverdreht zu einem Faserstrang (Roving) zusammengeführt, welcher – je nach Anwendung – aus bis zu 60.000 (60k) einzelnen Filamenten besteht [SGL22]. Für den Textilbetoneinsatz haben sich 24K (Small Tow) und 48k beziehungsweise 50k (Heavy Tow) Textilien etabliert [Che11, SGL17, Tei22]. Damit die Einzelfilamente zu einem Faserstrang beziehungsweise Roving verarbeitet werden können, bedarf es einer Schlichte, welche es ermöglicht, dass der Faserstrang auf Spulen (Endlosfaserstrang) aufgewickelt und maschinell weiterverarbeitet werden kann. Weiterhin werden die Elastizität, die Festigkeit und die Scheuerbeständigkeit gesteigert [Che11]. In der Regel werden Epoxyschichten (EP) oder Polyurethanschichten (PU) verwendet. Der Materialeinsatz beträgt zwischen 1 und 2 % der Gesamtmasse der Endlosfasern [SGL17, Tei22]. Detaillierte Informationen zur Herstellung von AR-Glasfasern können [z. B. Orl05, Kul13] entnommen werden, für Carbonfasern gilt [z. B. Kul13, Mor20, Fit98].

Gitterförmige Textilstrukturen, vergleichbar mit Bewehrungsmatten aus Stahl, werden durch die rasterförmige Anordnung der Rovings erstellt. Dabei werden der Kettfaden (Textilstrang in 0°-Richtung) und der Schussfaden (Textilstrang in 90°-Richtung) mit einem sogenannten Wirkfaden fixiert. Anders als beim Weben von Textilien erfahren Rovings beim Wirkverfahren nur geringe Krümmungen, es entsteht ein Gelege. Neben ein- und zweidimensionalen Gelegen sind auch Mul-

tiataxiale Gelege und dreidimensionale Strukturen möglich. Damit die textilen Bewehrungsstrukturen formstabil bleiben, bedarf es einer Beschichtung bzw. Tränkung der Textilien. Eine Tränkung von textilen Bewehrungen wird auch für weitere Eigenschaften wie Verbundwirkungen benötigt und in Abschnitt 2.1.3 näher betrachtet.

Zur Bemessung der textilen Bewehrung wird die Querschnittsfläche der Fasern betrachtet, das Tränkungsmaterial bleibt dabei unberücksichtigt. Die Querschnittsfläche lässt sich aus der Textilfeinheit  $f$  mit der Maßeinheit *tex* und der dazugehörigen Dichte  $\rho$  des Materials ermitteln [Jes10]. Die Filamentgarnfeinheit  $f$  gibt die lineare Dichte in Gramm pro laufenden Kilometer an ( $1 \text{ tex} = 1 \text{ g} / 1000 \text{ m}$ ) [Jes10]. Das Dividieren der Feinheit  $f$  durch die Materialdichte  $\rho$  ergibt die Querschnittsfläche  $A_{tex}$  nach Gleichung (2-1):

$$A_{tex} = \frac{f}{\rho} \quad (2-1)$$

Mit:

$A_{tex}$	Querschnittsfläche in $\text{mm}^2$
$f$	Filamentgarnfeinheit, in <i>tex</i>
$\rho$	Rohdichte des Filamentgarns / der Endlosfaser, in $\text{g}/\text{dm}^3$

Die einheitliche Betrachtung über die textile Querschnittsfläche ermöglicht es, Eigenschaften, wie die Zugfestigkeit unterschiedlicher textiler Bewehrungsmaterialien, miteinander zu vergleichen, siehe Tabelle 2-1.

Tabelle 2-1 Eigenschaften unterschiedlicher Textilfasern

Eigenschaften	AR-Glas	Basalt	Carbon	Einheit
Filamentanzahl	1600	-	50000	-
Feinheit	2400	1200	3450	<i>tex</i>
Dichte	2,74	2,8	1,80	$\text{g}/\text{cm}^3$
Filamentdurchmesser	27	10 - 19	6,9	$\mu\text{m}$
Zugfestigkeit	2500	3200	4400	MPa
E-Modul	74	90	255	GPa
Bruchdehnung	25	-	1,65	%
Schlichte	Silan	-	Epoxid	-
Schlichtegehalt	-	-	1,0	%
Quelle	[Jes10, Or105]	[Jes10, Me122]	[SGL17]	-

Bei der Angabe der Zugfestigkeit textiler Bewehrungen ist zu beachten, unter welchen Voraussetzungen die Kennwerte ermittelt wurden. REMPEL [Rem18a] zeigt zwei grundsätzliche Ebenen auf, nach denen Textilkennwerte ermittelt werden können. Danach werden auf der Mikroebene Kennwerte wie Feinheit, Bruchdehnung, Bruchspannung und E-Modul nur am Filament ermittelt.



Dem gegenüber steht die Ermittlung auf der Mesoebene, bei der die Kennwerte zur Bruchdehnung, Bruchspannung und E-Modul am Faserstrang ermittelt werden. Die Ermittlung der Kennwerte auf Mesoebene ist für die Anwendung im Textilbeton maßgebend, da Einflüsse der Herstellung, der textile Querschnitt sowie das verwendete Tränkungsmaterial berücksichtigt werden [Rem18a]. Unabhängig von Makro- oder Mesoebene ist zu beachten, dass die Wahl der Prüfmethode, der Verarbeitungszustand der Rovings/Textilien, die Probenlänge und die Prüfgeschwindigkeit einen Einfluss auf das Ergebnis haben [Rem18a].

Die in Tabelle 2-1 angegebenen Kennwerte sind auf Mikroebene ermittelte Filamentgarn-Zugfestigkeiten von im Bauwesen verbreiteten Textilfasern. Die genauen Prüfverfahren zur Ermittlung der Zugfestigkeiten sind den technischen Datenblättern der Filamentgarnhersteller häufig nicht zu entnehmen. Sie können nach verschiedenen Normen ermittelt werden. Das Zugverhalten Harz imprägnierter Garne aus Kohlefasern kann nach DIN 10618 bestimmt werden, Textilglas-Rovings können nach DIN EN ISO 9163 untersucht werden [DIN9163, DIN10618]. Allgemein können nach DIN 65382 „Verstärkungsfasern für Kunststoffe – Zugversuch an imprägnierten Garnprüfkörpern“ Aramidfilamentgarne, Kohlenstofffilamentgarne und Textilglasfilamentgarne geprüft werden [DIN65382]. Die drei Verfahren haben gemeinsam, dass die zu prüfenden Fasern/Garne eine Harztränkung erhalten. Dies führt zu gleichmäßigeren Ergebnissen, aber auch zu wesentlich höheren Zugfestigkeitskennwerten als bei ungetränkten Fasern/Garnen oder bei der Verwendung anderer Tränkungsmitel. Des Weiteren wird die ISO 3341 (2000) für die Bestimmung der Reißkraft und Bruchdehnung im Zusammenhang mit der Ermittlung von Festigkeit und Steifigkeit von Textilien genannt [Pre18, ISO3341]. Auf die Ermittlung von Zugfestigkeitskennwerten von Rovings, textilen Halbzeugen und textilen Gelegen wird in Abschnitt 2.2.1 weiter eingegangen.

### 2.1.3 Tränkungsmaterialien/Textiltränkung

Bei der Weiterverarbeitung von technischen Textilien zur Eigenschafts- und Strukturverfestigung ist zwischen Beschichtungen und Imprägnierungen bzw. Tränkungen zu unterscheiden [Jes11]. Bei Beschichtungen werden nur die äußeren Filamente eines Rovings benetzt, wohingegen bei der Imprägnierung beziehungsweise Tränkung eine Durchtränkung aller Filamente das Ziel ist. Da Beschichtungen im Rahmen dieser Arbeit keine Anwendung finden, werden im Weiteren die Begriffe Tränkung und Tränkungsmaterialien verwendet.

Textiltränkungen dienen vorrangig der Verbesserung der inneren Verbundeigenschaften zwischen den Filamenten im Textilstrang, der Querschnitts- und Strukturfestigung von Gelegen [Sch06, Rau11] sowie der Verbesserung der äußeren Verbundeigenschaften zur Feinbetonmatrix [Sch06, Rau06, Heg04, Kul13]. Mit Tränkungen ist ein höherer Ausnutzungsgrad der Textilien im Feinbeton erreichbar, welcher bei ungetränkten Textilien zum Teil nur bei 30 % liegt [Krü01]. Des Weiteren können Eigenschaften wie Dauerhaftigkeit und Brand- bzw. Temperaturbeständigkeit verändert werden. Die Tränkung von Verstärkungsfasern zur Ermittlung von Zugfestigkeitskennwerten reicht einige Jahrzehnte zurück. DIN 65382 1988-12 „Verstärkungsfasern für Kunststoffe – Zugversuch an imprägnierten Garnprüfkörpern“ enthält bereits festgelegte Prüfverfahren für Filamentgarne. Zu Beginn der Textilbetonforschung sind Filamentgarnzugfestigkeiten zwar auch mittels

Tränkung ermittelt worden, dennoch ist zunächst viel mit ungetränkten Rovings und Textilien im Feinbeton gearbeitet worden [Jes04, Ban04, Mol05]. Ungetränkte Rovings weisen aufgrund der vielen feinen Filamentfasern eine hohe Anzahl von nano- und mikrometergroßen Hohlräumen auf, bei Gelegen kommen zusätzlich Wirkfäden und Knotenpunkte hinzu [Kul13]. Dadurch ist eine Durchdringung mit Feinbetonen kaum gegeben, auch wenn diese ein geringes Größtkorn und eine gute Fließfähigkeit besitzen. Es steht nur ein geringer Teil der äußeren Filamente in direktem Kontakt mit dem Feinbeton und innenliegende Filamente werden nicht oder nur in Teilen unter Zugbeanspruchung belastet.

KULAS hat zur Verbundverbesserung von Textilien und Feinbeton verschiedene Methoden untersucht, aus denen die Textiltränkung als die effektivste Maßnahme abgeleitet wurde. Weitere Anforderungen an Tränkungsmaterialien haben SCHLESER et al. aufgeführt, zu denen eine niedrige Viskosität im nicht-ausgehärteten Zustand, hohe Steifigkeiten im ausgehärteten Zustand zur Profilherstellung, Temperaturbeständigkeit im Gebrauchszustand bis circa 80 °C, hohe Brandbeständigkeit und ein niedriger Diffusionskoeffizient zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit von AR-Glastextilien zählen [Sch08, Büt12a, Kul13]. Den Ausführungen ist zu ergänzen, dass mittlerweile höhere Anforderungen an die Temperaturbeständigkeit gestellt werden, weniger steife Textilien im ausgehärteten Zustand für die Instandsetzung gefordert werden sowie eine Betrachtung der Recyclebarkeit des Verbundwerkstoffes zu berücksichtigen ist [Mor20]. In Bezug auf AR-Glas- und Balsalttextilien ist eine Tränkung als Schutzschicht gegen die bestehende Alkalianfälligkeit erforderlich [Orl04].

Zum Erreichen der genannten Anforderungen sind verschiedene Tränkungsmaterialien untersucht worden [Sch08]. Am Markt vorrangig vertreten sind Polymertränkungen aus Epoxidharzen (EP), Polyacrylat (PA) und Styrol-Butadien (SBR) [Hit22, Sol22]. Epoxidharztränkungen führen in der Regel zu steiferen Textilien, wohingegen bei PA- und SBR-Tränkungen auch flexiblere Strukturen möglich sind. Die Tränkung der Textilien findet in der Regel im direkten Anschluss an die maschinelle Verarbeitung von Rovings zu Gelegen statt. Es kommen das Kiss-Coater-Verfahren oder ein Mehrfach-Walzen-Foulard-Verfahren zur Anwendung [Kul13]. Entsprechend der Steifigkeiten der getränkten Textilien werden diese als Matten- oder Rollenware verarbeitet und gelagert [Kul13]. Einen Grundstein für die Tränkung technischer Textilien für den Einsatz im Textilbeton legte SCHLESER im Rahmen des SFB 532 [Sch08]. Neben der Tränkung textiler Gelege wurde eine Tränkungsanlage für einzelne Rovings entwickelt. Bei beiden Verfahren werden mit Umlenkrollen, Andruck- und Abstreifrollen beziehungsweise Quetschrollen die Rovings und Textilien durch ein Tränkungsbad geführt. Über die Einstellung der Andruck- und Quetschrollen lässt sich eine nahezu vollständige Durchtränkung erreichen. Auf das Tränkungsverfahren von Rovings wird in Abschnitt 3.2.1 weiter eingegangen.

Neben der „einfachen“ Polymertränkung von Textilien wurden im Rahmen des SFB 532 auch Methoden zur Oberflächenmodifizierung entwickelt [Rei08]. Das Einstreuen von Quarzsand in Epoxidharz getränkte Textilien führt zur Erhöhung der Auszugskräfte [Xu07, Don16] und zur Verringerung der Gefahr der Längsrisssbildung am Textilstrang [Krüg04, Heg05]. Weiterhin wird das Risiko des Betonabplatzens verringert und durch die Sandpartikel können geringe Rissabstände

und Rissbreiten bei Zugfestigkeitsuntersuchungen an Verbundproben erreicht werden [Mor20]. Besandete, polymergetränkte Textilien befinden sich im Portfolio verschiedener Hersteller von technischen Textilien für die Verwendung im Bauwesen [Sol22]. Wissenschaftliche Untersuchungen dazu finden sich z. B. in [Sch08, Büt12a, Kul13, Lor15a, Mor20].

Alternative Tränkungsmaterialien zu Polymertränkungen, wie z. B. mineralische Tränkungen, finden in der industriellen Verarbeitung bisher keine Anwendung, werden aber seit einigen Jahren in verschiedenen Forschungsarbeiten betrachtet [Coh10, Pel15, Dvo16, Nad17, Sch17b, Sch18b, Len20, Wil21]. Die unterschiedlichen Ansätze für mineralische Tränkungen an technischen Textilien werden in Abschnitt 2.4 vertieft.

#### **2.1.4 Herstellung des Verbundwerkstoffes**

Textilbeton, als Produkt aus den aufgeführten Teilkomponenten Feinbeton, textiler Bewehrung oder Textilien und Textiltränkungen, kann nicht zuletzt aufgrund der vielseitigen Einsatzmöglichkeiten durch unterschiedliche Verfahren hergestellt werden. Zum Teil sind aufgrund der verwendeten Materialien Einschränkungen auf bestimmte Verfahren gegeben. In [Bra16] sind die verschiedenen Herstellverfahren ausführlich beschrieben, von denen die drei maßgebenden im Folgenden aufgeführt sind.

Beim Gießverfahren werden zweidimensionale textile Bewehrungsstrukturen in der Regel mehrlagig mit Abstandhaltern in eine Schalung eingebracht und mit Feinbeton gefüllt und verdichtet (vergleichbar zur Stahlbetonherstellung). Die Kombination aus der Steifigkeit der Textilien und der entsprechenden Menge Abstandhalter sorgen für eine Lagesicherung der Bewehrung. Alternativ können auch dreidimensionale Bewehrungsstrukturen verwendet werden, wodurch der Formgebung beim Gießverfahren kaum Grenzen gesetzt sind. Sehr weiche Textilgelege eignen sich nicht für dieses Verfahren oder müssen durch Klemm- und/oder Spannvorrichtungen lagegesichert werden. In Bezug auf den Feinbeton ist darauf zu achten, dass neben dem passenden Größtkorn – entsprechend der Maschenweite – auch eine ausreichende Fließfähigkeit gegeben ist. Vorrangig wird das Gießverfahren für Neubaukonstruktionen und Fertigteile eingesetzt. Bei der Konzeptionierung ist drauf zu achten, dass geeignete Maßnahmen zum Verdichten des Feinbetons getroffen werden, da diese durch die engmaschige Bewehrung eingeschränkt sein können.

Das Spritzverfahren, auch aus dem konventionellen Stahlbetonbau bekannt, findet insbesondere im Tunnelbau oder bei Böschungssicherungen Anwendung, es ist aber auch in der Instandsetzung zu finden. In Bezug auf die Textilbetonherstellung erfolgt das Einbringen des Feinbetons über das Nass- oder Trockenspritzverfahren, jedoch werden die zweidimensionalen textilen Bewehrungen erst während der Betonage lagenweise eingebaut. So folgt nach initialer Spritzbetonschicht abwechselnd eine Lage Bewehrung und erneut Spritzbeton. Das Verdichten des Feinbetons ist durch die Aufprallenergie gegeben, wodurch erhöhte Anforderungen an die Steifigkeit und Widerstandsfähigkeit der Textilien bestehen. Das Verfahren eignet sich besonders für die Instandsetzung und nachträgliche Verstärkung von Bauwerken, da neben der vertikalen Applikation an Wandflächen auch Überkopfarbeiten möglich sind. Entsprechend sind geeignete Feinbetone auszuwählen, die

für den Spritzvorgang ausreichend fließfähig sind aber auch zähflüssig genug, um auf der Oberfläche zu haften [Bra16]. Bei Feinbetonen für die Spritzbetonapplikation werden in der Regel geringe Gesteinskörnungen bis maximal zwei Millimeter verwendet.

Beim Laminierverfahren erfolgt das Einbringen von textiler Bewehrung und Feinbeton lagenweise. Der Feinbeton wird jedoch nicht gespritzt, weshalb eine Verdichtungsenergie durch geeignete Rüttelgeräte erforderlich ist. Der Einbau, meist in flächigen Schalungen, erfolgt für die textilen Bewehrungen schonender als beim Spritzverfahren. Beim Laminierverfahren werden keine Abstandshalter eingesetzt und das lagenweise Einbauen ermöglicht eine Vielzahl von Textillagen.

In Bezug auf die Herstellung von Dehnkörperproben für die Prüfung im einaxialen Zugversuch (siehe Abschnitt 2.2.2) sind nach SCHÜTZE et al. die Probekörper mit dem Verfahren herzustellen, welches auch bei der späteren Praxisanwendung verwendet wird [Sch18a]. Bei der Erforschung von neuen Erkenntnissen, bei der eine Vielzahl von Probekörpern im Labormaßstab untersucht werden, kann ein zunächst abweichendes Herstellverfahren aus Zeit- und Kostengründen hilfreich sein. Laminier- und Gießverfahren sind für die Produktion einer Vielzahl von Probekörpern vorteilhaft. Beim Gießverfahren in stehenden Schalungen ergeben sich zwei schalglatte Oberflächen, wodurch negative Einflüsse im Klemmbereich verringert werden können. Beim Laminier- und Spritzverfahren bleibt eine schalraue Oberfläche, die entweder nachbehandelt werden muss oder mit Ausgleichsschichten im Klemmbereich zu versehen ist.

## 2.2 Tragverhalten von Textilbeton

Beim Tragverhalten von Textilbeton liegt das Hauptaugenmerk auf den Kennwerten zum Zugtragverhalten, da durch die Integration der textilen Bewehrung Zuglasten aufgenommen werden können. BIELAK benennt für die Zugfestigkeit von Textilien einen dreigeteilten Detailierungsgrad [Bie17]. Dazu zählen die Untersuchung am Einzelfilament und Faserstrang, wobei die Betrachtungen am Einzelfilament hauptsächlich in der Qualitätsprüfung bei der Garnherstellung verwendet wird. Die Untersuchung am Faserstrang dient zur Charakterisierung der verschiedenen Rohmaterialien (Spulenware) und einzelner Rovings oder entnommenen Fasersträngen aus Gelegen. Mittels Faserstrangzugversuchen lassen sich die Bruchspannungen von Rovings und Einzelsträngen textiler Gelege ermitteln. Des Weiteren kann der E-Modul über die Dehnung berechnet werden. Die entsprechenden Normen zu den verschiedenen Prüfmethoden sind in Abschnitt 2.1.2 aufgeführt. Ein standardisierter Versuchsaufbau wird in Abschnitt 2.2.1 Faserstrangzugversuche näher erläutert.

Als weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Zugfestigkeit wird die Untersuchung an einem Ausschnitt eines Geleges benannt [Bie17]. Der Prüfaufbau ist im Vergleich zum Faserstrangzugversuch aufwendiger, da sichergestellt sein muss, dass alle enthaltenen Faserstränge gleichmäßig belastet werden. Dies kann zu höheren Messunsicherheiten führen. Bei den Untersuchungen zu dieser Arbeit werden hauptsächlich getränkte Rovings verwendet, daher wird auf Zugversuche an Gelegen nicht weiter eingegangen. Die dritte Möglichkeit besteht in der Bestimmung der Tragfähigkeit an Dehnkörperproben, aus denen die Textilzugfestigkeit rechnerisch ermittelt werden kann (siehe Abschnitt 2.2.2). Bei Dehnkörperversuchen ist zu beachten, dass die Ergebnisse von der Qualität

des Verbundverhaltens von Feinbeton und textiler Bewehrung abhängig sind, da die Lasteinleitung über den Feinbeton indirekt in die Textilstruktur erfolgt [Rem18a]. Ein ausreichender Bewehrungsgrad ist erforderlich, um ein Versagen bei Erstrisslast zu verhindern [Hei21]. Des Weiteren ist eine ausreichende Verankerungslänge im oder über den Klemmbereich hinaus zu wählen, damit ein Verbundversagen durch Faserstrangauszug vermieden wird [Hei21]. Bild 2-1 zeigt mögliche Probekörperhalterungen nach [Bie17].

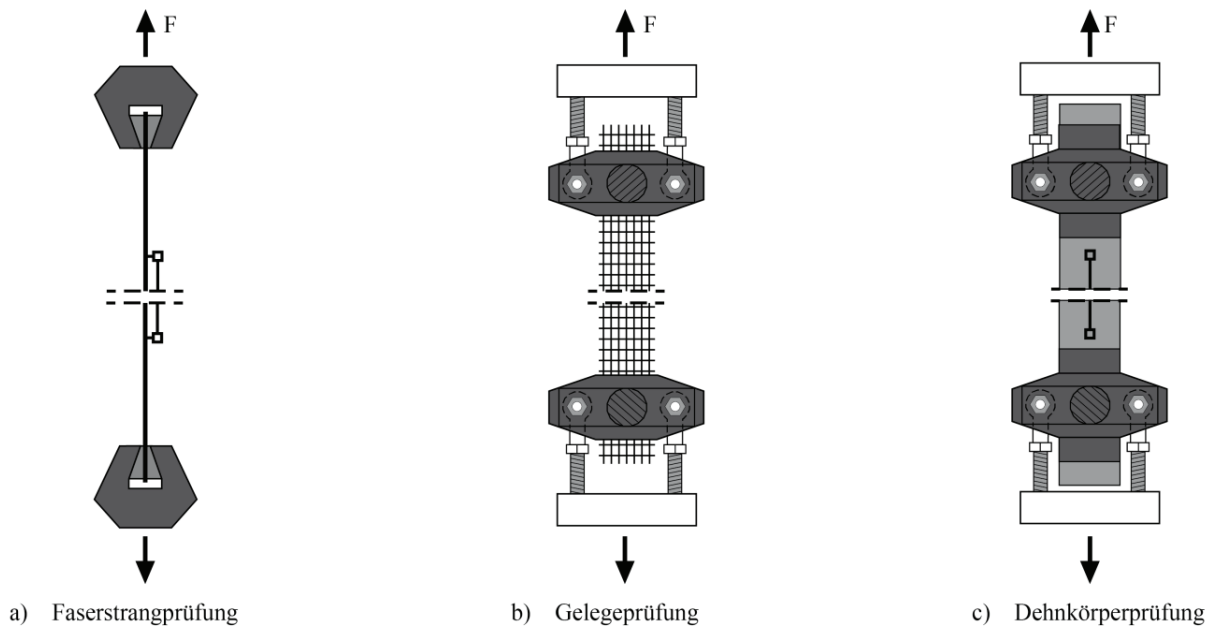


Bild 2-1: Zugprüfapparatur für textile Bewehrungen nach [Bie17]: a) Faserstrang, b) Gelegeausschnitt, c) Dehnkörper

Das Zugtragverhalten des Verbundwerkstoffs Textilbeton kann anhand der Dehnkörperuntersuchung über die Spannungs-Dehnungslinie beschrieben werden. Erste Vorläufer zur theoretischen Beschreibung der Spannungs-Dehnungslinie fanden bereits in den 1960er- und 1990er-Jahren statt. Die essenziellen Ergebnisse dieser Untersuchungen benennt KULAS mit der Beschreibung der theoretischen Spannungs-Dehnungslinie durch die lineare Verbindung von drei Punkten [Kul13]. Die wesentliche Unterscheidung der beiden dokumentierten Theorien ist die unterschiedliche Spannungsentwicklung nach der Erstrissbildung. Die theoretische Beschreibung der Spannungs-Dehnungslinie nach AVESTON, COOPER und KELLY (ACK-Theorie) geht von einem Dehnplateau während der Rissbildungsphase aus [Ave71]. OHNO und HANNANT weisen auf Basis der ACK-Theorie eine Spannungssteigerung für den Bereich der Rissbildungsphase auf (OH-Theorie) [Ohn94]. JESSE [Jes04], MOLTER [Mol05] und VOSS [Vos08] untersuchten auf Basis der OH-Theorie die Spannungs-Dehnungslinie an Verbundproben mit ungetränkten Textilien und teilten diese in die Zustände I (ungerissener Beton), IIa (Rissbildungsphase) und IIb (abgeschlossene Rissbildung) ein [Kul13]. Weitere Untersuchungen bestätigten diese Einteilung, beispielsweise wies KULAS diese Zustände an polymergetränkten Textilien nach oder MORALES an Textilien mit Polymertränkungen (EP) und anschließender Oberflächenmodifikation (Sand) [Kul13, Mor20]. Auch für mineralisch getränkte textile Bewehrungen sind die Zustände übertragbar, wobei Nach-

behandlung, Lagerung und Prüfbedingung der Dehnkörperproben einen Einfluss auf die Entwicklung von Zustand IIa und den Übergang zu Zustand IIb vermuten lassen (siehe Abschnitte 6.1.1 und 6.1.2) [Len20].

Die detaillierte Beschreibung der Zustände I, IIa und IIb erfolgte von JESSE anhand von glasfaserbewehrtem Textilbeton [Jes04]. Die Betrachtung der Zustände lässt sich auf Probekörper mit anderen Textilien und Textiltränkungen übertragen. Eine Zusammenfassung findet sich in [Mor20]. Die wesentlichen Informationen zu den Zustandsbereichen der Spannungs-Dehnungslinie von textilbewehrten Dehnkörperproben sind für diese Arbeit nachfolgend aufgeführt. Bild 2.2 zeigt eine schematische Darstellung der Zustände I, IIa und IIb.

### ***Zustand I***

Im Zustand I ist die Dehnkörperprobe ungerissen und die Spannung steigt linear bei geringer Dehnung entsprechend dem E-Modul des Feinbetons bis zum Erstriss. Schwankungen der Erstrissspannung sind auf die Streuung der Betonzugfestigkeit zurückzuführen, wobei auch die Textilgeometrie einen Einfluss haben kann, in der Regel aber einen untergeordneten Einfluss zeigt [Mor20]. Nachbehandlung, Lagerung und Alter der Probekörper beeinflussen die Betonzugfestigkeit und damit auch die maximale Spannung im Zustand I. Die Dehnung in diesem Stadium beträgt im Allgemeinen aber weniger als 1 % der Gesamtverformung, wodurch Abweichungen des linearen Verhaltens vernachlässigt werden können.

### ***Zustand IIa***

Mit Erreichen des Erstrisses beginnt die Rissbildungsphase, Zustand IIa, in der bei ausreichendem Bewehrungsgrad fortlaufend Risse entstehen. Der Verlauf der Spannungs-Dehnungslinie flacht im Vergleich zum ungerissenen Zustand ab, ein Wechselspiel aus Verformung und Spannungsanstieg mit Rissentstehung tritt ein. Diese Rissbildung wird maßgeblich vom Verbund zwischen Feinbeton und textiler Bewehrung sowie dem Bewehrungsgrad beeinflusst. Ein geringerer Bewehrungsgrad oder schwächerer Verbund führt zu weniger Rissen und zu größeren Lastabfällen [Mor20]. Die Neigungen der Spannungs-Dehnungslinien von Textilbeton im Zustand IIa reichen von nahezu plateauartigen bis hin zu deutlich ansteigenden Kurvenverläufen. Beobachtungen zeigen Rissentstehungen auch nach der eigentlichen Rissbildungsphase [Jes04, Heg04, Bru07]. Das Plateau ist in diesen Fällen weniger flach ausgeprägt. Ein Übergangspunkt zu Zustand IIb ist nicht eindeutig identifizierbar und es entsteht eine diffuse Rissbildung [Jes04]. Dies wird auch durch einen hohen Bewehrungsgrad unterstützt [Lie12]. Im Rahmen der Versuche zu dieser Arbeit konnten an Dehnkörperproben mit mineralisch getränkter Bewehrung auch diffuse Rissbildungsprozesse beobachtet werden (siehe Abschnitte 4.1.2 und 6.1.3).

### ***Zustand IIb***

Mit der abgeschlossenen Rissbildungsphase steigt die Spannung wieder stärker an und folgt weitestgehend einem linearen Verlauf (Ausnahmen durch diffuse Rissbildung). Nach JESSE müsste der Verlauf dem E-Modul der textilen Bewehrung entsprechen, wobei KULAS steiferes Verhalten (horizontale Verschiebung der Kurve nach links) beobachten konnte [Jes04, Kul13]. Dies wird auf

die Mitwirkung des Feinbetons zurückgeführt (tension stiffening). Der Zustand IIb endet mit dem Erreichen der Bruchspannung, die bei Aktivierung aller Filamente der Bruchspannung der Filamentfasern entsprechen sollte [Kul13]. Der Zustand III, der bei Stahlbewehrungen für den plastischen Bereich steht, ist aufgrund des spröden Bruchversagens von textiler Bewehrung nicht vorhanden. Bild 2-2 zeigt den idealisierten Spannungs-Dehnungsverlauf mit Zustandsbereichen, einen qualitativen Spannungs-Dehnungsverlauf von Dehnkörperproben mit getränkter textiler Bewehrung und möglichen Steifigkeitsdefiziten im Dehnkörper in Zustand IIb nach [Kul13].

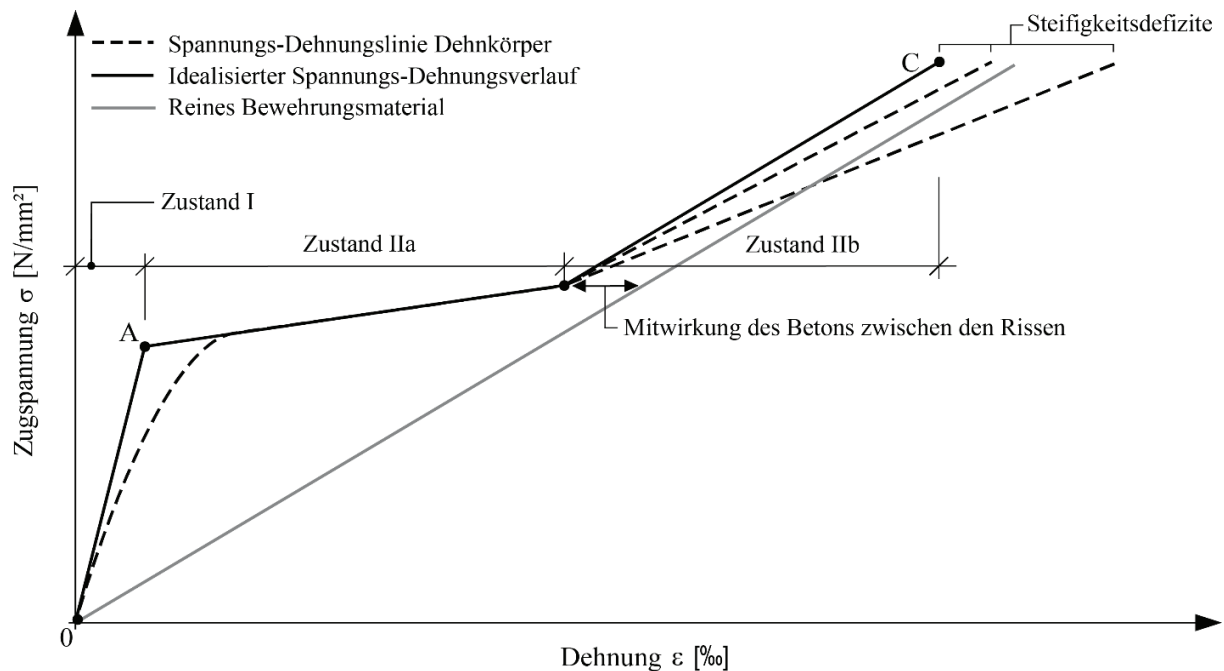


Bild 2-2: Qualitativer Verlauf von Spannungs-Dehnungslinien (Dehnkörper) mit Steifigkeitsdefiziten, idealisierter Verlauf der Spannungs-Dehnungsbeziehung nach [Kul13]

Insgesamt ist die Ermittlung der Materialeigenschaften von Textilbeton und dessen Komponenten normativ kaum erfasst. Aufgrund der vielen unterschiedlichen textilen Bewehrungen stellt sich auch eine einheitliche Ermittlung des Materialverhaltens als komplexer dar, als es im Stahlbetonbau der Fall ist. Eine Vielzahl der Forschungsvorhaben der vergangenen Jahrzehnte befasste sich mit der Entwicklung von standardisierten Versuchsaufbauten [z. B. Hin17, Rem18, Mor19], aus denen sich einige etabliert und Einzug in erste Richtlinien und Merkblätter erhalten haben [BAW19, DAfStb RL NMB]. Die für die Instandsetzung von Bauwerken mit Textilbeton als abdichtende Ebene erforderlichen, und im Rahmen dieser Arbeit verwendeten, Prüfverfahren werden im Folgenden näher betrachtet.

### 2.2.1 Tragverhalten – Faserstrangzugversuche am Roving

In Abschnitt 2.1.2 „Textile Bewehrung“, wurden die wichtigsten Normen benannt, nach denen die Filamentzugfestigkeit bzw. Garnzugfestigkeit von Rovings bzw. Endlosfasern seitens der Produzenten ermittelt werden. Durch die Weiterverarbeitung mit Textiltränkungen werden die Zugfestigkeitseigenschaften von Rovings und Gelegen verändert. Es bedarf einer erneuten Ermittlung der

Zugfestigkeit, für die aufgrund der textilen Tränkung unterschiedliche Methoden zur Prüfung entwickelt wurden [Hin17, Rem17, ISO3341]. Dazu zählt die Prüfung mit einer Krafteinleitung über Umlenkrollen für ungetränkte, teilweise getränkte und weich getränkte textile Bewehrungen, bei der die Zugkraft gleichmäßig in den Faserstrang eingeleitet wird [Rem17, ISO 3341]. Die Kraftübertragung durch Filamentreibung kann realitätsnah abgebildet werden. Eine direkte Klemmung solcher Faserstränge würde zu einer Erhöhung der Bruchspannung führen, da der Anpressdruck die Reibkräfte verstärkt [Rem17]. Ein Einklemmen zwischen konventionellen Klemmbacken (z. B. geriffelte Stahlbacken) kann nicht nur zur Erhöhung der Reibkräfte einzelner Filamente führen, sondern auch Filamente brechen. Insbesondere im Übergangsbereich von Textil und Klemmung können die Querdruckkräfte zur negativen Beeinflussung der Zugfestigkeit beitragen [Hin17].

Alternativ hat sich das Einkleben von Fasersträngen beispielsweise in Hülsen bewährt. Die textilschonende Befestigung kann bei ausreichend langer Lasteinleitung zu hohen Zugfestigkeiten führen, die reproduzierbar ermittelt werden können [Hin17]. Bei ungetränkten oder teilweise getränkten Textilien ist zu beachten, dass die Tränkung des Lasteinleitungsbereichs die realen Bedingungen in der Feinbetonmatrix nicht unbedingt exakt widerspiegelt. Das Einkleben ist auch für querdruckempfindliche textile Bewehrungen geeignet. Der gesamte Prüfaufwand eingeklebter Proben ist aufgrund des Klebprozesses hoch.

Um den Prüfaufwand für textile Bewehrungen, bei denen die Kraftweiterleitung über das Tränkungsmaterial erfolgt und eine Querdruckempfindlichkeit bestehen kann, zu verringern, hat HINZEN in Bezug auf ISO 3341 (2000) einen standardisierten Prüfaufbau entwickelt [Hin17]. Die Klemmung in der Prüfapparatur erfolgt über keilförmige Klemmbacken, die in Richtung der Faserstrangmitte aus dem direkten Klemmbereich herausragen. Die Überlänge der Klemmbacken ergibt eine indirekte Klemmwirkung, kombiniert mit den keilförmigen Klemmbacken führt dies zu einer reduzierten Steifigkeit in Richtung der Faserstrangmitte [Hin17]. Unterstützt durch ein angepasstes Klemmbackenmaterial aus duroplastischem Polymer mit Korundfüllung ist eine schonende Lasteinleitung möglich [Hin17].

Die Faserstrangzugversuche, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, erfolgten an einer ähnlichen Prüfapparatur (siehe Bild 3-15 in Abschnitt 3.3.3). Die Prüfbedingungen nach REMPEL [Rem17] wurden berücksichtigt und werden in Abschnitt 3.3.3 weiter behandelt.

### **2.2.2 Tragverhalten – Einaxiale Zugversuche an Dehnkörperproben**

Zugversuche an Verbundproben aus Textilbeton werden bereits seit vielen Jahren durchgeführt. Zum Design der Dehnkörperproben und den Prüfapparaturen sind verschiedene Versuchsprogramme insbesondere in den Sonderforschungsbereichen SFB 528 und SFB 532 entwickelt worden [Orl05, Mol05, Jes04, Vos08, Heg04, Bra16]. Probekörpergeometrie und Lasteinleitung bildeten die zwei maßgeblichen Untersuchungsaspekte.

Die Textilbeton-Probekörper lassen sich in rechteckige und taillierte/knochenförmige Geometrien, welche scheibenförmig oder in der Ebene verjüngt ausgeführt werden, unterteilen. Taillierte Steif-



proben (TSP) wurden zum Beispiel von ORLOWSKY und RAUPACH zur Beurteilung von Zugfestigkeitsverlusten von mehreren Rovings oder Textilien in Betonbauteilen untersucht [Bro02, Rau02, Orl04, Cur01]. VOSS untersuchte Ingenieurmodelle zum Tragverhalten von textilbewehrtem Feinbeton auch an TSP-Probekörpern [Vos08]. TSP-Probekörper weisen einen geradlinigen Messbereich auf und sind im Bereich der Einspannung aufgeweitet, sodass auch formschlüssige Lasteinleitungen möglich sind. Der Querschnitt von taillierten Steifproben ist in der Regel gleichmäßig, und die formschlüssige Krafteinleitung durch die knochenförmige Geometrie beeinflusst die Ergebnisse weniger als bei kraftschlüssiger Einspannung [Cur01]. MOLTER untersuchte das Tragverhalten von textilbewehrtem Feinbeton hingegen an Probekörpern, die im Übergang von den Krafteinleitungszonen zum Messbereich verjüngt sind, um die Rissbildung und das Versagen im Messbereich zu provozieren [Mol05]. Überlegungen zur Beeinflussung von Messergebnissen durch Verjüngung in der Ebene oder im Querschnitt sowie zur formschlüssigen Krafteinleitung sind in [Heg03, Jes04] zu finden.

JESSE modifizierte den Versuchsaufbau von MOLTER und nutzte rechteckige Streifenproben mit gleichbleibendem Querschnitt [Jes04], wie sie auch in späteren Ringversuchen zu textilbewehrtem Feinbeton verwendet wurden [Bra16]. Zur Vereinheitlichung von einaxialen Zugversuchen für Carbonbeton mit textiler Bewehrung wurden im Rahmen des C<sup>3</sup>-Projekts (Carbon Concrete Composite) auf Basis von Ringversuchen an der RWTH Aachen University, der MFPA Leipzig GmbH und der TU Dresden, einheitliche Prüfeempfehlungen entwickelt [Cur16, Sch18a]. In Bezug auf die Probekörpergeometrie werden Angaben zur Gesamtlänge, zur freien Weglänge, zur Messbereichslänge sowie zur Breite und Dicke gemacht, wie Bild 2-3 zeigt [Sch18a].

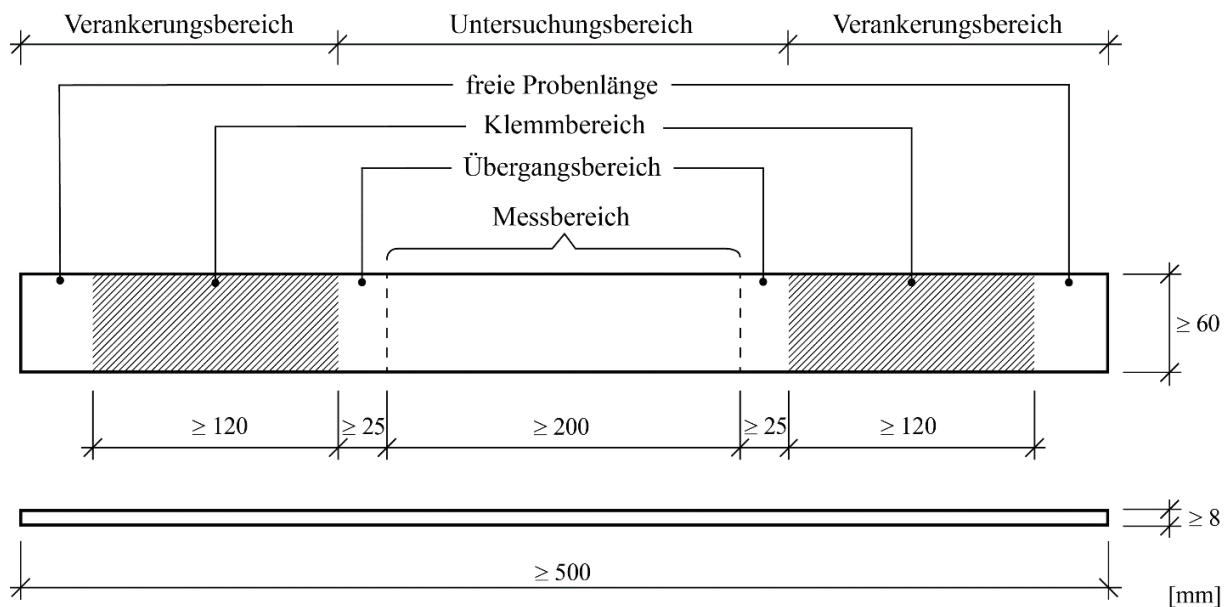


Bild 2-3: Probekörpergeometrie für Dehnkörperversuche gemäß [Sch18a]

Aus den Prüfeempfehlungen von SCHÜTZE et al. gehen auch Hinweise für die Klemmvorrichtung von Dehnkörperproben hervor, um eine gleichmäßige und zentrische Krafteinleitung zu gewährleisten [Sch18a]. Die rechteckigen Dehnkörperproben sind entweder über Schraubvorrichtungen zwischen Stahlplatten zu klemmen oder über pneumatische oder hydraulische Klemmbacken zu

befestigen [Sch18a]. Entsprechend der Oberflächenbeschaffenheit der Dehnkörperproben sind Ausgleichsschichten aus Sandpapier oder druckbeständigen bewehrten Elastomereinlagen zu verwenden [Sch18a]. Klemmflächen, Anpressdruck und Zwischenlagen sind so zu wählen, dass ein Rutschen der Probe verhindert wird, gleichzeitig aber auch keine Spannungsspitzen durch Querdrukspannung die Probe schädigen [Sch18a]. Profilierte Stahlflächen und Zwischenlagen aus Sperrholz können die Reibwirkung erhöhen und ein Herausrutschen verhindern [Len20]. Alternativ können Dehnkörperproben mit Stahlplatten verklebt werden, dies ist in der Regel mit einem erhöhten Prüfaufwand verbunden. Bei Untersuchungen mit zyklischer Belastung oder Kriechversuchen eignet sich eine Verklebung, um ein Herausrutschen der Proben zu verhindern [Mor20]. Die Klemm- oder Klebevorrichtungen zur Lasteinleitung benötigen eine ausreichende Rotationsfreiheit, um eine zentrische Belastung in der Mitte der Bewehrung zu gewährleisten [Sch18a]. Um die Zentrierung der Probe sicherzustellen, ist eine Vorlast von maximal 500 N aufzubringen [Sch18a].

Zugversuche sind weggesteuert mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 1,0 mm/min in einer Zugprüfmaschine mit der Genauigkeitsklasse 1,0 nach DIN EN ISO 7500-1 durchzuführen [Sch18a, DIN7500]. Abweichend wurden Prüfungsgeschwindigkeiten von 0,9 mm/min [Jes04] bis zu 2,0 mm/min genutzt [Han15, Mor20]. NIEDERWALD stellte erhöhte Steifigkeiten und Zugspannungen für unterschiedliche Prüfungsgeschwindigkeiten zwischen 2,0 und 20,0 mm/min fest [Nie17]. Untersuchungen zur Veränderung von Steifigkeit und Zugspannung zwischen 0,9 und 2,0 mm/min sind nicht bekannt.

Die Messung der Verformung im Dehnkörperversuch kann über induktive Wegaufnehmer oder DMS-basierte Wegsensoren (Dehnungsmessstreifen) sowie der digitalen Bildkorrelation (Digital Image Correlation – DIC) erfolgen [Sch18a]. Bei analoger Messtechnik ist darauf zu achten, dass geeignete Halterungen zur Lagesicherheit verwendet werden und die Messtechnik vor Beschädigungen durch abruptes Versagen der Probekörper geschützt wird. Über die digitale Bildkorrelation können auch im Nachgang zum Dehnkörperversuch Messdaten erzeugt werden. Eine ausreichende Übereinstimmung der Verformungsmessung mittels digitaler Bildkorrelation und einer parallelen Messung mit induktiven Wegaufnehmern konnte aufgezeigt werden (siehe Anhang A1).

### 2.2.3 Versagensarten bei Dehnkörperproben

Die Versagensarten von Dehnkörperproben unterscheiden SCHÜTZE et. al. in planmäßige und unplanmäßige Mechanismen. Zu den planmäßigen Versagensmechanismen zählen der Bruch der textilen Bewehrung in der freien Messlänge, Längsrissbildung in der Bewehrungsebene mit flächiger Betonabplatzung und Längsrissbildung senkrecht zur Bewehrungsebene mit seitlichem Betonabplatzen. Unplanmäßige Versagensmechanismen sind der Bewehrungsbruch in der Klemmung, Längsrissbildung in der Klemmung oder der Textilauszug aus dem Klemmbereich durch unzureichende Endverankerungslänge. Bei den aufgeführten Versagensmechanismen kann es auch zu einem Mischversagen kommen. Zum Beispiel kann bei einem guten Verbund der äußeren Filamente der Faserstränge mit dem Feinbeton und einem geringen Verbund der inneren Filamente untereinander ein teleskopartiger Kernfaserauszug auftreten [Sch18a].

Das Versagen von Fasersträngen durch einen Kernfaserauszug ist in Bezug auf die Spannungsverteilung an ungetränkten Fasern, insbesondere Glasfasern, untersucht worden [z. B. Ohn94, Ban04, Jes04, Mol05, Bru07]. Die Ergebnisse zeigen eine Unterteilung in Randfilamente (äußere Filamente), die mit der Feinbetonmatrix in direktem Kontakt stehen und Kernfilamenten (innere Filamente), die nur einen Kontakt zwischen den Filamenten untereinander aufweisen. Den äußeren Filamenten wird eine hohe Verbundspannung zugerechnet, den inneren Filamenten hingegen lediglich ein Reibverbund, der zum Schlupf und somit zum Kernfaserauszug führen kann [Ban04].

CHERIF et. al. beschreiben das Tragverhalten mit Kern- und Randfilamenten auch für getränkte bzw. imprägnierte Filamentgarne. Die ungleichmäßige Spannungsverteilung von äußeren und inneren Filamenten kann durch eine gleichmäßige Tränkung abgebaut werden, wodurch einem Kernfaserauszug vorgebeugt wird und höhere Textilzugspannungen zu erreichen sind [Jes10, Che11]. Bild 2-4 zeigt die qualitative Spannungsverteilung von ungetränkten, teilweise getränkten und vollständig getränkten Fasersträngen. Als Tränkungs- bzw. Beschichtungsmaterialien werden die bekannten Polymerdispersionen und Harzimpregnierungen benannt [Che11].

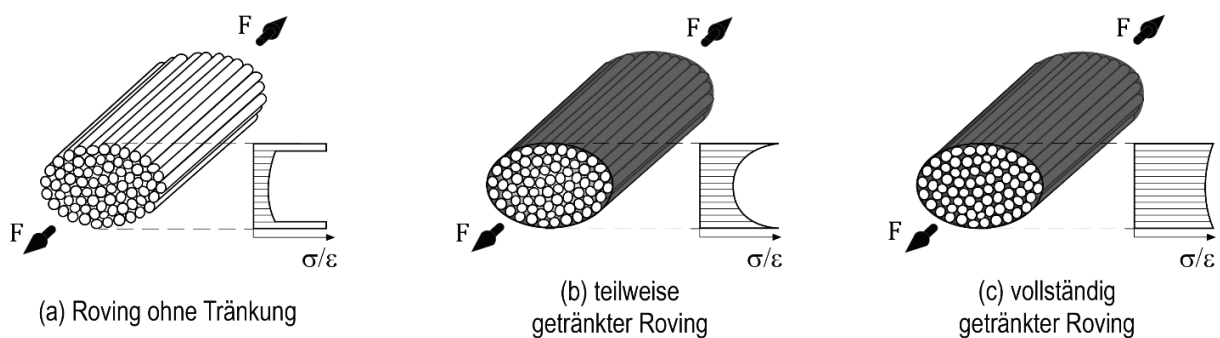


Bild 2-4: Einfluss des Tränkungsgrades auf die Spannungsverteilung im Roving gemäß [Jes10, Lor15b]

#### 2.2.4 Rissbildung

Rissbildung, Rissanzahl, Rissabstand und vor allem die Rissbreiten sind für die Betrachtung von Textilbetonen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG), also für die Instandsetzung von Bauwerken, maßgebend. Die isolierte Betrachtung des Zugtragverhaltens ist nicht ausreichend, stattdessen ist auch das Rissverhalten zu quantifizieren. Dies ist bisher nicht über allgemeingültige Berechnungsmodelle möglich, sodass eine visuelle Aufzeichnung zur Bewertung des Rissverhaltens an Dehnkörperproben erforderlich ist. Entsprechend sind die Ergebnisse immer auf den individuellen Verbundwerkstoff zu beziehen, da die Grenzfläche (Größe und Ausbildung) zwischen textiler Bewehrung und Feinbeton bei gleichbleibendem Bewehrungsgrad für die Rissbildung ausschlaggebend ist. [Mor20]

Die Einflüsse auf den Rissbildungsprozess sind im Rahmen verschiedener Untersuchungen an ungetränkten und getränkten textilen Bewehrungen durchgeführt worden. Ältere Untersuchungen an ungetränkter Bewehrung [Bru07, Jes04] rechnen insbesondere der Verbundqualität der äußeren Filamente zum Feinbeton einen großen Einfluss auf die Rissanzahl und den mittleren Rissabstand zu. JESSE zeigte auf, dass eine hohe spezifische Oberfläche der Faserstränge in der Grenzfläche

zum Feinbeton und somit eine große Umfanglänge der Rovings im Querschnitt zu einem feinen Rissbild führen (siehe Abschnitt 2.2.5) [Jes04]. Durch die Textiltränkung, und somit einer gleichmäßigen Aktivierung einer größeren Anzahl an Filamenten, fallen die Effekte der Randfilamente und Umfanglänge geringer aus [Kul13]. Gleichzeitig haben die Steifigkeit des Tränkungsmaterials sowie die Durchtränkungsqualität einen großen Einfluss auf die Rissbildung [Kul13]. Die Verbundkraft vom Tränkungsmaterial zum Feinbeton kann durch eine zusätzliche Oberflächenmodifikation (z. B. mit Sandabstreuung) vergrößert werden, wodurch signifikant feinere Rissbilder erzeugt werden können [Mor19, Mor20].

Bei der Rissbildung wird zwischen primärer Rissbildung (Risse an der Querbewehrung im Zustand IIa) und sekundärer Rissbildung (Risse aufgrund der Betonbruchdehnung ohne Querschnittsschwächung) unterschieden [Jes04]. Für Dehnkörperproben mit unidirektionaler Faserstrangbewehrung werden die gleichen Mechanismen benannt, jedoch ohne die Zugehörigkeit der primären Rissbildung an eine Querschnittsschwächung. Sekundärrissbildungen konnten bei höheren Belastungen zwischen den Primärrissen ohne Querschnittsschwächung festgestellt werden [Jes04]. Typische Ausprägungen sind Verzweigungen, spontane Richtungsänderungen und geringere Rissabstände. Auch der Bewehrungsgrad in Belastungsrichtung beeinflusst die Rissbildung, sodass bei geringem Bewehrungsgrad die primäre Rissbildung nicht an jedem Queroving auftreten muss [Jes04].

MORALES bestätigte an Carbond Textilien mit heißhärtendem EP und zusätzlicher Oberflächenmodifikation durch Quarzsand die primäre Rissbildung im exakten Rovingachsenabstand quer zur Zugbelastungsrichtung und eine auftretende Sekundärrissbildung bei höheren Lasten zwischen den Achsen [Mor20].

Den Einfluss des Bewehrungsgrades auf die Rissbildung bestätigten auch BRUCKERMANN et al. [Bru07, Vos08, Kul13, Mor19]. Der Bewehrungsgrad scheint nach [Bru07] auch für die Ausprägung der diffusen Rissbildung in Zustand IIb verantwortlich zu sein. Dehnkörperversuche an Glasfasertextilien mit hoher Filamentfeinheit erzeugten überwiegend eine diffuse Rissbildung. Im Gegensatz zu den Beobachtungen von JESSE konnte keine bevorzugte Rissbildung im Bereich der Schussfäden festgestellt werden [Bru07]. BRUCKERMANN interpretierte die diffuse Rissbildung mit einem ausgeprägten Ohno/Hannant-Effekt. Demnach nehmen die inneren Filamente bei der Mehrfachrissbildung Spannungen auf, die aufgrund eines schwachen Verbundes zwischen zwei Rissen aber nur geringe Spannungen an die Matrix übertragen können [Bru07].

Eine eindeutige Beschreibung für die unterschiedliche Entstehung von primärer und sekundärer Rissbildung sowie der diffusen Rissbildung ist nicht gegeben. Zu beachten ist, dass die aufgeführten Untersuchungen an stark variierenden Materialkomponenten durchgeführt wurden und ein direkter Vergleich nicht möglich ist. Die Untersuchungen erfolgten in der Regel an ungetränkten oder polymergetränkten Textilien.

Weitere Einflussgrößen auf die Rissbildung sind die Rovingform (rund/elliptisch/flach), der E-Modul der textilen Bewehrung, die bei Gelegen vorhandenen Knotenpunkte, die Betonzugfestigkeit und die Betondeckung [Heg05, Mor19].

Zur Rissbreitenanalyse wurden zahlreiche Untersuchungen an getränkter textiler Bewehrung im Dehnkörperversuch durchgeführt, die MORALES gegenüberstellte [Mor20]. Aufgrund der unterschiedlichen Materialkombinationen und Bewehrungsgraden ist wieder keine direkte Vergleichbarkeit der erzielten Rissbreiten möglich.

MORALES führte aber die Vergleichsgröße der relativen Rissverteilung ein, bei der die Anzahl der auftretenden Risse in der Messfläche in das Verhältnis zum Rovingachsenabstand senkrecht zur Lastrichtung gesetzt wird. Der Verhältniswert 1,0 [-] gibt eine Rissbildung an jedem Roving senkrecht zur Belastungsrichtung an [Mor20]. Bei Werten kleiner 1,0 [-] ist somit ein Rissabstand geringer als der Abstand der 90° Rovings gegeben.

Tabelle 2-2 zeigt einen Auszug der Aufstellung aus [Mor20] mit Ergänzungen aus [Wil21] zur relativen Rissbreite sowie den mittleren und maximalen Rissbreiten aus Dehnkörperversuchen. Die relativen Rissbreiten zeigen die beste Ausnutzung der Bewehrung bei EP-Tränkung und EP-Tränkungen mit Oberflächenmodifizierung (EPI + Sand). Für die aufgeführten Bewehrungen mit mineralischen Tränkungen auf Basis von Kieselsäureester (KSE) und Zementsuspension ist aufgrund fehlender Bewehrung senkrecht zur Zugbelastung (Schussrovings) keine Bewertung möglich. Ein Verhältniswert unterhalb von 1,0 [-], für den eine sekundäre Rissbildung erforderlich ist, konnte nicht festgestellt werden [Mor20].

Tabelle 2-2: Übersicht über die Rissbreiten kurz vor dem Versagen von carbonbewehrten Proben unter Zugbeanspruchung nach [Mor20] mit Ergänzungen aus [Wil21]

Textile Bewehrung <sup>1)</sup>	Bewehrungsgrad	Bruchspannung $\sigma_u$	Mittlere Rissbreite bei $\sigma_u$	Maximale Rissbreite bei $\sigma_u$	Relative Rissbreite	Quelle
mm/mm, -, tex	%	MPa	mm	mm	-	-
Gelege 21/21, EPI, 3200	0,36	3000 ± 250	0,47 ± 0,01	-	1,7	
Gelege 21/21, EPI + Sand, 3200	0,36	3270 ± 180	0,28 ± 0,04	-	1,0	[Mor19]
Gelege 21/21, EPI + Sand, 3200	0,48	3250 ± 230	0,21 ± 0,06	-	1,1	
Roving, KSE, 3450	1,46	1150 ± 130	0,10 ± 0,05	~ 0,15	-	[Len20]
Gelege 10,8/18, SBR, 3300	1,8	1327	0,26	0,48	2,2	[Han15]
Gelege 10,8/18, SBR, 3300	0,9	1253	0,58	0,76	4,5	
Gelege 21/23, EP, 1650	1,96	2304 ± 22	0,51	-	1,0	[Kul13]
Gelege 21/23, SBR, 1650	1,76	1895 ± 135	1,29	-	6,8	
Roving, Zementsuspension, 3450	1,19	2970	0,11 <sup>2)</sup>	0,20	-	[Wil21]

<sup>1)</sup> Art der Bewehrung mit Maschenweite, Tränkungsmaterial, Textilfeinheit (tex)

<sup>2)</sup> Mittlere Rissbreite bei 1966 N/mm<sup>2</sup>, also bei 66 % der Bruchspannung

Die Aufstellung der Rissbreitenanalyse zeigt, dass die mittleren Rissbreiten kurz vor dem Versagen in der Regel größer 0,1 mm sind. Einzige Ausnahmen sind die Zugversuche mit mineralisch getränkten Carbonrovings [Len20, Wil21]. Zu beachten ist aber die wesentlich geringere Bruchspannung im Vergleich zu EP getränkten Textilien in [Len20]. In [Mor20] wird bemerkt, dass die mineralisch getränkten Rovings lediglich 30 % der theoretischen Bruchlast der Bewehrung erreicht haben. Dies sei vergleichbar mit den wesentlich geringeren Bruchlasten von SBR-getränkten Textilien. Bei dieser Überlegung geht MORALES von der theoretischen Filamentgarn-Zugspannung aus, die z. B. seitens der Textilhersteller ermittelt werden (siehe Tabelle 2-1 in Abschnitt 2.1.2). Es wird außer Acht gelassen, dass diese theoretischen Zugspannungen in Zugversuchen an Einzelfilamenten oder EP getränkten Fasersträngen ermittelt werden. Eine Bewertung der Ausnutzung textiler Bewehrung durch andere Tränkungsmaterialien als EP bedarf einer anderen Vergleichsbasis. Diese Bewertung sowie Kennwerte zur Textilzugspannung mineralisch getränkter Rovings werden in Abschnitt 4.2 aufgegriffen. Die Ergebnisse von WILHELM zeigen, dass mineralische Tränkungsmaterialien auf Zementsuspensionsbasis mit mikrosilikatischen Füllstoffen in der Lage sind, Textilzugspannungen zu erreichen, die auf dem Niveau von EP getränkten Gelegen liegen [Wil21].

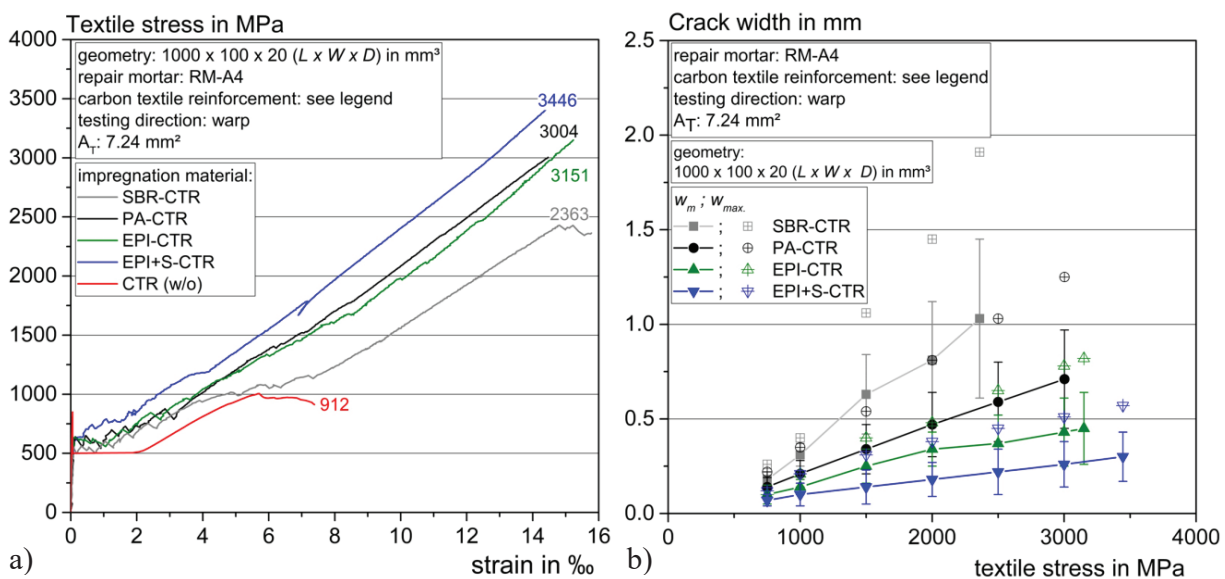


Bild 2-5: Einfluss der Tränkungsmaterialien von Textilgelegen auf das Zugtragverhalten von carbonbewehrtem Textilbeton [Mor20], a) Spannungs-Dehnungskurven, b) Rissbreiten-Spannungskurven

Um eine Vergleichbarkeit von Tränkungsmaterialien in Bezug auf Spannungs-Dehnungsbeziehungen und Rissbreiten-Spannungsbeziehungen zu erzielen, hat MORALES Zugversuche an rechteckigen Dehnkörpern durchgeführt. Geometrie, Bewehrungsgrad, Feinbeton und Prüfbedingungen waren gleich. Es wurden ein ungetränktes Textil sowie vier verschiedene Tränkungen (SBR, PA, EPI und EPI + Sand) untersucht. Die Spannungs-Dehnungslinien (Bild 2-5 a)) zeigen für die getränkten Textilien einen ähnlichen Verlauf, der auch die dreiteiligen Risszustände nach [Jes04] stützt. Auch konnte bestätigt werden, dass steifere Textiltränkungen zu einem fließenden Übergang von Zustand IIa zu IIb führen können. Die Auswertung der Rissbreiten (Bild 2-5 b)) bestätigt den

Trend aus Tabelle 2-2, dass die Rissbreiten von SBR-getränkten Textilien größer sind. Die kleinsten Rissbreiten konnten mit EPI + Sand Textilien festgestellt werden. Die höhere Steifigkeit führte zu nicht unerheblichen Längsrissbildungen [Mor20].

WILHELM führte auch Dehnkörperversuchen an textiler Bewehrung mit SBR-, Acrylat-, und Epoxidharztränkungen durch. Bei den Acrylat- und Epoxidharzproben wurde mit und ohne Schussfäden geprüft sowie einem Bewehrungsgrad, der mit über einem Prozent deutlich über den Untersuchungen von MORALES lag [Mor20, Wil21]. Auch wenn wieder auf die begrenzte Vergleichbarkeit unterschiedlich bewehrter Dehnkörperproben hingewiesen sei, entsprechen die Untersuchungen von WILHELM den aufgeführten Ergebnissen von MORALES [Mor20, Wil21]. Die Entfernung der Schussfäden führte bei den EP-Proben zu keiner signifikanten Veränderung, was auf den hohen Bewehrungsgrad hindeutet [Wil21]. Bei den Acrylat-Proben führte die Entfernung der Schussrovings zu einer Schädigung der Oberflächenstruktur, aus der eine geringere Zugfestigkeit aber auch eine feinere Rissbildung hervorging [Wil21]. Für detaillierte Daten zu der Vergleichbarkeit von unterschiedlichen Tränkungsmaterialien in Dehnkörperversuchen sei auf die genannten Untersuchungen verwiesen [Mor20, Wil21].

Die von WILHELM durchgeführten Untersuchungen zu Rissbreiten und Rissabständen an Dehnkörperproben mit mineralisch getränkten Fasersträngen (mineralische Zementsuspension mit mikrosilikatischen Füllstoffen) zeigen, dass Rissanzahl und maximale Rissbreiten im Bereich von EP getränkten Textilien mit zusätzlicher Sandbestreuung (EPI + Sand) liegen. Gleichwohl ist ein höherer Bewehrungsgrad erforderlich [Wil21].

### 2.2.5 Einfluss von Rovingquerschnitt und Rovingumfang

Der Einfluss der Länge des Umfangs von textiler Bewehrung (Rovingumfang/Garnumfang) zur Feinbetonmatrix sowie der Querschnittsfläche auf die Verbundeigenschaften ist hinlänglich bekannt [Pur00, Ban04, Mol05, Jes04, Lor14, Pre19]. Der Roving- oder Garnumfang stellt eine von der Faserquerschnittsfläche (berechnet aus der Feinheit  $tex$ , siehe Abschnitt 2.1.2) unabhängige Größe dar [Pre18]. Durch die Tränkung und/oder Weiterverarbeitung zu textilen Gelegen können die Garne unterschiedliche Formen annehmen [Pre19]. Daraus ergeben sich entsprechend unterschiedliche Längen des Umfangs und somit eine variierende Kontaktfläche zum Feinbeton. Insbesondere bei ungetränkten oder teilweise getränkten Textilien können die reale Querschnittsfläche und der Rovingumfang auch fortlaufend entlang des Textilstrangs im Verbundwerkstoff variieren. MOLTER beschreibt eine Effektivität von Multifilamentgarnen aus AR-Glas in Abhängigkeit der Querschnittsverhältnisse von Umfang zu Fläche. Flache oder bändchenförmige Querschnitte mit geringer Textilfeinheit weisen eine höhere Effektivität auf als runde Querschnitte mit hoher Textilfeinheit [Mol05]. Bei der Berechnung der Effektivität nutzte MOLTER theoretische Umfangs- und Querschnittswerte von Textilien, die nicht in einer Zementmatrix eingebunden waren. Um reale Querschnittswerte von textiler Bewehrung zu ermitteln, nutzten z. B. PURNELL, BRAMESHUBER und JESSE elektronische Bildauswertungen von Dick- und Dünnschliffproben [Jes04]. Insbesondere in [Jes04] wird eine sehr detaillierte Methode zur Bestimmung des Umfangs eines Rovings aufgezeigt, bei der auch der Zwickel zwischen einzelnen Filamenten berücksichtigt wird.

## 2.3 Einsatzgebiete

Die Einsatzgebiete von textilbewehrtem Beton sind in den Bereichen Neubau, Verstärkung und Instandsetzung sehr vielfältig. Beispielhafte Bauwerke im Neubau sind Fußgänger- und Radfahrräderbrücken [Cur07a, Hel16]. Des Weiteren werden im Neubau insbesondere die Herstellung von Fertigbauteilen, wie Sandwichelementen [Sha14, DiB17] und Fassadenplatten [Hei16], aber auch ganze Dach- und Wandkonstruktionen, wie am CUBE in Dresden, aus Textilbeton realisiert [C322b]. Ein noch größeres Potential bietet Textilbeton in der Verstärkung und Instandsetzung von bestehenden Bauwerken. Bei Verstärkungsmaßnahmen kann eine Ertüchtigung der Tragfähigkeit oder auch eine Erhöhung der Tragfähigkeit von Bauteilen erreicht werden [Cur07b].

Im Instandsetzungsbereich liegt ein Schwerpunkt – neben der konstruktiven Verstärkung – auf dem Wiedererlangen und/oder Erhalten der Gebrauchstauglichkeit durch eine schützende, rissüberbrückende und wasserundurchlässige Schicht. Beispielhafte Projekte sind das Forschungsvorhaben zur Anwendung von textilbewehrtem Spritzmörtel zur Instandsetzung von Wasserbauwerken am Wehr Horkheim [Orl11] oder die Instandsetzung von Teilbereichen der Dachkonstruktion im Aachener Dom mit Textilbetonbandagen [Büt12b]. Weitere realisierte Projekte sind beispielsweise eine vollflächige rissüberbrückende Instandsetzung eines Zuckersilos im Jahr 2012 [Wei13], die Sanierung der Dachkonstruktion des Mariendoms Neviges in Velbert [Rem18b] oder die Verstärkung der Hyperschale in Magdeburg [Sch21]. Textilbeton für die Instandsetzung zeichnet sich insbesondere durch ein geringes zusätzliches Flächengewicht in Kombination mit hohen Zugfestigkeitskennwerten zur Rissüberbrückung mit feiner Rissverteilung aus. Auf die Instandsetzung mit Textilbeton von gerissenen Bauwerken mit zum Teil wasserführenden Rissen wird in den folgenden Abschnitten näher eingegangen.

### 2.3.1 Instandsetzung mit Textilbeton zur Rissüberbrückung

Für die Instandsetzung von Bauwerken mit Textilbeton bestehen auch nach mehreren Jahrzehnten der Forschung und erfolgreich umgesetzten Pilotprojekten [Orl11, Büt21b, Wei13, Mor17, Rem18b] keine normativen Standards [Mor20]. Neben den unterschiedlichen Eigenschaften der verschiedenen Textilbetonsysteme (siehe Abschnitt 2.1) kommen weitere individuelle Randbedingungen durch die Altbauwerke hinzu. Einzelfallprüfungen sind teilweise unerlässlich.

Die durchgeführten Forschungsvorhaben, Dissertationen und Pilotprojekte in der Praxis ermöglichen z. B. erste allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen (AbZ) durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DiBT). Beispielsweise wurde die Instandsetzung des Zuckersilos [Wei13] mit dem *Verfahren zur Verstärkung von Stahlbeton mit TUDALIT (Textilbewehrter Beton)* [DiB14] durchgeführt. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen begrenzen aber den Anwendungsbereich durch den entsprechenden Zulassungsgegenstand auf wenige Einsatzgebiete und bestimmte Materialien. Beispielhaft sei die AbZ Z-31.10-190 genannt, die ein *Verfahren zur Rissbreitenreduzierung in Betonkonstruktionen mit oberflächennah eingelegten Carbontextilien* bietet. Die Anwendung begrenzt sich auf die zugelassene Textilbewehrung „Quinting Grid“ an horizontalen oder flachgeneigten Stahlbetonflächen aus Normalbeton mit einer Festigkeitsklasse  $\geq C25/30$  [DiB15].



Das BAW-Merkblatt *Flächige Instandsetzung von Wasserbauwerken mit textilbewehrten Mörtel- und Betonschichten (MITEX)* legt einen Grundstein zur Bemessung verschiedener Textilbetonsysteme für die Instandsetzung [BAW19a]. Die Grundlagen des Merkblattes wurden im Rahmen der Forschungstätigkeiten von MORALES geschaffen [Mor20]. Eingeflossen sind Erkenntnisse aus Forschungsvorhaben von Orłowsky sowie WESTENDARP [Orl07, Orl12, Wes16]. Die Funktion der Instandsetzung von Wasserbauwerken mit textilbewehrten Mörtel- und Betonschichten nach MITEX besteht aus einer Enthaftungsschicht im Bereich von Rissen im Bestandsbauwerk und der darüber angeordneten Textilbetonschicht. Die Enthaftung von Textilbeton und Bestandsrissbereich ermöglicht die Bildung eines feinen Rissbildes [Mor14]. Dieses Konzept ist auch als DURTEX-Prinzip bekannt und wurde an verschiedenen Forschungs- und Pilotprojekten erfolgreich durchgeführt [Orl11, Büt12b, Rem18b]. In den folgenden Abschnitten wird auf das Konzept der Schutzschicht aus DURTEX und die Prüfung von Textilbetonsystemen für den Einsatz der flächigen Instandsetzung von Wasserbauwerken nach MITEX weiter eingegangen.

### 2.3.2 Instandsetzung nach dem Konzept DURTEX

DURTEX steht für **d**auerhafter, **w**asserundurchlässiger, **r**issüberbrückender **T**extilbeton und ist ein Instandsetzungskonzept für Bauwerke, z. B. aus Naturstein und Stahlbeton [Büt12b]. Das Instandsetzungskonzept wurde im Rahmen von Forschungsprojekten am Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (ibac) entwickelt. In zwei Pilotprojekten wurde das DURTEX-System in der Praxis getestet. Zum einen wurde eine Instandsetzungsfläche am Neckar Wehr Horkheim mit DURTEX ausgebildet und zum anderen wurde eine Rissbandage auf einer Natursteinschicht der Dachkonstruktion des Aachener Doms ausgebildet [Orl11, Büt12b]. Das Instandsetzungskonzept besteht aus einem Instandsetzungsmörtel, textiler Bewehrung aus AR-Glas oder Carbon und einem Enthaftungstreifen im Bereich des Untergrundrisses [Büt12b]. Die Materialkombination ermöglicht eine Rissverteilung des Bestandsrisses auf viele Risse in der Instandsetzungsschicht und kann auch tageszeitliche und vor allem jahreszeitliche Rissbewegungen durch Temperaturänderungen ausgleichen, wie die Untersuchungen von ORŁOWSKY zeigten [Orl11]. Durch Untersuchungen vier Jahre nach der Herstellung der Instandsetzungsschicht am Wehr Horkheim konnte die Funktionstüchtigkeit der Textilbetonschicht bestätigt werden. Im Vergleich zu den Referenzflächen sind keine Risse bzw. nur planmäßige Risse  $< 0,10$  mm im Enthaftungsbereich aufgetreten. Die jahreszeitliche Rissbreitenänderung im Untergrund wurde mit 0,18 bis 0,28 mm ermittelt [Mor14].

MORALES prüfte mehrere Textilbetone mit unterschiedlichen Altbetonen, Reparaturmörteln und Carbontextilien nach dem DURTEX-Konzept. Eine Kombination aus einer zweilagigen Carbonbewehrung mit einer besandeten Epoxidharzbeschichtung führte bei einer Rissaufweitung von 0,6 mm im Untergrund zu Rissbreiten der Einzelrisse von  $w_{0,95} = 0,077$  mm [Mor20]. Der Bewehrungsgrad betrug 0,43 %.

Auf Basis der an der RWTH Aachen durchgeführten Untersuchungen rund um das Instandsetzungssystem DURTEX und der erfolgreichen Praxisumsetzung ist in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Wasserbau ein Merkblatt zur flächigen Instandsetzung von Wasserbauwerken mit textilbewehrten Mörtel- und Betonschichten (MITEX) erarbeitet worden [Mor17, BAW19a].

### 2.3.3 Instandsetzung nach BAW-Merkblatt (MITEX)

Das BAW-Merkblatt MITEX regelt den Einsatz von flächigen Instandsetzungssystem für gerissene Wasserbauwerke mit textilbewehrten Mörtel- und Betonschichten unter definierten Randbedingungen und Beanspruchungsszenarien. Es werden Angaben zum Aufbau, der Funktionsweise, zur Planung und Bemessung gemacht sowie Anforderungen an das Instandsetzungssystem gestellt und Angaben zur Ausführung gemacht. Der Anwendungsbereich beschränkt sich bisher auf die Instandsetzung von freibewitterten Bauteilen ohne vor- und rückseitige Wasserbeanspruchung. Gemäß der *Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) für die Instandsetzung der Betonbauteile von Wasserbauwerken (Leistungsbereich 219)* [ZTV-W LB 219] sind Spritzmörtel/Spritzbeton aus zementgebundenem Betonersatz mit oder ohne Polymermodifizierung mit einem Größtkorn  $\leq 6$  mm in Schichtdicken von 30 bis 40 mm zu verwenden. Die Instandsetzungssysteme nach MITEX stellen ein weiteres Verfahren gemäß ZTV-W LB 219 für die flächige Instandsetzung von Wasserbauwerken dar, welches Rissbreitenänderungen im Untergrund berücksichtigt. Die Anwendung ist nur zulässig, wenn vorwiegend aus jahreszeitlichen Temperaturänderungen Rissbreitenänderungen von 0,6 mm nicht überschritten werden. Die Vorbemerkungen enthalten den Hinweis, dass derzeit nur Carbonbewehrungen anzuwenden sind. Eine Anwendung auf bestimmte Tränkungsmaterialien für textile Bewehrungen wird nicht vorgegeben, es wird aber auf die gängigen am Markt vertretenden Polymertränkungen und Acrylatdispersionen verwiesen. [BAW19a]

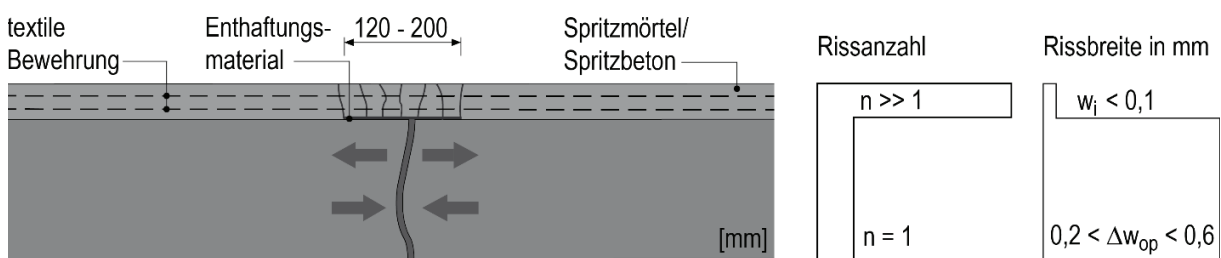


Bild 2-6: Aufbau und Funktionsweise des Instandsetzungssystems nach [BAW19a] in Anlehnung an [Orl11, Büt12b]

Bild 2-6 zeigt den Aufbau und die Funktionsweise des Instandsetzungssystems entsprechend des BAW-Merkblatts MITEX. Maßgeblich sind die Forschungsergebnisse aus [Mor19, Mor20] mit den Vorarbeiten von [Orl12b] und [Büt12b] in die Erstellung des Merkblatts eingeflossen. Weitere Veröffentlichungen zu Untersuchungen von anderen Textilbetonsystemen an Rissüberbrückungsprobekörpern gemäß MITEX sind bisher nicht bekannt. Das BAW-Merkblatt MITEX sieht eine Systemprüfung von Instandsetzungssystemen am Verbundprobekörper vor, auf die im Abschnitt 3.4.3 weiter eingegangen wird.

### 2.3.4 Rissheilung (bewehrter) Bauteile aus Beton

Die Rissheilung stellt einen maßgebenden Prozess für die erfolgreiche Instandsetzung von wasserführenden Rissen in Bauwerken mittels textilbewehrtem Feinbeton dar. Wie z. B. die Funktionsweise nach MITEX (siehe Bild 2-6) zeigt, werden große Risse aus dem Bestand auf viele feine Risse in der Instandsetzungsschicht verteilt. Risse sind in Betonbauteilen nicht vermeidbar und an geplanten Stellen auch beabsichtigt.

Für Stahlbetonbauteile stellt die DAfStb-Richtlinie für *Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton* (WU-Richtlinie) Anforderungen an eine mögliche Selbstheilung. Dazu zählen unter anderem die Einhaltung bestimmter Rechenwerte, die sich aus der Bauteildicke und der Drucksäule des Wassers ergeben. Dem Verhältniswert (hydraulischer Gradient) stehen zulässige Rissbreiten gegenüber. Die maximale Rissbreite ist auf 0,20 mm beschränkt [DAfStb WU-RL]. Die anerkannten Regeln der Technik der WU-Richtlinie basieren auf einer Vielzahl von Forschungsergebnisse nach EDVARSEN und RIPPHAUSEN [Edv96, Rip89]. MORALES führt diese und weitere Literatur zur Rissheilung auf [Mor20]. Wesentliche Punkte werden im Folgenden wiedergegeben und ergänzt.

Die Rissheilung ist im Bereich der Selbstheilung nach der Definition des RILEM Technical Committee in autogene und autonome Prozesse zu unterscheiden. Selbstheilung bedeutet, dass eine Wiederherstellung und damit eine Leistungsverbesserung, die durch eine vorhergehende Aktion verringert wurde, durch das Material selbst erreicht wird. Bei autogenen Prozessen geschieht dies durch vorhandene Materialkomponenten, die auch ohne eine Beabsichtigung der Selbstheilung im Bauteil vorhanden sein können. Autonome Selbstheilung geschieht durch Materialkomponenten, die sonst nicht im Bauteil vertreten wären (technische Zusatzstoffe). [Roo13]

Die Untersuchungen zur autogenen Selbstheilung betrachteten mechanische, physikalische und chemische Prozesse, von denen die chemischen Prozesse die größte Bedeutung für die Selbstheilung darstellen [Edv96]. EDVARSEN benennt die Bildung von Calciumcarbonaten ( $\text{CaCO}_3$ ) als Hauptauslöser für die autogene Selbstheilung. MEICHSNER stellte bereits fest, dass ohne die Bildung von  $\text{CaCO}_3$  eine autogene Rissheilung nicht möglich ist [Mei91]. Weitere Untersuchungen zur Selbstheilung betrachteten u. a. eine fortschreitende Hydratation im Beton, unterschiedliche Zementarten, das Betonalter oder die Wasserhärte, die aber einen untergeordneten Einfluss haben [Edv96, Roo13]. Der maßgebende chemische Prozess der  $\text{Ca-CO}_3$ -Bildung wird in seiner Wachstumsrate durch zur Verfügung stehendes Wasser, den anstehenden Wasserdruck sowie die Rissbreite beeinflusst [Edv96].

Autogene Selbstheilung von Rissen im Textilbeton wurde auch von LIEBOLDT und MORALES festgestellt [Lie12, Mor20]. Für Textilbetone können jedoch die Anforderungen zur Selbstheilung von Rissen nach z. B. WU-Richtlinie nicht gleichermaßen angewendet werden. Risse kleiner 0,1 mm sind für eine Rissheilung anzustreben. Die maßgebenden Erkenntnisse aus Messungen zur Wasserdurchflussmenge ( $\text{cm}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$ ) und zur optischen Rissheilungsanalyse werden im Folgenden zusammengefasst [Lie12, Mor20].

LIEBOLDT stellte an unterschiedlich bewehrten Textilbetonprobekörpern (300 x 100 x 14 mm) eine Selbstheilung durch die Bildung von  $\text{CaCO}_3$  nach maximal 35 Stunden Druckwasserbeaufschlagung mit 0,1 bar fest. Die Rissbreiten variierten zwischen  $w_{cr} = 0,022$  und 0,043 mm. Erzeugt wurden die Risse durch zyklisches Aufweiten durch Zuglasten bis zu einer Dehnung von maximal 5,0 %. Untersucht wurden die Risse im unbelasteten Zustand. Die Ergebnisse zeigten, dass nicht nur die Rissbreite, sondern auch Rissanzahl, Bindemittelzusammensetzung oder Fließparameter den Wasserdurchfluss beeinflussen. [Lie12]

MORALES untersuchte die Rissheilung an Verbundprobekörpern nach dem DURTEX-Konzept unter statischer und zyklischer Belastung. Die Druckwasserbeaufschlagung erfolgte über die Rissöffnung im Betonuntergrund. Die Probekörper unter statischer Belastung zeigten, dass die unterschiedlichen Enthftungsmaterialien eine abdichtende Wirkung haben können. An drei Proben wurde kein Wasserdurchschlag festgestellt, bei drei weiteren Proben zeichnete sich ein Wasserdurchtritt ab, der über die Prüfdauer von mindestens einem Monat kontinuierlich bestand. Die Rissbreiten lagen im Mittel unterhalb von  $w_{cr,mean} < 0,10$  mm, maximale Rissbreiten reichten bis zu  $w_{cr,max.} = 0,124$  mm bei einer Rissöffnung im Betonuntergrund von  $w_{lab} = 0,63$  mm. Der mittlere Wasserdruck lag zwischen 0,42 und 0,55 bar. Die Probekörper unter zyklischer Wasserbeanspruchung zeigten bereits nach wenigen Stunden einen Wasserdurchschlag in den Rissen im Textilbeton, die aber nach 20 Tagen und maximal 1.136 Zyklen trocken waren. Eine EDX-Analyse des Rissufers konnte die Bildung von Calciumcarbonat nachweisen. [Mor20]

#### 2.4 Mineralisch basierte Tränkungen und Beschichtungen textiler Bewehrung

Bisherige Untersuchungen zu mineralischen Tränkungen und Beschichtungen von textiler Bewehrung umfassen Füllstoffe wie Mikro- und Nanosilika, Kieselsäureester oder auch Plasmabehandlungen mit anschließender Zementsuspensionsträngung [Coh10, Pel15, Dvo16, Nad17, Sch17b, Sch18b, Len20]. Ziele der mineralischen Trängung sind eine Verbundverbesserung zwischen den Multifilamentgarnen und der Feinbetonmatrix [Coh10, Dvo16], höhere Alterungsbeständigkeit insbesondere bei AR-Glas [Coh10] und eine bessere Temperaturbeständigkeit im Vergleich zu Polymertränkungen. Der Einsatz in realisierten Pilot- oder Praxisprojekten ist bisher nicht bekannt.

Bei der Verwendung von mineralischen Tränkungen und Beschichtungen besteht eine größere Schwierigkeit einer guten Adhäsion zur textilen Bewehrung als bei Polymertränkungen. Carbonfasern sind unpolar, wodurch eine chemische Bindung nahezu unmöglich ist [Coh10]. Auch erzeugen die glatten Filamente eine geringe spezifische Oberfläche und ermöglichen keine mechanische Verzahnung [Coh10]. Bei AR-Glasfasern ist zu beachten, dass Trängungsmaterial oder Füllstoff eine geringere Härte haben sollten als die Filamente, da es ansonsten zu Festigkeitsverlusten kommen kann [Coh10]. Mineralische Trängungsmaterialien können bei ausreichend guter Applikation und Durchträngung der äußeren Filamente über puzzolanische Reaktionen mit den Hydratationsprodukten der Feinbetonmatrix eine gute Verbundfestigkeit entwickeln [Coh10, Pel15, Dvo16, Nad17, Sch18b].

Die Problematik der Adhäsion von Trängungsmaterial und Filamentoberfläche ist bereits seit Jahrzehnten bekannt. NURSEL stellte eine Reihe von Untersuchungen meist im Bereich von Faserverstärkungen mit Harzen zusammen. Unterschiedliche Oxidations- und Plasmabehandlungen können zu einer Verbesserung der Oberfläche durch chemische oder strukturelle Veränderungen führen, wodurch Verbundverbesserungen erreicht werden konnten. Die Untersuchungen zeigten auch, dass zu intensive oder zu lange Plasmabehandlungen zu Festigkeitsverlusten führen. [Nur00]

Nachdem die älteren Untersuchungen zu Plasmabehandlungen die Veränderungen der Oberflächenstruktur von Carbonfilamenten für den Einsatz mit Harzen behandelten [Nur00], zielen jüngere Untersuchungen darauf ab, funktionelle Sauerstoffgruppen auf die Faseroberfläche zu bringen, um die intrinsisch unpolare und hydrophobe Oberfläche für die Tränkung mit mineralischen Wassersuspensionen zu verbessern. SCHNEIDER et. al. verarbeiteten Carbonrovings in einem ersten Schritt mit einer 100-Sekunden-Plasmabehandlung, im zweiten Schritt mit einer Tränkung in einer Mikrodur-Zementsuspension und prüften dies im dritten Schritt mit einer Pull-Out-Verbundprüfung in einem Feinbetonprobekörper. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Plasmabehandlung mit Sauerstoff oder Sauerstoff und Argon im Vergleich zu Referenzproben größere Verbundfestigkeiten im Pull-Out-Versuch erzielt werden konnten. [Sch17b]

Eine weitere Plasma-Beschichtungsmethode von  $\text{SiO}_x$  auf Carbonfasern mittels plasmaunterstützter chemischer Gasphasenabscheidung (plasma-enhanced chemical vapour desposition – PECVD) untersuchte ZHAO. Mittels PECVD wurde in einer Vakuumkammer mit Sauerstoff und Argon als Prozessgase Hexamethyldisiloxane auf den Carbonrovings appliziert. Durch die Polymerisation bildet sich eine Silikatschicht ( $\text{SiO}_x$ -Film) auf der Oberfläche aus. Die plasmabeschichteten Rovings wurden mit einer Mikrodur-Zementsuspension getränkt und in Pull-Out-Versuchen geprüft. Auch ZHAO konnte durch die Plasmabehandlung eine Steigerung der Verbundkräfte feststellen. [Zha20]

Untersuchungen zu Zugversuchen am Einzelfilament konnten nur eine geringe Steigerung der Zugfestigkeit durch die Plasmabehandlung feststellen [Sch17b, Zha20]. SCHNEIDER begründete die Verbesserung der Zugfestigkeit vielmehr mit der Probenpräparation [Sch17b]. Beide Untersuchungen weisen eine größere Varianz der Ergebnisse aus den Zugversuchen auf, was auf eine Schädigung der Filamente durch die Plasmabehandlung zurückzuführen sein könnte [Sch17b, Zha20]. Die höheren Verbundkräfte in den Pull-Out-Versuchen gegenüber keiner signifikanten Zugfestigkeitssteigerung in den Filamentzugversuchen deuten darauf hin, dass die Plasmabeschichtung erst durch die Tränkung mit der Zementsuspension funktioniert. Eine Verbesserung des Verbundes der Filamente untereinander scheint nicht gegeben zu sein.

COHEN modifizierte die Mikrostruktur der Oberfläche von AR-Glasfasern mit Silikasuspensionen und anschließender Tränkung in einer Zementsuspension, um ein kontrolliertes teleskopartiges Versagen der Garne im Verbundwerkstoff zu erhalten und dieses unter beschleunigter Alterung beizubehalten. Des Weiteren sollte eine maximale Erstrissspannung erreicht und die Duktilität beibehalten werden. Hauptziel war eine effiziente Spannungsübertragung zwischen den Filamenten und der zementösen Matrix. Es wurden silikatische Mikro- und Nanofüllstoffe angewendet. Bei Glasfaserrovings mit 2400 tex konnte im Vergleich zur unbehandelten Referenzprobe eine Steigerung der Zuglast von circa 30 % erreicht werden. [Coh10]

Weitere Verbunduntersuchungen (ohne Plasmabehandlungen) von z. B. PELED, DVORKIN und NADIV betrachteten den Einfluss der Tränkungen von Carbon-Multifilamentgarnen mit mikro- und nanosilikatischen Füllstoffen in Wassersuspensionen im Vergleich zu unbehandelten Referenzproben und EP-Tränkungen [Pel15, Dvo16, Nad17]. Die Messergebnisse zeigen, dass durch

mikrosilikatische Tränkungen eine Steigerung der Pull-Out-Kräfte von bis zu 60 % in Bezug auf die unbehandelten Referenzproben möglich ist [Pel15]. Nanosilikatisch getränkte Carbonfasern hingegen reduzieren die Verbundfestigkeit um bis zu 30 % gegenüber ungetränkten Referenzfasern [Pel15, Nad17].

LU untersuchte Nanopartikel aus Siliciumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) als Beschichtung an Carboneinzelfilamenten. Dazu wurden Carbonfilamente für jeweils drei Stunden in Salpetersäure und einer dreiprozentigen Silanlösung (KH550) vorbehandelt und anschließend mit Ethanol gewaschen. In einem zweiten Schritt wurde eine Lösung aus 1000 ml Ethanol mit einem Massenprozent ionischem Tensid (CTAB) und 40 ml Ammoniak (Katalysator) für 30 Minuten vermengt. Anschließend wurden 80 ml Ethylorthosilikat (TEOS) tröpfchenweise hinzugegeben und bei 45 °C konstanter Temperatur für 12 Stunden kontinuierlich gelöst. Die Carbonfilamente wurden in der Lösung getränkt und anschließend dreimal mit Methanol gewaschen und bei 70 °C getrocknet. Die Verbundkraft im Pull-Out-Versuch ergab eine Erhöhung der rechnerischen Verbundkraft von 0,99 MPa des unbehandelten Filaments auf 3,07 MPa des  $\text{SiO}_2$ -modifizierten Filaments. [Lu18]

Die Temperaturbeständigkeit von mineralisch getränkten Carbonfasersträngen konnte SCHNEIDER mit Temperaturen bis zu 500 °C in Pull-Out-Versuchen bestätigen. Gegenüber polymergetränkten Textilien findet eine deutlich geringere Abnahme der Auszugskraft bei Pull-Out-Versuchen statt [Sch18b]. Polymergetränkten Textilien verzeichneten bereits einen Verbundverlust von 80 % bei Temperaturen von 200 °C. Bei mineralisch getränkten Textilien trat ein Verbundverlust von 65 % erst bei 500 °C ein [Sch18b].

WILHELM untersuchte unterschiedliche Zementsuspensionen mit Mikrosilikafüllstoffen als Tränkungsmaterial für Carbonrovings. Variiert wurde der Wasser-Bindemittelwert (W/B-Wert) der Zementsuspension sowie das Tränkungsverfahren mit und ohne Formgebung. Messungen an Dehnkörperproben in Bezug auf die Rissverteilung bei Raumtemperatur, nach einer temporären Temperierung auf 200 °C, weisen eine Abnahme der Rissanzahl und eine entsprechende Zunahme der Rissbreiten auf. Die mittlere Rissbreite im einaxialen Zugversuch betrug 0,477 mm und die maximale Rissbreite 0,801 mm. Vergleichbare Dehnkörperproben mit der gleichen Tränkungszusammensetzung (W/B-Wert = 0,8) ohne Temperierung weisen Rissbreiten von  $w_{\text{cr,mean}} = 0,163$  mm und  $w_{\text{cr,max.}} = 0,258$  mm bei gleicher Dehnung auf. [Wil21]

Tastversuche zur Temperaturbeständigkeit von mineralisch getränkten Carbonrovings bei 80 °C und 160 °C Prüftemperatur verzeichneten keine signifikanten Zugfestigkeitsverluste und gleichbleibend feine Rissverteilungen bei Dehnkörperproben im einaxialen Zugversuch die auf 80°C temperiert wurden (160 °C Probe ohne Rissvermessung) [Len20].

## 2.5 Zusammenfassung und offene Fragen

Mineralisch getränkte textile Bewehrungen finden in der Praxis noch keine Anwendung und sind in wissenschaftlichen Untersuchungen im Vergleich zu Polymertränkungen unterrepräsentiert. Einige Forschungsergebnisse zeigen jedoch, dass mineralische Tränkungen durchaus für den Einsatz von rissüberbrückenden Instandsetzungssystemen geeignet sein können, da eine feine Rissverteilung in Dehnkörperversuchen nachgewiesen werden konnte [Dvo16, Len20, Wil21]. Des Weiteren zeigen Untersuchungen, dass mineralische Textilbetonsysteme in Bezug auf die Temperaturbeständigkeit, insbesondere bei hohen Temperaturen bis 500 °C, geringe Verbundfestigkeitsverluste aufweisen [Sch18b, Len20, Wil21]. Gleichwohl scheint es einen negativen Einfluss auf die Rissbildung zu geben [Wil21], der bei polymergetränkten Carbontextilien aber schon bei Temperaturen von 80°C zu verzeichnen ist [Mor20].

Bei mineralischen Tränkungssystemen für textile Bewehrungen sind unterschiedliche Materialien und Applikationsmöglichkeiten untersucht worden [Coh10, Pel15, Dvo16, Nad17, Lu18, Sch17b, Zah20, Wil21]. Einige dieser Methoden, wie z. B. Plasma- oder Säurebehandlung, erfordern einen hohen Vorbehandlungsaufwand und zerstören teilweise die Bewehrungsstruktur. Bei der Nano- oder Mikrosilikaapplikation mittels wasserbasierter Suspension zeigen sich Schwierigkeiten bei der Adhäsion zu Carbonfasern [Pel15]. Des Weiteren ist die Größe der Silikateilchen maßgebend für einen guten inneren Verbund der Filamente sowie einen optimierten äußeren Verbund der Randfilamente zur Feinbetonmatrix [Coh10, Pel15, Dvo16, Nad17]. Untersuchungen zu chemisch gelösten silikatischen Tränkungsmaterialien in Kombination mit technischen Textilien sind bisher nur vereinzelt und mit hohem technischem Aufwand an Einzelfilamenten durchgeführt worden [Lu18].

Zementsuspensionen mit Mikrosilikazusätzen zeigen infolge von unterschiedlich starkem Trocknungsschwinden des Bewehrungselements und der Feinbetonmatrix bei Temperaturbeaufschlagung irreversible Verbundfestigkeitsverluste [Wil21]. Entsprechend treten weniger Risse mit größeren Rissbreite aufgrund des stärkeren Schwindens der Bewehrungszementsuspension in Relation zum Beton bei Temperaturen von über 100 °C auf. Eine Gegenmaßnahme kann ein Tempern auf bis zu 400 °C der Bewehrungselemente und eine Rückführung zur Raumtemperatur und Ausgleichsfeuchte vor der eigentlichen Betonage sein [Wil21].

Die aufgeführten Untersuchungen öffnen einen Handlungsspielraum für Alternativen zu bisherigen mineralischen Tränkungsmaterialien und Methoden. Zu optimieren sind:

- Prozessaufwand zur Tränkung von technischen Textilien
- Verringerung des Einflusses erhöhter Temperaturen auf Verbundverluste und Rissbreiten
- Innerer Filamentverbund und äußerer Verbund zwischen Randfilamenten und Feinbeton

Untersuchungen zur beschleunigten Alterung von Textilbeton mit mineralisch getränkter Bewehrung z. B. durch temperierte Wassereinlagerung sind nicht bekannt. Ebenso sind keine Versuche zur autogenen Selbstheilung von gerissenem Textilbeton mit mineralisch getränkter Bewehrung bekannt.

Für Textilbeton wurden einige standardisierte Prüfverfahren zur Untersuchung der Tragfähigkeit entwickelt (siehe Abschnitt 2.2). Für flächige Instandsetzungssysteme von Wasserbauwerken mit textilbewehrten Mörtel- und Betonschichten besteht mit dem BAW-Merkblatt MITEX auch ein erstes standardisiertes Verfahren für die Überführung in die Praxis (siehe Abschnitt 2.3.3). Untersuchungen in [Mor19, Mor20] zeigten auch die Anwendungsreife von polymergetränkten Carbondtextilien mit zusätzlicher Oberflächenmodifikation durch Quarzsand. Für mineralische Tränkungssysteme gibt es diesbezüglich noch keine Anwendungsuntersuchungen.

Die fehlenden Untersuchungen zu Textilbeton mit mineralischen Tränkungssystemen, eine fehlende einfache Tränkungsapplikation mineralischer Komponenten sowie die offenen Fragen zur Vermeidung negativer Temperatureinflüsse auf die Rissbreiten, motivierten zu den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen. Ziel ist ein einfaches Tränkungssystem mit geringem Tränkungsaufwand und optimalen Rissbreiten im Gebrauchszustand für die flächige Instandsetzung gerissener Bestandsbauwerke mit gegebenenfalls sich bewegenden wasserführenden Rissen zu entwickeln.



### 3 Materialauswahl und Versuchskonzept

#### 3.1 Materialkomponenten

Beim Entwurf des mineralischen Instandsetzungssystems aus Textilbeton lag der Fokus auf einem mineralischen und polymerfreien Tränkungsmaterial, welches einfach zu applizieren ist. Wie in Abschnitt 2.1.3 erläutert, sind etablierte Rezepturen für Feinbetone [Jes10, Sch15a] sowie Textiltränkungen auf Polymerbasis verfügbar [z. B. Sol22, Mor20]. Im Bereich der mineralischen Tränkungsmaterialien findet noch keine industrielle Verarbeitung statt, etablierte Systeme sind nicht bekannt.

Die in dieser Arbeit verwendeten Materialkomponenten setzen sich aus unbehandelten Endlosfasern (Spulenware), mineralischen Tränkungsmaterialien auf Kieselsäureester-Basis sowie Feinbeton-Fertigmischungen zusammen. Die Materialparameter sind im Bereich der unbehandelten Endlosfasern sowie des Feinbetons wenig variiert worden, um die Wirkungsweise der Tränkungsmaterialien zu untersuchen und miteinander vergleichen zu können.

##### 3.1.1 Technische Textilien – AR-Glas, Basalt und Carbon

Im Rahmen dieser Arbeit wurden technische Textilien in Form von Rovings aus AR-Glas, Basalt und Carbon untersucht, wobei der Schwerpunkt der Untersuchungen auf Carbonrovings liegt. Der AR-Glasroving stammt von der Firma Vetrotex und weist eine Feinheit von 2400 tex auf. Der Basaltroving MeltRock<sup>®</sup>, vertrieben über die Firma CBG Composites GmbH, weist eine Feinheit von 1200 tex auf. Carbonrovings wurden von den Firmen SGL Carbon SE sowie der Tejin Carbon Europe GmbH verwendet, je nach Anwendungsfall mit unterschiedlichen Feinheiten. Tabelle 3-1 enthält eine Übersicht über alle verwendeten Rovings.

Tabelle 3-1: Eigenschaften der verwendeten Rovings

Bezeichnung	Kürzel	Feinheit [tex]	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Querschnitt [mm <sup>2</sup> ]	Schlichte [-]	Festigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Quelle -
Vetrotex P185- EC-14-2400	AR-Glas	2400	2,6	0,92	Silan	3952 <sup>*1</sup>	[RuG22]
Basalt-Roving B13-1200	Basalt	1200	2,6 - 2,8	0,44	EP	3200 <sup>*1</sup>	[Mel22]
Sigrafil <sup>®</sup> CT50- 4.4/255-E100	SGL50K	3450	1,80	1,92	EP	4400 <sup>*2</sup>	[SGL19]
Tenax <sup>®</sup> -E STS40 F13 24K	TJ24K F13	1600	1,78	0,90	PU	4400 <sup>*2</sup>	[Tej22]

<sup>\*1</sup> keine Angabe zur Prüfmethode (Filamentzugfestigkeit), <sup>\*2</sup> Garn.-/Rovingzugfestigkeit

### 3.1.2 Tränkungsmaterial – Kieselsäureester

Kieselsäureester (KSE) sind die Basis für Steinfestiger, die vorwiegend in der Natursteinkonservierung verwendet werden. Natursteine mit witterungsbedingten Bindemittelverlusten, die zur Zerstörung der strukturellen Festigkeit von Steinsubstanzen führen, werden mit KSE-Produkten gefestigt [Bra20]. Kieselsäureester sind das Reaktionsprodukt aus Orthokieselsäure  $\text{Si}(\text{OH})_4$  und Ethylalkohol  $\text{CH}_3\text{H}_2\text{-OH}$ . Ester bezeichnen im Allgemeinen eine Gruppe von chemischen Verbindungen, die aus der Reaktion von Alkoholen mit anorganischen oder organischen Säuren entstehen. Kieselsäuren werden unter Zusatz von Alkohol aus Siliciumtetrachlorid (TEOS) gewonnen, welches aus dem in Quarzsand enthaltenen Silicium hergestellt wird [Bra20, Bos07].

Mit Wasser als Katalysator geht Kieselsäureester durch Hydrolyse über eine Rückreaktion zu Orthokieselsäure und Ethylalkohol zurück [Snet20]. Parallel zur Hydrolyse verflüchtigt der Alkohol und die instabile Orthokieselsäure geht durch Polykondensationsreaktion zu wasserhaltigem amorphem  $\text{SiO}_2$ -Kieselgel über [Snet20]. In der Natursteinkonservierung wird Kieselgel für eine festigende Porenraumauffüllung eingesetzt. Als Gel wird die kolloidale Mischung der Feststoffe mit dem verbliebenen Wasser bezeichnet. Durch fortschreitende Verdunstung des Wassers versprödet das Material und es entstehen Risse, die unerwünscht sind [Snet20]. In Bezug auf die Textiltränkung nimmt die Neigung zur Rissbildung Einfluss auf die Wahl der textilen Bewehrung, da eine geschlossene Schutzschicht der Fasern durch die Tränkung mit Kieselsäureester nicht als gegeben vorausgesetzt werden kann. Alkaliempfindliche Bewehrungsmaterialien, wie Glas- oder Basaltfasern, könnten somit eine nicht ausreichende Schutzschicht aufweisen.

Unter den marktüblichen Kieselsäureester zur Steinfestigung finden sich Produkte mit einer Gelbildung von circa 10 bis 50 % in Bezug auf das Ausgangsmaterial, mit und ohne hydrophobierende Wirkung. Der Anteil der Gelbildung, auch als Gelabscheidungsrate bezeichnet, ergibt sich aus der Molekülzusammensetzung und kann durch Lösemittel verringert oder durch gezielte partielle Hydrolyse erhöht werden [Snet20]. Bei reiner Kieselsäure in vorwiegend monomerer Molekülstruktur wird eine Gelabscheidung von circa 29 % erreicht [Bos07].

In der vorliegenden Arbeit wurden die Produkte KSE 100, KSE 300 und KSE 500E der Firma Remmers GmbH verwendet. Des Weiteren wurde für diese Arbeit eine Variante KSE 100 ohne Lösemittel (KSE 100 o. L.) hergestellt. Die Tränkungsmaterialien werden in verarbeitungsfertigen Fünf-Liter-Gebinden geliefert. Nach Anbruch der Gebinde sind diese nicht dauerhaft lagerungsfähig, da durch die eintretende Luftfeuchtigkeit bereits eine Reaktion der KSE einsetzt. Den technischen Merkblättern ist die Lagerungs- und Haltbarkeitsempfehlung zu entnehmen, dass die Steinfestiger-Produkte nach Anbruch schnellstmöglich zu verarbeiten sind [KSE300]. Bei den Textiltränkungen wurde das Tränkungsmaterial insbesondere bei der Zweifachtränkung vier bis sechs Wochen nach Erstanbruch der Gebinde genutzt. Eine Veränderung der Produkteigenschaften konnte in dem benannten Zeitraum nicht festgestellt werden. Nach circa drei Monaten reagierte insbesondere das Produkt KSE 100 ohne Lösemittel bei zweimaligem Auftrag nicht mehr vollständig aus. Entnahmemenge, Luftfeuchtigkeit und Dichtheit des geöffneten Gebindes beeinflussen die Haltbarkeit und sind bei der Verarbeitung zu berücksichtigen. Eine Übersicht der unterschiedlichen Eigenschaften der verwendeten KSE-Produkte ist in Tabelle 3-2 zusammengefasst.

Tabelle 3-2: Eigenschaften unterschiedlicher Steinfestiger auf Kieselsäureester-Basis

Bezeichnung	Gelabscheidung (Datenblatt)* <sup>1a</sup>	Gelabscheidung (Messwert)* <sup>2</sup>	Weitere Eigenschaften
KSE 100	~ 10 %	~ 10 %	lösemittelhaltig, verdünnt, vorwiegend monomere Moleküle
KSE 300	~ 30 %	~ 22 %	lösemittelfrei, monomere Moleküle mit geringem Anteil mehrkettiger Moleküle
KSE 500E	~ 50 %	~ 48 %	lösemittelhaltig, mehrkettige Moleküle + Elastifizierer
KSE 100 o. L.	~ 42 %* <sup>1b</sup>	~ 44 %	lösemittelfrei, mehrkettige Moleküle mit geringem Anteil monomerer Moleküle

\*<sup>1a</sup> [KSE100, KSE 300, KSE 500E], \*<sup>1b</sup> kein Datenblatt, laut Hersteller vergleichbar zu [KSE510]  
\*<sup>2</sup> Gemessen über Gewichtsverlust am getränkten Roving in Petrischalen bei r. F. von 40 bis 80 % und in Petrischalen ohne Roving unter Raumluftbedingungen bei einer r. F. von ~ 50 ± 10 %

Die Materialauswahl beschränkte sich zunächst auf die marktüblichen Produkte KSE 100, KSE 300 und KSE 500E aufgrund der unterschiedlichen Gelabscheidungen. In ersten Versuchsreihen an Dehnkörperproben zeichnete sich das Material KSE 100 als zielführend in Bezug auf Rissbreiten und Zugtragverhalten heraus, wie in [Len20] beschrieben. Die Versuchsmatrix wurde durch die Variante mit lösemittelfreiem KSE 100 o. L. ergänzt, da sich einerseits Schwierigkeiten bei der Reproduzierbarkeit mit der KSE 100-Tränkung darstellten und andererseits eine lösemittelfreie Verarbeitung für eine mögliche industrielle Fertigung angestrebt wird.

Die Angaben in Tabelle 3-2 zur gemessenen Gelabscheidungsrate der verwendeten KSE-Produkte wurde in Petrischalen mit und ohne getränkten Carbonrovings durchgeführt. Gemessen wurde der Masseverlust über 28 Tage, aus dem die Gelabscheidung berechnet wurde. Es zeigte sich eine gute Übereinstimmung der Messergebnisse der beiden Untersuchungen. Eine weitere Versuchsreihe mit getränkten Rovings in Petrischalen, die bei 60 % r. F. im Klimaschrank untersucht wurden, wies nach fünfmonatiger Lagerung einen weiteren Masseverlust gegenüber den Proben mit 28-tägiger Lagerung auf. Dies wirkt sich auf die ermittelte Gelabscheidung aus und macht je nach Kieselsäureester zwei bis fünf Masseprozent aus. Der fortwährende Masseverlust geht auf eine noch nicht vollständige Hydrolyse der KSE und nicht verdampftes Ethanol oder Lösemittel zurück. BOOS konnte dies mittels Kernspinresonanzspektroskopie (nuclear magnetic resonance - NMR) an den Kondensationsprodukten unterschiedlicher Steinfestiger, die auch in Petrischalen ausreagierten, feststellen [Bos98]. Da es sich bei dem fortwährenden Masseverlust um Wasser, Ethanol oder andere Lösemittel handelt, ist nicht davon auszugehen, dass die Grundstruktur des Kieselgels nach so kurzer Zeit geschwächt wird. Eine strukturelle Änderung der Reaktionsprodukte findet erst über einen Zeitraum von mehreren Jahren statt, sodass zum Beispiel aus grobscherbigem, elastischem Kieselgel kleinscherbiges, glasartiges und sprödes Material wird [Bos98].

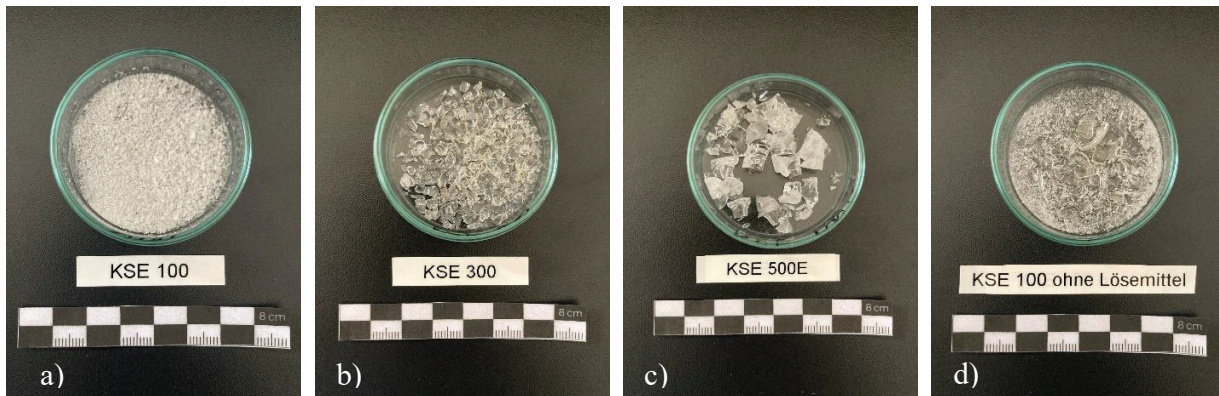


Bild 3-1: Ausreagierte Kieselsäureester a) KSE 100, b) KSE 300, c) KSE 500E, d) KSE 100 o. L.

Bild 3-1 zeigt in Petrischalen ausreagierte Kieselsäureester der Produkte KSE 100, KSE 300, KSE 500E und KSE 100 ohne Lösemittel. Die Reaktionsprodukte zeigen die Auswirkung der molekularen Zusammensetzung der Kieselsäureester sowie die Auswirkungen von zusätzlichem Lösemittel (KSE 100) oder Zusätzen, die die Hydrolyse steuern bzw. die Elastizität der Produkte beeinflussen (KSE 500E). Das Kieselgel aus KSE 100 weist eine sehr kleinscherbige, fast pulverartige Struktur auf und ist weißlich-trüb. KSE 300 ist im ausreagierten Zustand transparent, glasartig, spröde und weist eine mittlere Scherbenstruktur auf. KSE 500E Kieselgel ist weniger transparent als KSE 300. Durch den elastifizierenden Zusatz wirkt es wie ein Kunststoff (z. B. Acrylglas) und zeigt vom Scherbenbild einen Bruch wie Einscheibensicherheitsglas. Der sogenannte Elastifizierer führt zu weniger spröden, überbrückenden Gelstrukturen. KSE 100 ohne Lösemittel vereint im ausreagierten Zustand die Eigenschaften von KSE 100 und KSE 300. Es weist kleine bis mittlere glasartige Reaktionsprodukte auf, die aufgrund ihrer Sprödeheit unter mechanischer Einwirkung zu einer pulverartigen Struktur übergehen. Das Kieselgel zeigt gegenüber KSE 300 eine geringere Strukturfestigkeit auf. Insbesondere beim lösemittelhaltigen KSE 100 war eine Filmbildung an der Oberfläche zu beobachten, wodurch das restliche Material schlechter ausreagieren konnte und die Reaktionszeit insgesamt am längsten dauerte.

Das Ausreagieren von Kieselsäureester-Produkten in Petrischalen ist nicht zwingend mit der Reaktion im Naturstein gleichzusetzen [Bos98] oder wie im Rahmen dieser Arbeit mit der Reaktion am getränkten Roving. Auch die applizierte Menge der KSE-Ausgangsprodukte in den Petrischalen zeigt einen Einfluss auf die Film- und Scherbenbildung des Reaktionsproduktes. Spannungsbrüche im Kieselgel und Schüsselungen durch den einseitigen Kontakt mit der Luftfeuchte von oben und mögliche Filmbildungen an der Oberfläche sind weitere Einflussfaktoren bei dieser Art der Untersuchung. Die unterschiedlichen Ausprägungen der Reaktionsprodukte lassen sich auch am Roving beobachten, sodass getränkte Rovings mit KSE 100 weniger steif sind. Getränkte Rovings mit KSE 300 und KSE 500E neigen bei einmaliger Tränkung stärker zu einer runden Form des Rovingquerschnitts im ausreagierten Zustand.

### 3.1.3 Feinbetone

Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit sind Feinbetonmischungen der Firma Pagel Spezial-Beton GmbH & Co. KG verwendet worden. Das Produkt Pagel TF10 Textilfeinbeton ist ein Betonersatz gemäß DIN EN 1504-3 *Betonersatz für die statisch und nicht statisch relevante Instandsetzung* und wurde aus Ergebnissen des SFB 528 speziell für den Einsatz von Textilbeton entwickelt (siehe Abschnitt 2.1.1) [Pag22a]. Des Weiteren wurden die Trinkwassermörtel Pagel TW10 und TW20, welche eine Zulassung für den Einsatz im Trinkwasserbereich haben, verwendet [Pag22b]. Die Nummerierung im Produktkürzel steht für das verwendete Größtkorn von einem bzw. zwei Millimeter. Tabelle 3-3 enthält Materialeigenschaften und ausgewählte Festbetoneigenschaften nach 28 Tagen zu den verwendeten Feinbetonen.

Tabelle 3-3: Eigenschaften der verwendeten Feinbetone

Bezeichnung	TF10	TW10	TW20	Einheit
Korngröße	0 - 1	0 - 1	0 - 2	[mm]
Schichtdicke	3 - 30	5 - 10	10 - 30	[Mm]
Wassermenge	max. 13	max. 13	max. 14	[%]
Druckfestigkeit 28d Datenblatt / Messwert* <sup>1</sup>	$\geq 55 / 92,6 \pm 6,4$	$\geq 55 / 79,1 \pm 1,2$	$\geq 55 / 79,78 \pm 1,3$	[N/mm <sup>2</sup> ]
Biegezugfestigkeit 28d Datenblatt / Messwert* <sup>1</sup>	$\geq 8 / 11,8 \pm 1,8$	k. A. / $12,5 \pm 0,8$	k. A. / $11,3 \pm 0,4$	[N/mm <sup>2</sup> ]
E-Modul (statisch)	$\geq 25.000$	$\geq 20.000$	$\geq 20.000$	[N/mm <sup>2</sup> ]

Angaben entnommen aus technischen Datenblättern Fa. Pagel [Pag22a, Pag22b]

k. A. = keine Angabe im Datenblatt

\*<sup>1</sup> Messwerte ermittelt in Anlehnung an DIN EN 196-1

## 3.2 Herstellungsverfahren

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Tränkungsmaterialien auf Kieselsäureester-Basis untersucht. Die Textiltränkung erfolgte händisch in einer eigens dafür entwickelten Tränkungsapparatur. Der Prozess der einfachen sowie zweifachen Textiltränkung wird im folgenden Abschnitt 3.2.1 erläutert. Des Weiteren wurden Dehnkörperproben aus Textilbeton in speziell entwickelten Schalungen hergestellt, die für die händisch getränkten textilen Bewehrungselemente konstruiert wurden. Die Herstellung der Dehnkörperproben wird in Abschnitt 3.2.2 erläutert. Des Weiteren wurden Untersuchungen zur Textilzugspannung am Faserstrang durchgeführt, deren Herstellung in Abschnitt 3.2.3 erläutert wird.

### 3.2.1 Textiltränkung

Die Textiltränkung erfolgte in einem Drei-Walzen-Foulard, wie in [Len20] veröffentlicht, vergleichbar zu der Anlage in [Sch18a, Wil21]. Dem Drei-Walzen-Foulard sind Umlenkrollen zur Führung der Endlosfasern vor- und nachgeschaltet, um eine gleichmäßige und schonende Verarbeitung zu gewährleisten. Die Walzen bestehen aus ethanolbeständigen Gummirollen, sodass die Endlosfasern über einen leicht flexiblen Untergrund geführt werden. Zugspannungen im Textil, die durch den Tränkungsprozess auftreten könnten, werden von den elastischen Rollen abgefedert. Des Weiteren wird durch die Gummibeschichtung ein Durchrutschen der Endlosfasern unterbunden, wodurch ein gleichmäßiger Tränkungsaufrag erfolgen kann. Der getränkte Textilstrang wurde über eine Abtropfrolle aus weicherem Schaumstoff und einer weiteren Umlenkrolle einem drehbaren Propellerrahmen zugeführt. Bild 3-2 zeigt die Tränkungsanlage mit Umlenkrollen und Drei-Walzen-Foulard.

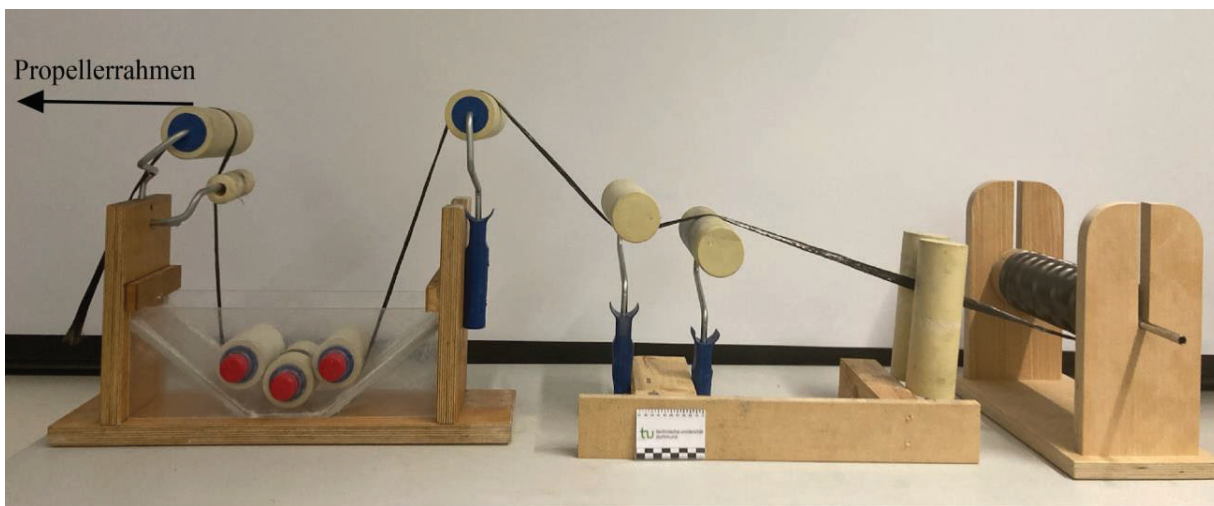


Bild 3-2: Tränkungsanlage mit Drei-Walzen-Foulard und Umlenkrollen

Auf dem Propellerrahmen wurden die getränkten Endlosfasern nebeneinander aufgewickelt, sodass eine luftumspülte Trocknung für das Ausreagieren der Kieselsäureester mit der Luftfeuchtigkeit ermöglicht wurde (Bild 3-3a)). Die Reaktion mit der Luftfeuchtigkeit ist für das Ausreagieren des Kieselgels ausreichend. Im Vergleich zu einer Reaktion im Naturstein, reagiert das Material am Roving schneller und gleichmäßiger aus. Der Trocknungsrahmen wurde so konstruiert, dass die Länge der getränkten Textilien das Maß der Dehnkörperproben übersteigt, um Einflüsse der Kontaktfläche von Textil und dem Propellerrahmen (siehe Detail 1 in Bild 3-3) zu verhindern.

Die Lagerung erfolgte bei einer Raumtemperatur von  $20\text{ °C} (\pm 2\text{ °C})$  und einer relativen Luftfeuchtigkeit von  $50\% (\pm 10\%)$ . Zur Auswirkung der relativen Luftfeuchtigkeit auf die Gelabscheidungsrate werden später Untersuchungsergebnisse diskutiert (Abschnitt 5.1.1). Die Querschnittsform der getränkten Rovings ergibt sich aus einer natürlichen Verformung durch die Tränkung und Aufwicklung auf dem Propellerrahmen. Die geringe Viskosität und hohe Kapillarität der Faserbündel führen zu einem Zusammenziehen der Rovings. Die flachen Endlosfasern mit einer Breite von circa 18 mm erhalten durch die Tränkung eine ovalere Form. Eine Formgebung mittels runder

Düse erwies sich nicht als zielführend, wie spätere Untersuchungen zum Rovingquerschnitt zeigen (Abschnitt 5.1.2). Das ausreagierte Kieselgel führt bei der textilen Bewehrung dazu, dass die flexiblen Endlosfasern eine steife Struktur bekommen.

Nach einer Reaktionszeit von 28 Tagen nach der ersten Tränkung wurden die Carbonendlosfasern vom Propellerrahmen auf eine Spule aufgerollt. Das ausreagierte Kieselgel bricht auf. Die durch die Tränkung ausgesteiften Fasern erhalten partiell eine Flexibilität zurück. Die aufgerollten einfach getränkten Carbonendlosfasern werden wie im ersten Tränkungsprozess erneut durch den Drei-Walzen-Foulard geführt. Durch das Aufrollen und Aufbrechen der ersten Tränkung wird das Fasergefüge gelockert und es entsteht eine größere Querschnittsfläche sowie eine größere Länge des Umfangs der Carbonrovings. Das Aufrollen erzeugt Knickstellen (Details 2 in Bild 3-3 b)), die textile Struktur bleibt aber nahezu vollständig intakt. Bild 3-3 zeigt den Propellerrahmen, die einfach getränkten Carbonendlosfasern im aufgerollten Zustand mit Knickstellen sowie die Rovings nach zweifacher Tränkung.



Bild 3-3: a) Propellerrahmen, b) Aufgerollte einfach getränkte Carbonendlosfasern, c) Aufweitung durch Propellerrahmen (1) und geglättete Knickstellen (2) nach zweiter Tränkung

Beim Aufwickeln nach der zweiten Tränkung auf dem Propellerrahmen wurde darauf geachtet, dass die Carbonrovings an derselben Stelle um den Propellerrahmen gewickelt werden wie bei der ersten Tränkung. Durch die erste Tränkung und das Aufwickeln auf dem Propellerrahmen entstehen an den Wendepunkten Aufweitungen im Faserquerschnitt, die auch durch eine zweite Tränkung bestehen bleiben (Bild 3-3 Detail 1). Diese Aufweitungen sollten beim Zuschchnitt der textilen Bewehrung als Verschnitt entfallen. Die „Knickstellen“, die durch das Aufrollen zwischen erster und zweiter Tränkung entstehen (Bild 3-3 b) Detail 2), werden beim zweiten Tränkungsprozess geglättet. Es bleibt nur eine geringe Veränderung des Fasergefüges bestehen, wie Bild 3-3 c) Detail 2 zu entnehmen ist. Die zweifach getränkten Carbonendlosfasern lagerten erneut 28 Tage luftumspült auf dem Rahmen, damit das Kieselgel ausreagieren konnte. Durch die erneute Tränkung erhielten die Rovings wieder eine steife Struktur. Eine Zerstörung des Filamentgefüges findet nur in

geringstem Maße statt, da durch das Aufrollen nur die erste ausreagierte Tränkungs-schicht gebrochen wird und das Filamentgefüge insgesamt gelockert wird. Es konnten nur vereinzelte Brüche von Filamenten beobachtet werden. Diese Filamentbrüche fanden vor allem in dem Bereich der Rovings statt, die beim Aufwickeln am Propellerrahmen anliegen (Bild 3-3 Detail 1) und somit als Verschnitt entfallen. In Tabelle 3-4 sind die Tränkungsabläufe, Lagerungszeiten und Klimarandbedingungen zusammengefasst. Die Reaktionszeit von 28 Tagen wurde auf Basis von KSE 100 gewählt, da der Lösemittelzusatz zu einem langsamen Ausreagieren führt [KSE100]. Bei den anderen Tränkungs-materialen könnte auch eine kürzere Lagerungszeit gewählt werden.

Tabelle 3-4: Tränkungsablauf, Lagerungszeiten und Klimarandbedingungen

Arbeitsschritt	Material	Lagerungszeit <sup>*1</sup>	Klimarandbedingung
1. Tränkung	Endlosfasern Spulensware	28 Tage auf Propellerrahmen	20 ± 3 °C 50 % r. F. ± 10 %
Aufrollen auf Spule <sup>*2</sup>	Einfach getränkte Endlosfasern	-	-
2. Tränkung <sup>*2</sup>	Aufgerollte einfach getränkte Endlosfasern	28 Tage auf Propellerrahmen	20 ± 3 °C 50 % r. F. ± 10 %

<sup>\*1</sup> 28 Tage Reaktionszeit auf Basis des KSE 100 Datenblatts [KSE100]

<sup>\*2</sup> Die Arbeitsschritte „Aufrollen“ und „2. Tränkung“ erfolgten nur für zweifachgetränkte Rovings (x2)

Für die Untersuchungen von Dehnkörperproben und Rissüberbrückungsprobekörpern mit Textilgelegen (Abschnitt 6.1.3 und 6.2.2) wurden Gelege händisch hergestellt. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Zugversuche erfolgten immer mit einaxialer Zugbeanspruchung, sodass für die erzeugten Gelege in Schussrichtung Rovings mit geringerem Textilquerschnitt verwendet wurden. In Kettrichtung wurden SGL Sigrafil<sup>®</sup> C T50-4.4/255-E100 Rovings verwendet. Die Schussrichtung wurde mit Tenax<sup>®</sup>-E STS40 F13 24K Rovings hergestellt. Die Textilgelege wurden händisch mit einem Klebstoff auf Polyvinylacetat-Basis an den Knotenpunkten von Schuss- und Kettroving verklebt. Die Rovings zur Herstellung der Gelegestrukturen wurden zuvor nach dem beschriebenen Verfahren getränkt.

### 3.2.2 Dehnkörperproben

Die Herstellung der Dehnkörperproben aus Textilbeton erfolgte in Kunststoffschalungen, in denen jeweils vier Probekörper gleichzeitig betoniert werden können. Die Schalung wird aus einzelnen Kunststoffteilen über eine Fingerzinkenkonstruktion zusammengesteckt und auf einem Rütteltisch für Mörtelprismen durch Verschraubung fixiert. Die Abmessungen der Schalung ist für Dehnkörperproben von 800 mm Länge, 15 mm Dicke und maximal 70 mm Breite ausgelegt. Die seitlichen vertikalen Abstandshalter (blaue Fingerzinken an den Kopfen in Bild 3-4) ermöglichen den Einbau in vier Lagen von jeweils zwei Rovings. Der Achsabstand der Rovings ist gleichmäßig auf die Breite der Probekörper verteilt. Die getränkten Rovings werden vor der Betonage auf einer



Seite um einen Bolzen geschlauft und auf der anderen Seite mittels Zugfedern fixiert. Die Zugfedern erzeugen keine signifikante Vorspannung, führen aber zu einer Lagestabilität der Rovings während der Betonage und verhindern einen ungewollten Kontakt mit dem Trennmittel der Schalwände. Bild 3-4 zeigt eine zusammengesteckte Kunststoffschalung mit Carbonrovings auf dem Rütteltisch.



Bild 3-4: Kunststoffschalung mit getränkten Carbonrovings auf Rütteltisch befestigt

Das Anmischen des Feinbetons erfolgte unter Berücksichtigung der Mischzeiten mit der maximal zulässigen Wassermenge (Tabelle 3-3). Die Betonage erfolgte unter kontinuierlichem, hochfrequentem Rütteln vergleichbar mit der Herstellung von Mörtelprismen nach DIN EN 196-1. Die Zugabe des Feinbetons erfolgte über die Randbereiche der Schalung, wodurch dieser gleichmäßig durch die Schalung fließen konnte und die Lagesicherheit der Rovings gewährleistet blieb. Obwohl die Einbauhöhe des Feinbetons von 70 mm über der Herstellerangabe zur Schichtdicke von 30 mm lag, konnte ein Entmischen nicht festgestellt werden [Pag22]. Auch zeigten sich aufgrund des seitlichen Einbringens des Feinbetons keine erhöhten Luftporeninhalte infolge der größeren Einbauhöhe. Durch die stehende Betonage über die schmale Längsseite konnte ein flächiges Schüsseln der Probekörper unterbunden werden. Die maximale Lagerungszeit der Fertigmischungen beträgt zwölf Monate. Bei immer gleicher (maximaler) Wasserzugabe ist zu beobachten, dass die Fließfähigkeit des Feinbetons über die Dauer der Lagerungszeit abnimmt.

Die Probekörper wurden für circa 24 Stunden gegen Austrocknen geschützt gelagert, anschließend ausgeschalt und im Wasserbad für mindestens sechs Tage gelagert. Entsprechend der weiteren Nachbehandlung verblieben die Probekörper im Wasserbad oder wurden bei 20 °C und 65 % relative Luftfeuchtigkeit im Klimaschrank gelagert. Die Prüfung erfolgte in der Regel nach insgesamt 28 Tagen. Probekörperserien zur Untersuchung des Langzeitverhaltens wurden entsprechend weiter konditioniert.

### 3.2.3 Faserstrangzugproben

Für die Untersuchung des Zugtragverhaltens der textilen Bewehrung wurden Probekörper für den Faserstrangzugversuch in Anlehnung an [Rem18] vorbereitet. Es wurden ungetränkte sowie getränkte Rovings untersucht. Die untersuchten Probekörper wiesen eine Länge von insgesamt 470 mm auf. An den jeweiligen Enden der Faserstränge erfolgte eine Verklebung mit einem Zweikomponenten-Epoxidharz und zwei Pappstreifen (20 x 75 mm). Zwischen die mit Klebemittel bestrichenen 1,5 mm dicken Pappstreifen wurden die Rovings mittig eingelegt und unter leichtem Anpressdruck für 24 Stunden zur Aushärtung gelagert. Bild 3-5 zeigt eine Faserstrangzugprobe mit verklebten Verankerungsbereichen. Die geklebten Proben mit einer freien Messlänge von 320 mm wurden im Faserstrangzugversuch mittels Keilschraubspannzeug geprüft.

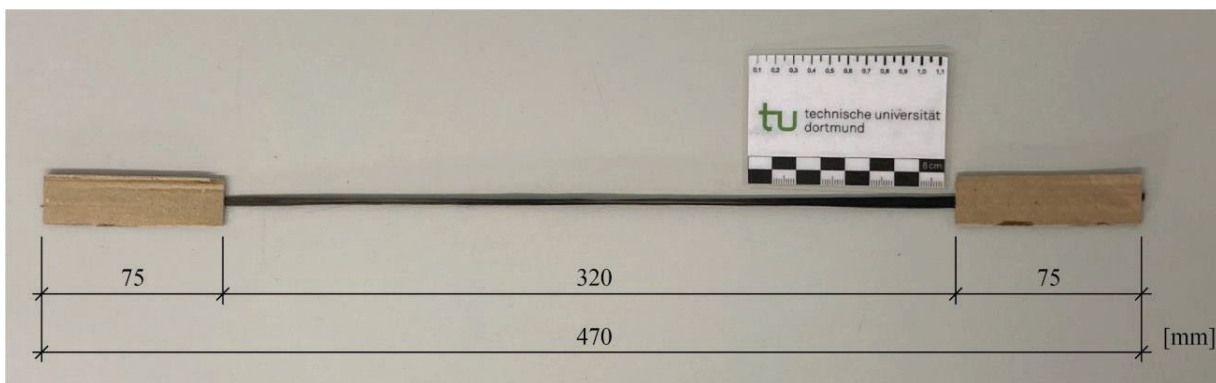


Bild 3-5: Faserstrangzugprobe mit geklebten Lasteinleitungsbereichen

## 3.3 Versuchsaufbauten und Durchführung

Um die Wirkungsweise mineralisch getränkter Textilbewehrung für den Einsatz im Instandsetzungsbereich von gerissenen Bauwerken zu ermitteln, wurden unterschiedliche Zugversuche am Textil sowie an Dehnkörperproben durchgeführt.

### 3.3.1 Durchführung einaxialer Zugversuche an Dehnkörperproben

Die einaxialen Zugversuche zum Zugtragverhalten von Dehnkörperproben wurden entsprechend den Prüfeempfehlungen nach [Sch18a] konzipiert. Die Durchführung erfolgte in einer Universalprüfmaschine Inspekt 100 kN der Firma Hegewald & Peschke. Mit einem Lastbereich von 100 kN und einer Kraftmessdose bis 50 kN können die zu erwartenden Zuglasten der Dehnkörperproben mit der Zugprüfmaschine abgebildet werden. Die Auflösung des Traversenmessbereichs mit  $< 0,002 \mu\text{m}$  erlaubt eine genaue Wegsteuerung zur Lasteinleitung. Den Herstellerangaben ist zu entnehmen, dass die empfohlene Genauigkeitsklasse 1 nach [Sch18a] eingehalten wird [H&P22].

Bild 3-6 zeigt den schematischen Aufbau der Probekörpereinspannung und ein Foto der Einbausituation in die Zugprüfmaschine. Die Lasteinleitung erfolgte jeweils an den Probekörperenden über Klemmung zwischen 250 mm langen Stahlplatten. Die Stahlplatten wurden mit Querfräsungen versehen, sodass über Ausgleichslagen aus Furniersperrholz (4 mm) unter Querpressung kraft- und

formschlüssig eine Lastübertragung in die Probekörper erfolgte. Der Reibungsverbund zwischen den schalglatten Probekörperoberflächen und dem Furniersperrholz war ohne Vorbehandlung ausreichend, sodass auch unter hoher Zugbeanspruchung ( $> 30 \text{ kN}$ ) kein Herausrutschen der Probekörper beobachtet werden konnte. Drei Querriegel mit je zwei Schraubverbindungen erzeugten die Spannkraft auf den Klemmbereich der Dehnkörperproben zwischen den Stahlplatten. Das Erzeugen der Spannkraft erfolgte über einen Drehmoment-Schlüssel mit einer Kraft von  $40 \text{ Nm}$  je Schraubverbindung. Die Wahrung der Drehfreiheitsgrade um die X-, Y-, und Z-Achse zwischen der Klemmvorrichtung und der Prüfmaschinenaufnahme gewährleisteten Kugellagerköpfe.

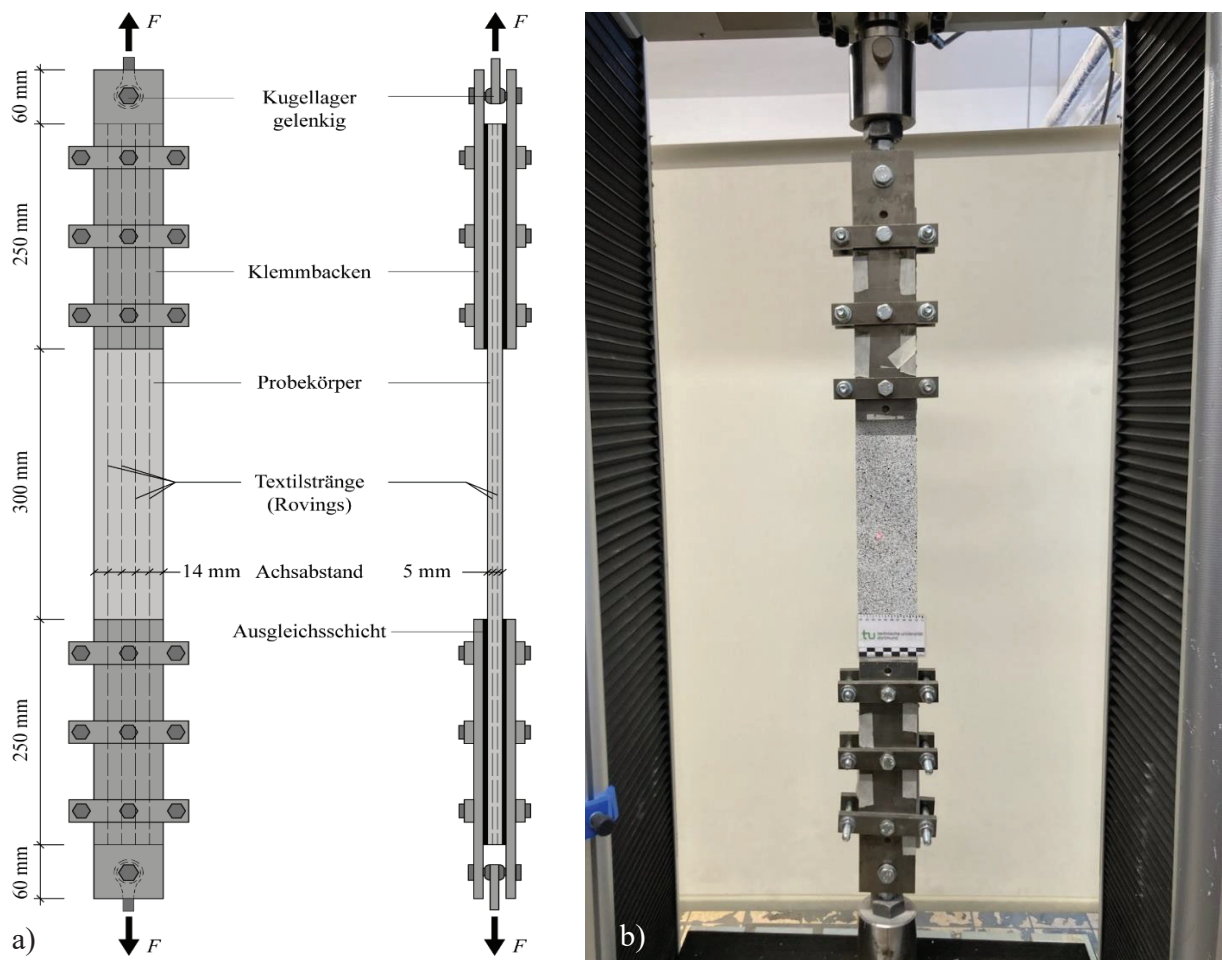


Bild 3-6: a) Schematische Probekörperhalterung, b) Eingebaute Dehnkörperprobe in der Zugprüfmaschine

Zur Sicherstellung des zentrierten Einbaus der Probekörper erfolgte zunächst eine weggesteuerte Lasteinleitung mit einer Geschwindigkeit von  $0,5 \text{ mm/min}$  bis zu einer Vorlast von  $150 \text{ N}$ . Diese Laststufe diente dem Aufnehmen des Referenzbildes für die photogrammetrische Messung (siehe Abschnitt 3.3.2). Anschließend erfolgte die weggesteuerte Laststeigerung mit einer kontinuierlichen Geschwindigkeit von  $1,0 \text{ mm/min}$  bis zum Versagen der Probe. Die resultierende Zugkraft, aufgezeichnet über die Kraftmessdose an der Traverse, wurde an das photogrammetrische Mess-

system übergeben. Mit einer Messrate von einem Hertz erfasste das photogrammetrische Messsystem die den Laststufen entsprechenden Längenänderungen und Verformungen. Zur Überprüfung der photogrammetrisch gemessenen Längenänderungen, die im mittleren Bereich über 200 mm der freien Weglänge von 300 mm abgegriffen wurden, erfolgte bei einer Prüfserie mit acht Proben eine zusätzliche Messung mit induktiven Wegaufnehmern auf der Vorder- und Rückseite der Probekörper. Die Ergebnisse zur Längenänderung der induktiven Wegaufnehmer stimmten im Rahmen der Messgenauigkeit mit den photogrammetrischen Messungen überein, sodass die messtechnische Auswertung nur mittels Photogrammetrie fortgeführt wurde (siehe Anhang A1). Bild 3-7 zeigt eine Dehnkörperprobe mit induktivem Wegaufnehmer und photogrammetrischer Messtechnik.

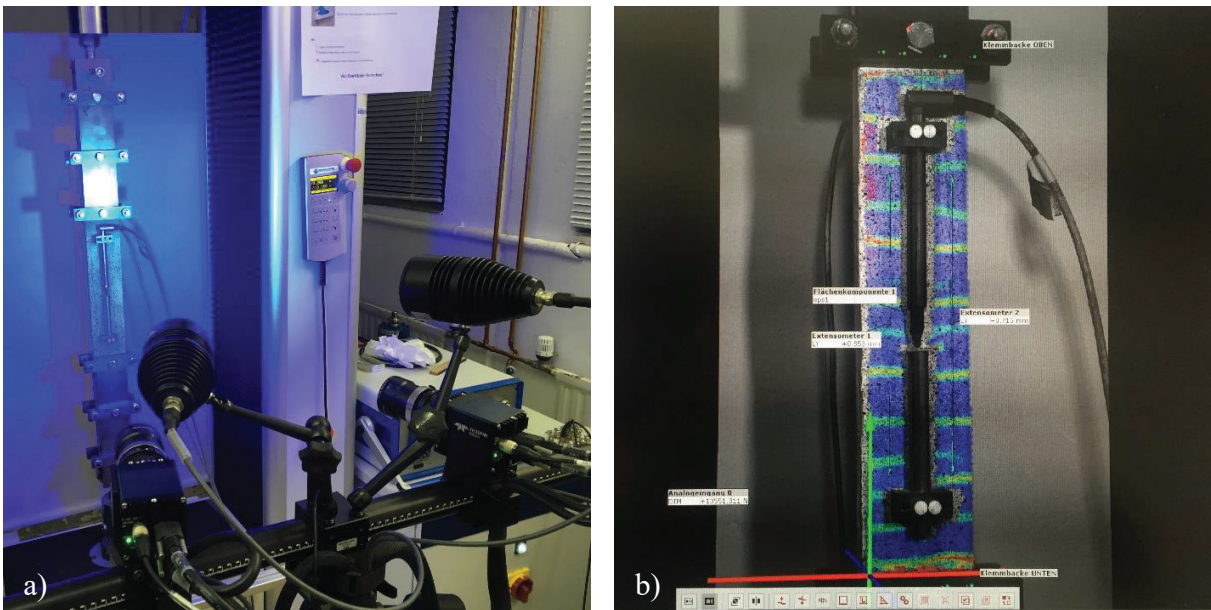


Bild 3-7: a) Probekörper mit induktiven Wegaufnehmern, b) Visualisierung der Dehnung mittels ARAMIS®-Messsystem GOM Correlate Pro (Flächenkomponente mit Hauptformänderung)

Im Zuge der einaxialen Zugversuche sind auch Untersuchungen zum Temperaturverhalten und zur beschleunigten Alterung durch temperierte Wasserlagerung an den Dehnkörperproben durchgeführt worden. Für die Temperaturprüfung wurden die Dehnkörperproben nach 28-tägiger Normlagerung (7 Tage Wasserbad und 21 Tage bei 20 °C und 50 % r. F.) temperiert und bei Erreichen der Zieltemperatur unter anhaltender Temperaturbeaufschlagung geprüft. Die Prüfung erfolgte in einer in die Zugprüfmaschine integrierte Temperaturprüfkammer. Die zu prüfenden Bereiche des Probekörpers befinden sich in der Kammer und die Prüfkörperhalterungen ragen aus der Kammer heraus. Die Tür der Prüfkammer ist mit einer Glasscheibe versehen, sodass eine photogrammetrische Messung möglich ist. Bild 3-8 zeigt die geschlossene Prüfkammer mit eingebauter Probe und die digitale Aufzeichnung mit dem ARAMIS®-Messsystem.

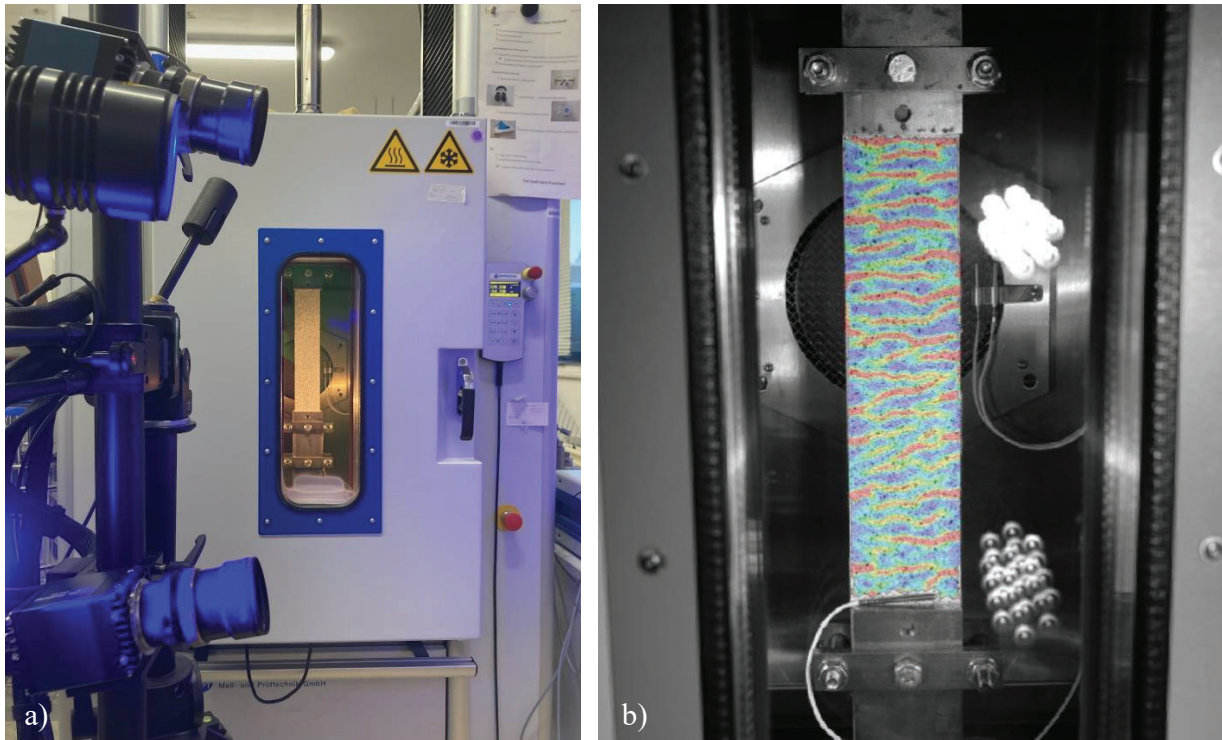


Bild 3-8: a) Temperaturprüfkammer mit ARAMIS®-Messsystem, b) Visualisierung der Dehnung mit GOM Correlate Pro (Flächenkomponente mit Hauptformänderung)

Bisherige Untersuchungen mit einer Prüftemperatur von 80 °C sowie einem Tastversuch bei 160 °C zeigten keine Beeinflussung auf das Zugtragverhalten [Len20], sodass im Rahmen dieser Arbeit die Prüftemperatur auf 160 °C festgelegt wurde. Höhere Temperaturen waren technisch nicht möglich. Um die Versuchsdauer und die Spannkraftverluste in der Klemmvorrichtung bei der Temperierung zu reduzieren, erfolgte eine Vortemperierung der Proben über einen Zeitraum von 45 Minuten auf circa 100 °C im Ofen, bevor die Dehnkörper in der temperierten Probekörperhalterung befestigt wurden. In der Prüfkammer erfolgte vor dem Start der Prüfung über weitere 30 Minuten eine Temperierung auf die Zieltemperatur. Die Probekörpertemperatur wurde an der Oberfläche der Probekörper mittels Infrarotthermometer und Temperaturfühler abgegriffen.

Für die Betrachtung der beschleunigten Alterung wurden normgelagerte Proben in einem temperierten Wasserbad nachbehandelt. Die Lagerung der Proben erfolgte mit demineralisiertem Wasser in einem gedämmten temperierbaren Edelstahlbecken über 100, 1.000, 3.000 bzw. 4.000 Stunden. Vor der Zugprüfung wurden die Probekörper für 24 Stunden unter Raumluftbedingungen bei circa 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte getrocknet.

Im Rahmen der einaxialen Zugversuche wurden Untersuchungen an AR-Glasrovings, Basaltrovings, Carbonrovings und Carbongelegen im getränkten und ungetränkten Zustand sowie unter zusätzlichen Nachbehandlungsparametern durchgeführt. Tabelle 3-5 zeigt eine Übersicht der unterschiedlichen Probekörperbezeichnungen der Prüfserien. Für eine übersichtliche Darstellung wird bei der Bezeichnung der Standardvarianten kein zusätzliches Kürzel aufgeführt. Beispiels-

weise wird bei der Verwendung des Carbonrovings Sigrafil® CT50-4.4/255-E100 kein „SGL“ vorangestellt, da fast alle Prüfserien mit dem SGL Roving untersucht wurden. Für die weiteren Parameter *Anzahl der Tränkung*, *Feinbetonvariation*, *Textilvariation*, *Konditionierung* und *Prüfbedingung* sind bei den Standardvarianten auch keine Kürzel in der Prüfserienbezeichnung aufgeführt. Diese Standardvarianten sind in Tabelle 3-5 mit „ „ gekennzeichnet. Ein Beispiel zur Bezeichnungsstruktur ist am Ende der Tabelle 3-5 aufgeführt.

Tabelle 3-5: Nomenklatur der Prüfserien

Textil	Tränkung	Anzahl Tränkung	Feinbetonvariation	Textilvariation	Konditionierung /Herstellung	Prüfbedingung
<b>Textil</b>						
„ “	Carbonroving SGL Sigrafil® CT50-4.4/255-E100					
TJ-F13	Carbonroving Tenax®-E STS40 F13 24K					
BAS	Basalt-Roving B13-1200					
AR-Glas	Vetrotex P185-EC-14-2400					
<b>Tränkung</b>						
Nat	Keine Tränkung					
KSE 100	Kieselsäureester 100					
KSE 300	Kieselsäureester 300					
KSE 500E	Kieselsäureester 500E					
KSE 100 o. L.	Kieselsäureester 100 ohne Lösungsmittel					
<b>Anzahl Tränkung</b>						
„ “	Einmalige Tränkung					
x2	Zweifache Tränkung					
<b>Feinbetonvariation</b>						
„ “	Pagel Textilfeinbeton TF10					
TW10	Pagel Trinkwassermörtel TW10					
TW20	Pagel Trinkwassermörtel TW20					
<b>Textilvariation</b>						
„ “	Roving					
Gelege	Carbongelege mit SGL Roving in Kettrichtung und TJ-F13 Roving in Schussrichtung Maschenweite 15/18 mm, Knotenpunkte verleimt ohne Nähfaden					
<b>Konditionierung</b>						
„ “	Normlagerung: 1 Tag Schalung, 6 Tage Wasserbad und 21 Tage bei 20 °C / 65 % r. F.					
xxx d-w	Wasserlagerung: 1 Tag Schalung, x Tage Wasserbad und 1 Tag bei 20 °C / 65 % r. F.					
720 d-c	Klimatische Langzeitlagerung bei 20 °C / 65 % r. F.					
xxx h-w	Temperierte Wasserlagerung für x Stunden bei 50°C Wassertemperatur					
<b>Prüfbedingung</b>						
„ “	Keine besonderen Randbedingungen, Prüfung bei Raumtemperatur					
T160	Prüfung im Temperaturofen bei 160 °C					
Beispiel zu einer Prüfserie KSE 100 x2-4000h-w von Dehnkörperproben im Zugversuch: Carbonroving SGL zweifach getränkt mit KSE 100, Pagel TF10, 4000 h Wasserlagerung bei 50 °C						
	KSE 100	x2			4000h-w	

### 3.3.2 Photogrammetrische Messtechnik

Für die Messung von Rissbreiten feiner Risse hat sich die photogrammetrische Messtechnik etabliert, wie die Forschungsarbeiten von HANSL, MORALES oder WILHEM zeigen [Han14, Mor20, Wil21]. Dass konventionelle Messgeräte, wie induktive Wegaufnehmer, zur Erfassung von Verformungen und Längenänderungen von mehrfach gerissenen Probekörpern nicht geeignet sind, beschreibt beispielsweise ORTLEPP [Ort06]. Dies trifft auch auf die individuelle Rissbreitenbetrachtung mehrfach gerissener Probekörper zu.

Photogrammetrie beschreibt eine berührungslose Messmethode, bei der aus Fotografien eines Objektes, durch definierte Messpunkte im Bild, Lage oder Form bestimmt werden können. Entsprechend können durch Lageänderungen auch Verformungen und Längenänderungen erfasst werden. Eine Möglichkeit dieser photogrammetrischen Erfassung ist die digitale Bildkorrelation (digital image correlation – DIC) mit der auch das verwendete optische 3D-Messsystem ARAMIS® 12 M der Firma GOM arbeitet. Voraussetzung für eine dreidimensionale Auswertung mittels digitaler Bildkorrelation ist ein kalibrierter Stereokameraaufbau. Durch die Kalibrierung werden benötigte Informationen, wie die Lage der Kameras im Raum und zum Objekt sowie Modellierparameter, wie Objektivverzeichnungen, bestimmt. Unter diesen Randbedingungen können mittels Bildkorrelation Bildbereiche erkannt werden. Für die Wiedererkennung werden Pixel-Grauwerte der Aufnahmen herangezogen. Da Pixel-Grauwerte in einem Bild mehrfach vorkommen können und Grauwerte einzelner Orte über die Zeit schwanken, werden Bildbereiche aus mehreren Pixeln herangezogen. Diese eindeutigen Pixelbereiche, auch Facetten genannt, werden bei der digitalen Bildkorrelation durch ein stochastisches Muster erzeugt. Das stochastische Muster auf der Prüffläche liefert die Grauwertinformationen, die in einem Kamerabild digital in Facetten unterteilt werden und auf dem zweiten Kamerabild eindeutig wiederzuerkennen sind. Der Abstand und die Größe der Facetten können anwendungsabhängig variiert werden. [GOM18]

Bild 3-9 zeigt die Facettendarstellung mit Pixelüberschneidung und die Wiedererkennung einer verschobenen Facette über zwei Kamerabilder. Die Prüfflächen der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Dehnkörperproben wurden mit der beschriebenen photogrammetrischen Messtechnik mittels digitaler Bildkorrelation untersucht. Erforderliche Vorbereitungen zur Messung, wie Kamerakalibrierung und Einstellungen der Software zur Messdatenerfassung, entsprachen der Herstellerangabe [GOM13].

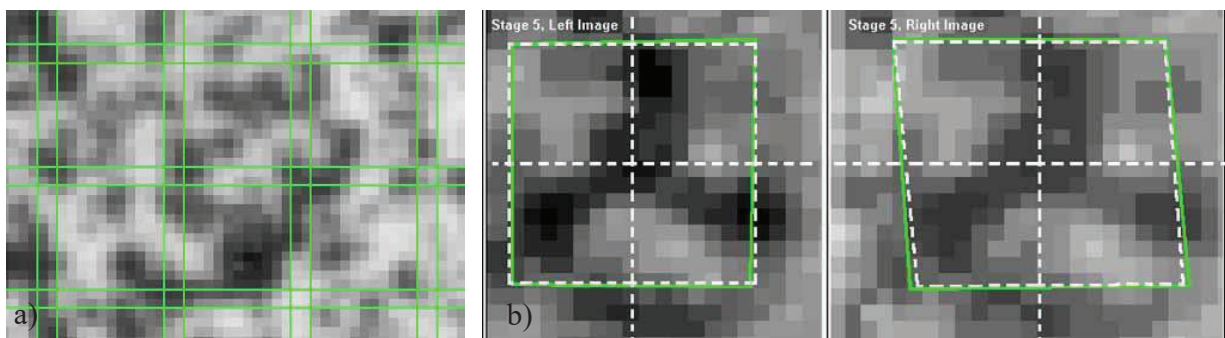


Bild 3-9: a) 15x15 Pixelfacetten mit 2 Pixel Überschneidung, b) linke und rechte Bildaufnahme eines Facettenpaares nach Deformation [Gom13]

Das stochastische Muster auf den Prüfflächen wurde in zwei Schritten aufgetragen. Eine Grundierung mit weiß-mattem Sprühlack ergab einen einheitlichen Untergrund, schwarz-matter Sprühlack erzeugte das stochastische Muster. Für die Untersuchungen in der Temperaturprüfkammer benötigte es temperaturbeständige Lacke. Bei der Herstellung des stochastischen Musters ist auf eine ausreichende Feinheit der einzelnen Farbpartikel zu achten, außerdem werden ausreichend viele Einzelpunkte benötigt. Anderenfalls kann die Erzeugung der Facetten ungenau sein oder es bestehen Löcher im digitalen Abbild der Prüffläche. Bild 3-10 zeigt stochastische Muster von unterschiedlicher Qualität. Die unterschiedlichen Muster enthalten entsprechend detaillierte Grauwertinformationen, die für die Facettenbildung und Zuordnung wichtig sind.

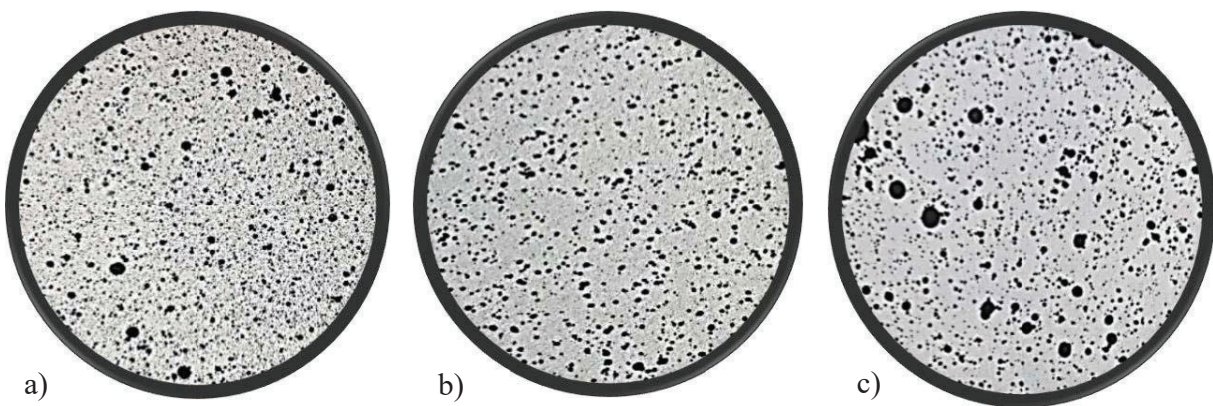


Bild 3-10: Beispielflächen stochastischer Muster, a) Feines Muster, b) Mittleres Muster, c) Grobes Muster [Ull19]

Untersuchungen an der TU Dortmund zu den unterschiedlich feinen stochastischen Mustern haben gezeigt, dass mit einem größeren Muster die Messgenauigkeit abnimmt [Ull19]. Fehlende Informationen für die Facettenbildung führen zu unvollständigen Angaben bei der Rissbreitenmessung. Beispielsweise wird bei der Rissbreitenmessung mittels digitalem Extensometer kein Messwert eingetragen, wenn in einer Messstufe (Aufnahme eines Bildes) eine erzeugte Facette im zweiten Kamerabild nicht erkannt wurde. Dies führt zu unvollständigen Messergebnissen. Insbesondere bei einem groben stochastischen Muster treten solche Ungenauigkeiten auf. Die Kombinationen von grobem Muster und kleinem Messvolumen und von feinem Muster und großem Messvolumen führten zu größeren Messungenauigkeiten. Insgesamt lagen die ermittelten Messungenauigkeiten im Bereich weniger Mikrometer und innerhalb der angegebenen Messschwankung seitens des Messgeräteherstellers [Ull19].

Untersuchungen von HANSL zeigten vergleichbare Ergebnisse, bei denen die ungünstige Kombination aus Messvolumen und Musterqualität zum Teil zu Messungenauigkeiten führten, die die angegebenen Grenzwerte der Firma GOM überschritten [Han14]. Neben der Musterqualität nehmen auch andere Parameter, wie Aufnahmegeschwindigkeit, Belichtungsdauer, Messvolumengröße oder Facettengröße, Einfluss auf die Messgenauigkeit und auf die Fehlertoleranz. Insbeson-



dere zu geringe Facettengrößen führen zu Messfehlern, da Pixel-Grauwerte nicht korrekt zugeordnet werden können. Standardmäßig ist beim verwendeten Messsystem eine Facettengröße von 19x19 Pixel und einer Facetten-Überlappung von drei Pixel verwendet worden.

Des Weiteren weist bei der Messung der Längenänderung die Lage der Facettenpunkte im Bereich der Verformung eines Risses eine Messempfindlichkeit auf. MORALES untersuchte den Rissbereich mit drei auf einer Linie liegenden Facettenpunkten. Zwei der Facettenpunkte lagen im Randbereich der Verformung des Risses und ein Facettenpunkt im unverformten Bereich. Der Vergleich der Längenänderung zwischen den zwei Facetten innerhalb des Verformungsbereichs mit der Längenänderung zwischen einem Facettenpunkt im Verformungsbereich mit einem Facettenpunkt im unverformten Bereich wies einen geringen Unterschied von einem Mikrometer auf [Mor20]. Die Bestimmung des Rissrandbereiches kann auch zu größeren Messunsicherheiten führen, wie Bild 3-11 zeigt. Dargestellt ist die Rissmessung über sechs Extensometer mit unterschiedlicher Messlänge. Entsprechend liegen die Start- und Endpunkte der Extensometer (Facetten) im Bereich der Dehnung infolge des Risses oder außerhalb.

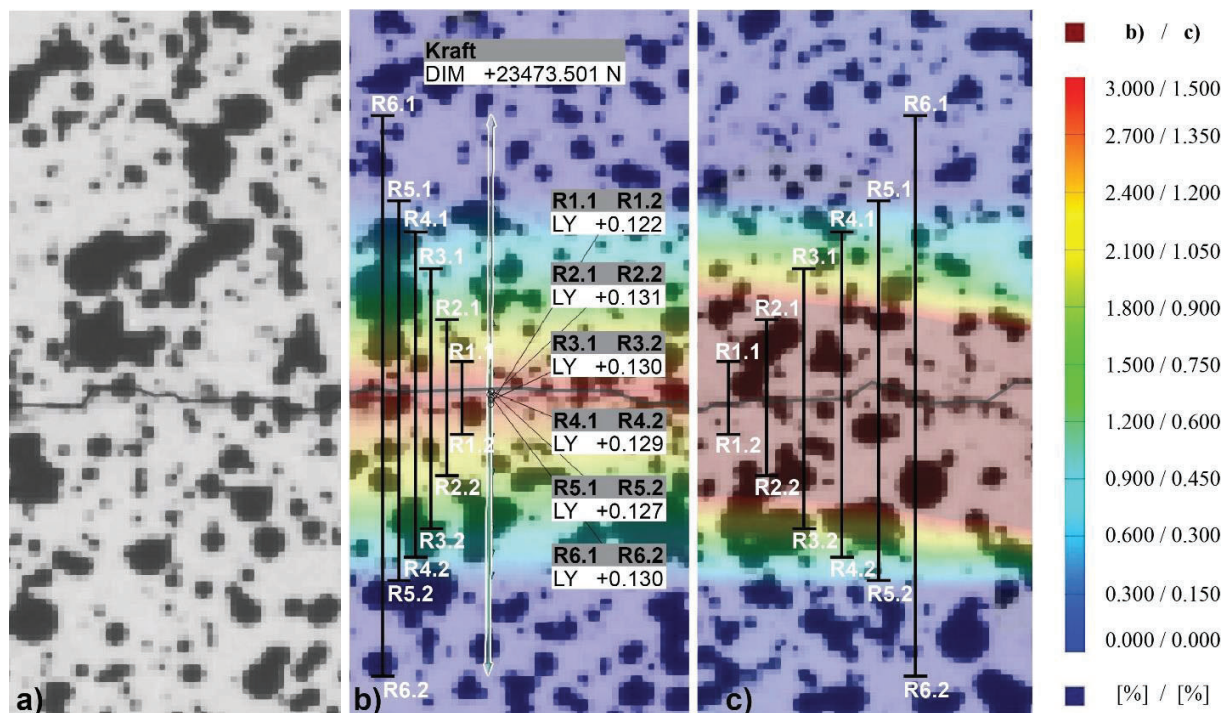


Bild 3-11: Einfluss der Facettenauswahl im Rissrandbereich auf die Rissbreite, a) Stochastisches Muster mit Einzelriss, b) Dehnungsdarstellung bis 3 %, c) Dehnungsdarstellung bis 1,5 %

Die farbliche Visualisierung der Dehnung des dargestellten Risses zeigt, dass bei einer Darstellung mit 3,0 % Dehnung (Bild 3-11 b)) und oberem Grenzwert (dunkelrot) eine gleichmäßige Dehnung bis zur tatsächlichen Risskante angezeigt wird. Die Darstellung mit 1,5 % Dehnung weist einen größeren Bereich mit Dehnungen über dem Grenzwert auf (dunkelroter Bereich in Bild 3-11 c)). Eine Rissbetrachtung über die Facetten R1.1 und R1.2 führt zu einer geringeren Rissbreite von bis zu acht Mikrometer gegenüber den anderen Messlängen. In der Darstellung mit einer Dehnung von

1,5 % liegt das Extensometer mit den Facettenpunkten R1.1 und R1.2 innerhalb der Dehnung über dem Grenzwert von 1,5 % (dunkelroter Bereich Bild 3-11 c)). Die Extensometer zwei bis sechs zeigen im Rahmen der Messschwankung gleiche Ergebnisse. Eine konsequente Übermessung des gesamten Dehnungsbereichs der Einzelrisse (Facetten 6.1 – 6.2) stellte sich im Rahmen dieser Arbeit als zielführend dar, da die geringsten Messschwankungen zu verzeichnen waren. Die Übermessung des gesamten Risses führt in der Regel zu größeren Rissbreiten, unterrepräsentiert dadurch die Ergebnisse nicht und kann als Messung auf der sicheren Seite angenommen werden. Die Netto-Rissbreite ohne Rissrandbereiche lässt sich mit der gegebenen Auflösung nicht fehlerfrei abgreifen. Da der Riss eine Breite von ein bis drei Pixel aufweist, müsste die Facettengröße verringert werden, wodurch Messfehler auftreten.

Die Definition der Farbskala bei der Visualisierung der Dehnung nimmt auch auf das Detektieren von Einzelrisse Einfluss. Bild 3-12 zeigt ein Rissbild einer Dehnkörperprobe mit der Dehnungsdarstellung von 0,0 bis 1,0 % in a) und 0,0 bis 3,0 % in b) bei der gleichen Laststufe.

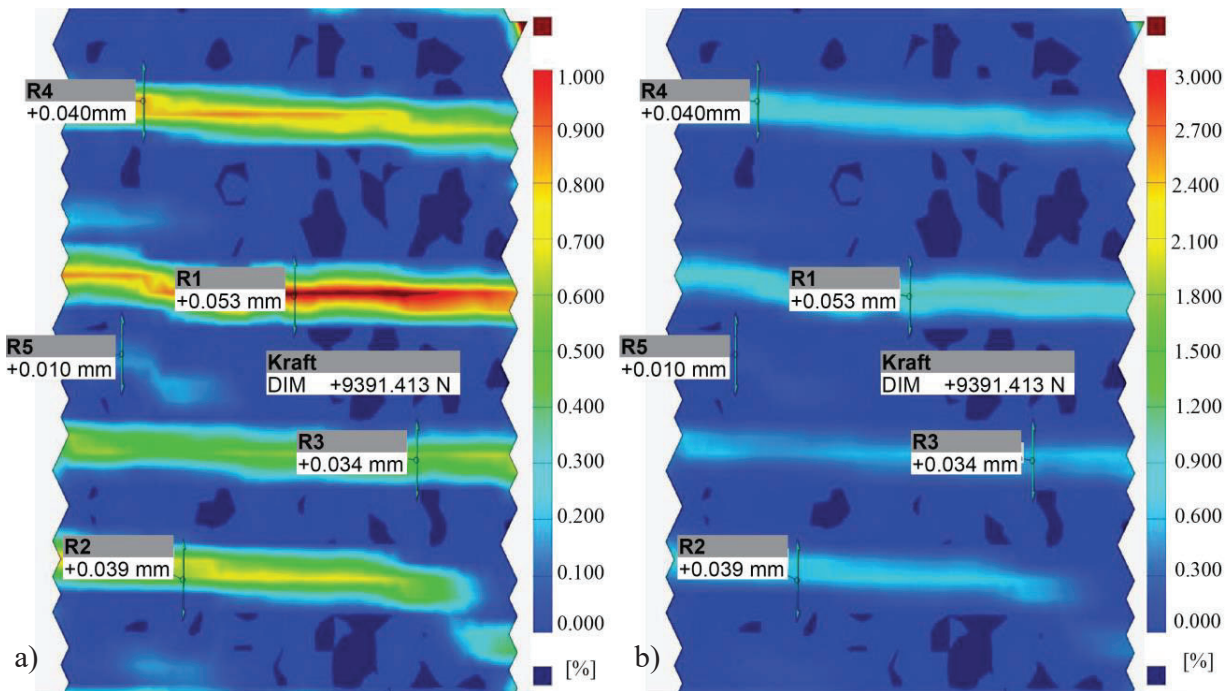


Bild 3-12: Rissvermessung über Extensometer (grüne Pfeile) bei unterschiedlicher Dehnungsdarstellung von 0,0 bis 1,0 % in a) und 0,0 bis 3,0 % in b)

Bei der Dehnungsdarstellung bis 1,0 % in a) sind bereits neue Risse (Sekundärriss R5) zwischen den vorhandenen Rissen (R1 bis R4) zu erkennen, die in b) aufgrund der Dehnungsdarstellung bis 3,0 % noch nicht sichtbar sind. Für die Visualisierung des Risses R5 bedarf es weiterer Laststufen mit einer Laststeigerung von circa 4.000 N, damit der Riss bei einer Dehnungsdarstellung von 0,0 bis 3,0 % sichtbar wird. Die Dehnungsdarstellung mit maximal 1,0 % ist für das Detektieren neuer Risse sinnvoll, kann bei großen Dehnungen aber zu einer unübersichtlichen Darstellung führen (Überlagerung der Dehnungsdarstellung bei vielen Rissen). Unabhängig von der Dehnungsdarstellung bedarf es einer Definition ab welcher Rissbreite ein Riss als solcher detektiert werden soll. Im

Rahmen dieser Arbeit wurden Rissbreiten in den untersuchten Dehnkörperproben unterhalb von 0,01 mm bei maximaler Zugbelastung nicht berücksichtigt.

Die Einzelrisse wurden über zehn Millimeter lange Extensometer senkrecht zur Belastung erfasst (siehe R1 bis R5 in Bild 3-12). Die Lage der Extensometer wurde manuell an der breitesten Stelle eines Einzelrisses, außerhalb des Verformungsbereichs, festgelegt. Über die Ausrichtung der Extensometer entsprechend der Belastungsachse (i. d. R. die Y-Achse) finden die Rissmessungen immer gleich ausgerichtet statt. Die Festlegung der Extensometer erfolgte in der Laststufe unmittelbar vor dem Versagen der Probe. Die Extensometer geben die Längenänderung in Bezug auf die Referenzstufe (150 N Vorlast) aus. Die einzelnen Schritte der Einzelrissvermessung mittels GOM Aramis sind in folgendem Ablauf zusammengefasst:

- Ausrichten der X-, Y- und Z-Achse, sodass i. d. R. die Y-Achse parallel zur Zugbelastung der Dehnkörperproben liegt
- Festlegung der letzten Laststufe unmittelbar vor Erreichen der maximalen Zuglast
- Einstellung der Farbskala der Dehnungsanzeige zwischen 1,0 und 3,0 % für die Rissdetektierung
- Setzen des ersten Facettenpunktes eines Extensometer (10 mm) außerhalb des Dehnbereichs eines Risses an der Stelle der maximalen Breite des Einzelrisses
- Ausrichten des Extensometers in Y-Richtung und somit automatisches Festlegen des zweiten Facettenpunktes in einem Abstand von zehn Millimeter (Übermessen des Dehnbereichs)
- Prüfen, ob die Facettenpunkte der Extensometer außerhalb des Dehnbereichs der Einzelrisse liegen
- Prüfen, ob die Einzelrissbreite über 0,01 mm liegt

Die Ermittlung einer mittleren Rissbreite einzelner Risse über drei oder fünf Stellen bzw. in der Probekörperachse (vgl. [Mor20, Wil21]) wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht angewendet. Durch die Mittelwertbildung einzelner Rissbreiten ist dieser ermittelte Wert kleiner als die maximale Öffnungsbreite. In Bezug auf die Rissheilung von Rissen  $\leq 0,1$  mm ist es erforderlich, dass die maximale Rissbreite ausheilt. Wird beispielsweise ein Einzelriss R1 an drei Stellen mit Rissbreiten von  $R1.1 = 0,09$  mm,  $R1.2 = 0,10$  mm und  $R1.3 = 0,11$  mm gemessen, so ergibt sich ein Mittelwert von 0,10 mm. Der kritische Bereich der Rissheilung ist in diesem Fall aber 0,11 mm breit. Daher wurden die eigenen Rissmessungen an der breitesten Stelle der Einzelrisse vorgenommen. Bei den Untersuchungen zur Rissheilung in Abschnitt 6.2.1 wird die Rissheilung unterschiedlich breiter Risse aufgegriffen. Weitere detaillierte Beschreibungen zu Untersuchungen mit einem photogrammetrischen Messsystem sind zum Beispiel in [Han14, Lie20, Mor20] zu finden.

Für die Betrachtung der Spannungs-Dehnungsbeziehung der Dehnkörperproben wurde die Längenänderung über zwei Extensometer mit einer Länge von 200 mm am linken und rechten Rand der Proben abgegriffen. Die Extensometer wurden so angeordnet, dass der mittlere Bereich der Probe erfasst wurde (siehe Bild 3-7 b)). Aus dem Mittelwert der beiden Extensometer ist die axiale

Längenänderung einer Dehnkörperprobe bestimmt worden. Aus der mittleren gemessenen Längenänderung der Dehnkörperproben wurde in Bezug auf die Messlänge die Dehnung  $\varepsilon$  nach Gleichung (3-1) bestimmt:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 1000 \quad (3-1)$$

Mit:

$\varepsilon$	Dehnung, in ‰
$\Delta l$	mittlere gemessene Längenänderung, in mm
$l_0$	Messlänge der Extensometer, in mm

Die Zugfestigkeit in Form der Textilzugspannung wurde aus der gemessenen Zugkraft  $F$  und der Querschnittsfläche der textilen Bewehrung nach Gleichung (3-2) ermittelt:

$$\sigma_{DKP} = \frac{F}{A_{Rov} \cdot n} \quad (3-2)$$

Mit:

$\sigma_{DKP}$	Textilzugspannung Dehnkörperprobe (DKP), in N/mm <sup>2</sup>
$F$	Kraft, in N
$A_{Rov}$	Rovingquerschnitt (rechnerisch), in mm <sup>2</sup>
$n$	Anzahl der verwendeten Rovings in Lastrichtung

Die Methode zur Mittelwertbildung mehrerer Versuche für die Textilzugspannung, Dehnungen oder Rissbreiten, von Spannungs-Dehnungsbeziehungen oder Rissbreiten-Spannungsdiagrammen, hat großen Einfluss auf das Ergebnis und die Darstellung. Die einzelnen Messreihen weisen in der Regel unterschiedlich viele Datenpunkte auf, da z. B. die Bruchlast variiert oder bei stärkerer Dehnung die Laststeigerung verzögert eintritt. In der Folge weisen die Messdaten keine einheitliche Basis für eine Mittelwertbildung auf, sodass sogenannte verschmierte Mittelwerte entstehen können. Insbesondere ist der Indexwert, der entsprechend der eingestellten Frequenz zur Messwertaufzeichnung erzeugt wird, ungeeignet zur Mittelwertbildung.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden bei der Betrachtung von Spannungs-Dehnungsverläufen aus mehreren Messreihen die Mittelwerte auf Basis der Längenänderung (Dehnung) erstellt. Bei gleichen Dehnwerten wurden die Spannungen gemittelt. Zwischen einzelnen Messwerten erfolgte bei nicht exakter Zuordnung von Dehnung und Spannung eine lineare Interpolation. Aufgrund einer hohen Messwertfrequenz lagen die einzelnen Messwerte nur geringfügig auseinander, sodass sich insgesamt ein geringer Standardfehler des Mittelwerts ergab (10 bis 40 N). Eine Extrapolation der einzelnen Messreihen wurde nicht durchgeführt, um der Darstellung möglicher Streuungen gerecht zu werden. Daraus ergeben sich Mittelwertkurven mit sprunghaften Lastzunahmen oder Abnahmen. Spannungssprünge ergaben sich aus wegfallenden Messreihen aufgrund von Probekörperversagen. Bild 3-13 zeigt ein Spannungs-Dehnungsdiagramm mit einzelnen Messkurven sowie der Mittelwertkurve und Spannungssprüngen.

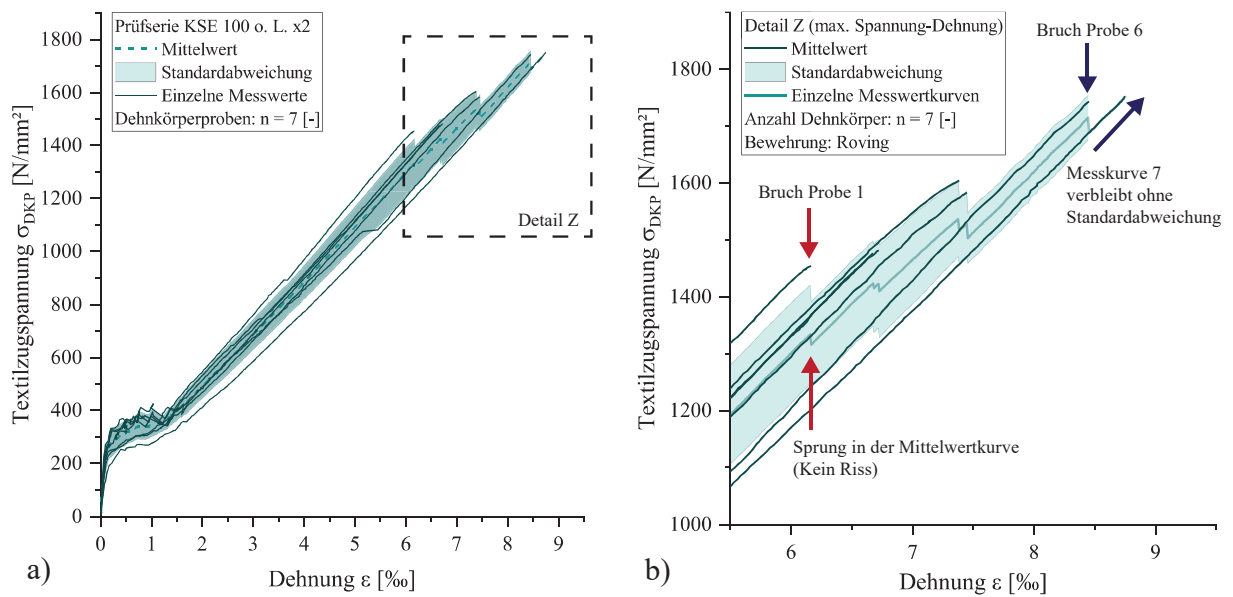


Bild 3-13: a) Spannungs-Dehnungsbeziehung von Einzelmesswertkurven und Mittelwertkurve, b) Detail mit Spannungssprüngen der Mittelwertkurve

Für die Mittelwertbildung wurden alle Messreihen auf eine gemeinsame Anzahl von Datenpunkten erweitert, um die erforderliche lineare Interpolation der Zwischenwerte durchzuführen. Die jeweilige maximale Spannung blieb erhalten, wodurch die Mittelwertkurve Spannungssprünge im letzten Drittel aufweist. Zu erkennen ist dies am Beispiel des Bruchs der Probe 1 (rote Pfeile Bild 3-13 b)). Die so erzeugten Mittelwertkurven berücksichtigen weiterhin die realen maximalen Zugspannungen der einzelnen Messreihen. Unter- oder überrepräsentierte Mittelwerte wurden so vermieden. Durch die beschriebene Methode zur Mittelwertbildung geht die Mittelwertkurve am Ende in die Einzelmesskurve mit der größten Dehnung über (blaue Pfeile Bild 3-13 b)).

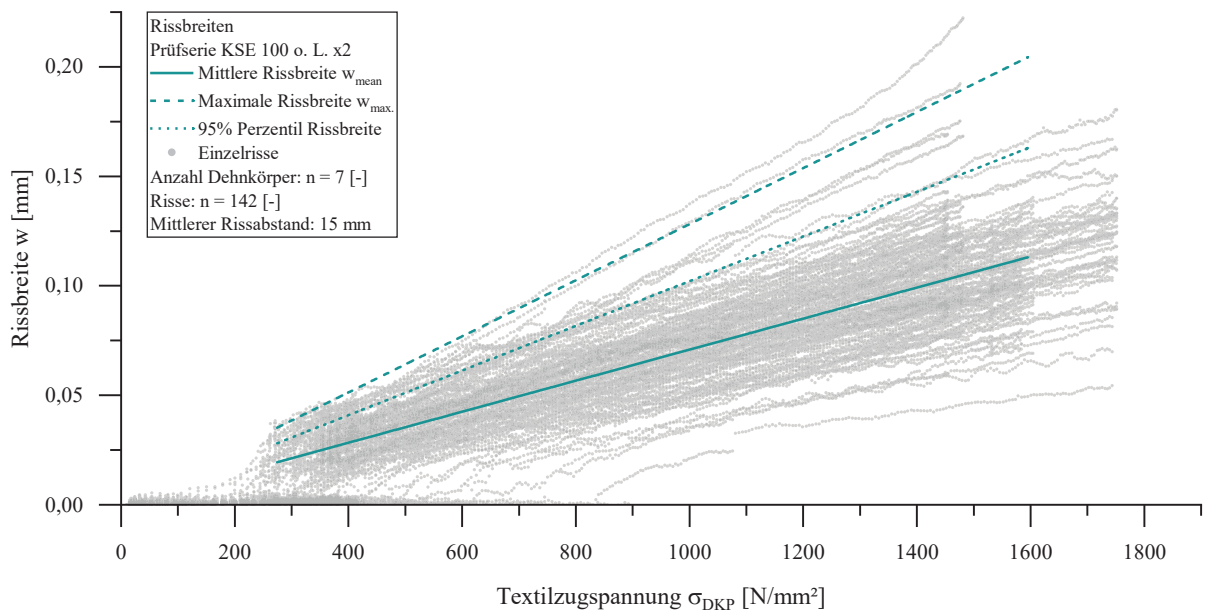


Bild 3-14: Rissbreiten-Spannungs-Diagramm mit Einzelrissen und Mittelwertgraphen

Die Betrachtung der einzelnen Rissbreiten in Bezug auf die Dehnkörperspannung erfolgt mit Rissbreiten-Spannungs-Diagrammen. Zur Mittelwertbildung mehrerer Messreihen wurden die einzelnen Rissbreiten mit der zugehörigen Spannung linear auf eine Anzahl an Datenpunkte angepasst. Die einzelnen Messreihen wurden nicht extrapoliert. Für jede Spannungsstufe wurden die Messwerte zur Rissbreite gemittelt und mit linearer Funktion in Geraden überführt. Bild 3-14 zeigt die Einzelsrissbreiten einer Probekörperserie mit den linearisierten Graphen für die mittlere und maximale Rissbreite sowie das 95 % Perzentil.

Die vereinfachte Darstellung der mittleren und maximalen Rissbreiten über linearisierten Graphen gibt repräsentativ die Ergebnisse vieler Einzelwerte valide und übersichtlich wieder. Um die verschiedenen untersuchten Varianten miteinander zu vergleichen, wird im Weiteren auf die Darstellung der Einzelsrisse verzichtet. Auf die Darstellung des 95 % Perzentils wird verzichtet, da zur übersichtlicheren Vergleichbarkeit die mittleren und maximalen Risse ausreichend sind und die maximalen Rissbreiten für die Funktionstüchtigkeit eines Instandsetzungssystem maßgebend sind.

### 3.3.3 Durchführung von Faserstrangzugversuchen

Die Faserstrangzugversuche wurden angelehnt an die Prüfeempfehlungen von REMPEL in einer Prüfapparatur vergleichbar zu HINZEN durchgeführt [Hin17, Rem18], vergleiche auch [Bes22]. Die Prüfung erfolgte in der Universalprüfmaschine inspekt 100 der Firma Hegewald & Peschke. Für die Klemmung wurde ein Keilschraubspannzeug verwendet, welches ein symmetrisches Spannen ermöglicht und über einen Drehmomentaufsatz eine definierte Vorspannkraft zulässt. Das Keilschraubspannzeug ist speziell für querdruckempfindlichere Faserstränge ausgelegt. Die Spannkraft der keilförmigen Klemmbacken steigt während der Laststeigerung, sodass eine gleichmäßige Krafteinleitung in die Faserstränge erfolgt und eine lastgesteuerte Spannkraft vorliegt. Bild 3-15 zeigt das obere Keilschraubspannzeug mit eingebauter Faserstrangzugprobe eines Carbonrovings.

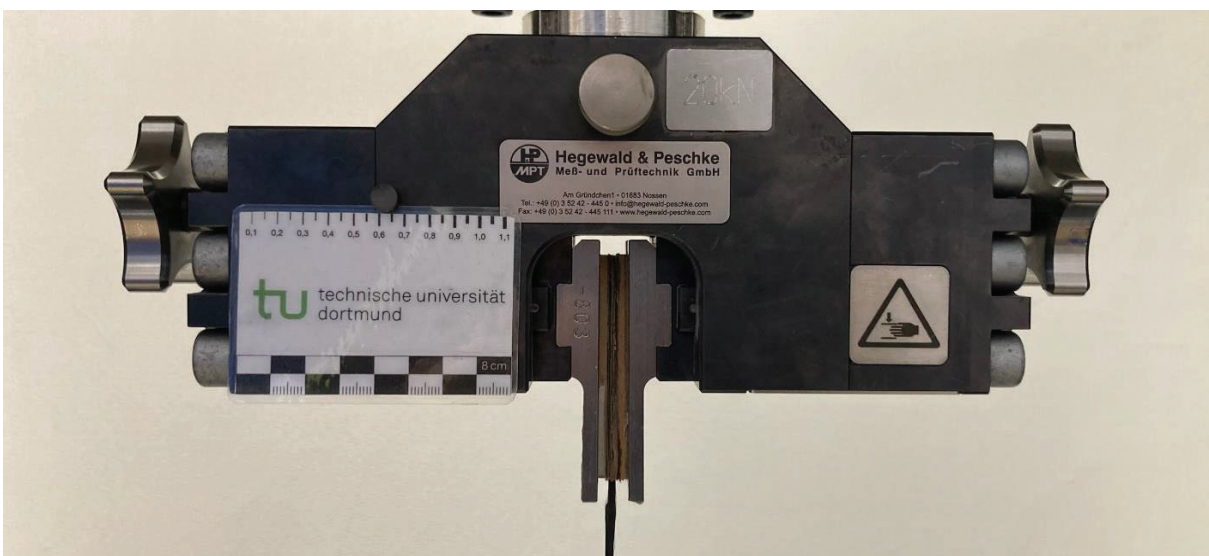


Bild 3-15: Oberes Keilschraubspannzeug mit eingebauter Faserstrangzugprobe (SGL KSE 100 o. L.)

Die Klemmbanken sind mit einer Ausgleichsschicht aus einer 3 mm Holzwerkstoffschicht versehen. Auf der Holzschicht aus Mitteldichterfaserplatte (MDF) klebt Schleifpapier mit einer 180er-Körnung, um die Reibungskräfte zu erhöhen. Der Traversenabstand der Universalprüfmaschine wurde so eingestellt, dass die Enden der Klemmbanken einen lichten Abstand von 310 mm aufwiesen. Die Ausgleichsschichten aus MDF stehen gegenüber den Enden der Klemmbanken fünf Millimeter zurück, sodass die freie Weglänge der Probekörper entsprechend der verklebten Pappstreifen 320 mm betrug. Durch eine automatische Rückstellung der Traverse auf die Ausgangsposition konnte über alle Prüfungen hinweg sichergestellt werden, dass der Prüfabstand immer exakt gleich ausfiel. Die Prüfung erfolgte weggesteuert mit einer Anfahrgeschwindigkeit von 1,0 mm/min bis zu einer Vorkraft von 150 N und anschließend mit einer Prüfgeschwindigkeit von 6,0 mm/min bis zum Versagen der Fasern. Zu Prüfbeginn wurde die Spannkraft der Klemmbanken mit einem Drehmoment von 20 Nm eingestellt. Der beschriebene Prüfungsablauf wurde in zahlreichen Faserstrangzugversuchen erprobt (vgl. [Bes22]).

### 3.4 Weiterführende Untersuchungen an Verbundprobekörpern

Um die Materialeigenschaften und die Wirkungsweise der mineralischen Tränkungen detaillierte bewerten zu können, wurden weitere Untersuchungen unter Einbezug der Rovinggeometrie im Verbundprobekörper durchgeführt. Zusätzlich erfolgten Untersuchungen zur Rissheilung unter Wasserbeaufschlagung und Rissüberbrückungsversuche entsprechend des Einsatzes als flächiges Instandsetzungssystem. Die Versuchsaufbauten und Untersuchungsmethoden werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

#### 3.4.1 Untersuchungen zum Rovingumfang und zur Rovingquerschnittsfläche

Rovingumfang und Rovingquerschnittsfläche, der in dieser Arbeit verwendeten textilen Bewehrungen, wurden mittels elektronischer Bildauswertung quantifiziert, um den Einfluss der Geometrie auf die Verbundeigenschaften zur Feinbetonmatrix zu bestimmen. Die Verbundeigenschaften wirken sich direkt auf die Anzahl der Risse und Rissbreiten in den Dehnkörperproben aus. Die Mikroskopieaufnahmen in Bild 3-16 zeigen zwei Rovings mit unterschiedlicher Rovinggeometrie und entsprechend variierendem Rovingumfang.

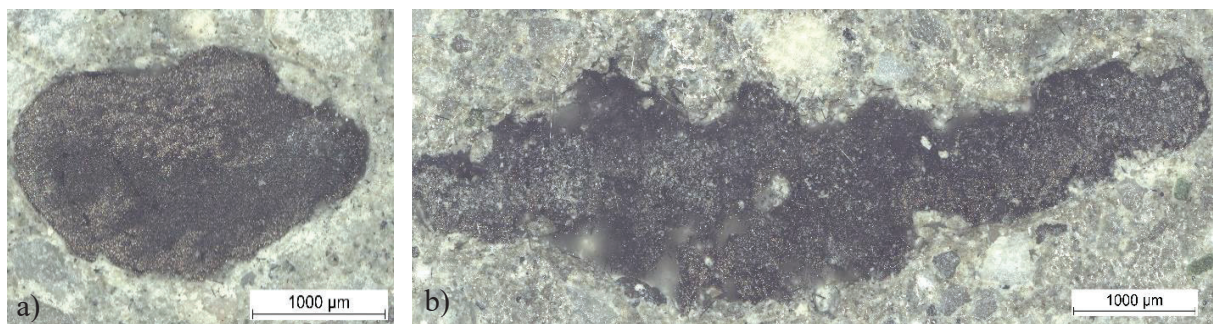


Bild 3-16: Mikroskopieaufnahmen von Rovingquerschnitten aus Dehnkörperproben, a) ovaler Roving mit KSE 500E Tränkung, b) flacher Roving mit zweifacher KSE 100 ohne Lösemittel-Tränkung

Die Ermittlung des Umfangs sowie der Querschnittsfläche einzelner Rovings erfolgte in Anlehnung an die Vorgehensweise, die JESSE in seiner Arbeit auf Basis der Untersuchungen von PURNELL nutzte [Jes04, Pur00]. Durch die divergierende Form eines einzelnen getränkten Rovings über die Probekörperlänge ist eine Mehrfachbestimmung erforderlich. Zur Messung der geometrischen Eigenschaften wurden aus Dehnkörperproben an drei Stellen der freien Messlänge circa 15 mm breite Proben gesägt (Bild 3-17).

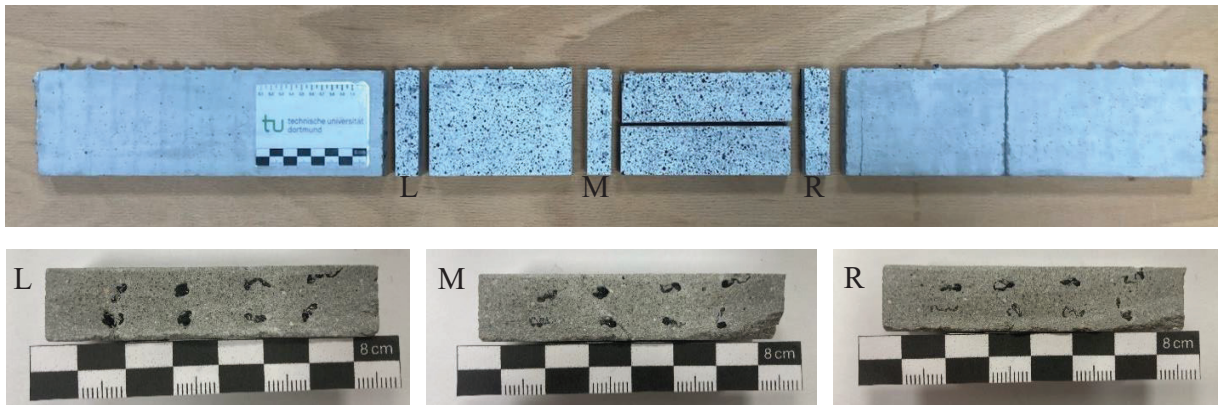


Bild 3-17: Probenzuschnitt für mikroskopische Aufnahmen: Dehnkörperprobe mit Zuschnitt der Einzelproben (oben), Querschnitt linke Probe (L), Querschnitte mittlere Probe (M), Querschnitt rechte Probe (R)

Auf eine Herstellung von Dünnschliffproben wurde verzichtet, da die Aufnahmen am optischen Mikroskop mit Auflicht durchgeführt wurden und die Qualität der Aufnahme für die Bestimmung der Geometrie ausreichte. Der Mehraufwand für die Herstellung von Dünnschliffen, wie sie JESSE nutzte, stand in keinem Verhältnis zur angestrebten Genauigkeit der Kontaktfläche zwischen Feinbetonmatrix und Textilfasern. Durch den natürlichen Kontrast der dunklen Carbonfasern und der helleren Feinbetonmatrix war eine Durchlichtaufnahme auch nicht erforderlich. Glas- und Basaltrovings wurden bei der Querschnittsuntersuchung nicht betrachtet.

Für die Mikroskopieaufnahmen wurden die gesägten Proben mit Isopopanol gereinigt und mit Knetmasse auf Objektivträgern fixiert. Aufnahmen wurden mit einem Axio Imager.M2m Polarisationsmikroskop der Firma Carl Zeiss mit fünffacher Vergrößerung aufgenommen. Da die Rovinggrößen das Sichtfeld überschritten, wurden Kachelaufnahmen (mit bis zu 45 Kacheln) erstellt und automatisch zusammengefügt. Ausreichende Tiefenschärfe wurde mittels Stapelaufnahmen (Focus Stacking) (mit bis zu 30 Aufnahmen pro Stapel) erstellt, da die Probekörper nicht ausreichend planparallel gesägt werden konnten. Pro Dehnkörper wurden alle Rovings an den Querschnitten L, M und R (s. Bild 3-17) mikroskopisch erfasst.

Die Flächen- und Längenbestimmung der Rovingquerschnitte wurde mittels ImageJ 1.53e wie folgt durchgeführt:

In einem ersten Schritt ist die Originalfarbaufnahme in ein Graustufenbild (8-Bit-Grafik) umzuwandeln, indem die RGB-Kanäle aufaddiert werden. Auch wenn die Carbonfasern gegenüber dem Feinbeton bereits einen guten Kontrast aufweisen, können zum Beispiel Reflektionen durch das Mikroskoplicht in der Aufnahme vorhanden sein, die zu Fehlern in der Grenzflächenbestimmung



führen können. Das Graustufenbild wird daher mit einer Filterfunktion behandelt, wodurch jeder Pixelwert den Minimumwert der Umgebung erhält (Radius von 5 Pixel). Das erzeugte Bild ist insgesamt dunkler und weist einen stärkeren Kontrast auf.

Im nächsten Schritt wird über eine Schwellwertfunktion die Grenzfläche zwischen der Feinbetonmatrix und den Fasern bestimmt. Alle Pixel nehmen entsprechend des eingestellten Schwellwertes die Farben Weiß oder Schwarz an. Aus zusammenhängenden Pixeln ergeben sich dann Grenzflächen. Mit ImageJ kann der Schwellwert manuell wie auch automatisch bestimmt werden. Eine allgemeingültige Formel lässt sich für den Schwellwert nicht ermitteln, da dieser bei jeder Aufnahme variieren kann. PURNELL legte den Schwellwert jeder Faserquerschnittsfläche so fest, dass sich eine minimale Länge der Grenzfläche ergibt [Pur00]. JESSE verwendete auch den Schwellwert, der zum Minimum des Umfanges führt, bringt aber an, dass zum Beispiel Maßstabsabhängigkeiten den Wert beeinflussen können [Jes04].

Das Schwellwertverfahren unterteilt Pixel in zwei Klassen, sodass Pixel, die zu wichtigen Objekten gehören, von jenen getrennt werden, die nicht dazu gehören. Dementsprechend besitzt jeder Pixel einen unterschiedlichen Intensitätswert je Klasse. Durch die Sammlung der Intensitätswerte in einem Histogramm können die Pixelinformationen zusammengefasst werden, auch wenn die Pixelposition im Bild unwichtig oder unbekannt ist. Über dieses Verfahren kann der Schwellwert in ImageJ bestimmt werden, um ein relevantes Objekt zu extrahieren. [Ban22]

Bild 3-18 zeigt ein erzeugtes Binärbild auf Basis des Histogramms mit den Pixelinformationen für die Schwellwertbestimmung (Threshold). Der erste Peak im Histogramm zur Schwellwertbestimmung vereint die Pixelinformationen des relevanten Objektes (Carbonroving).

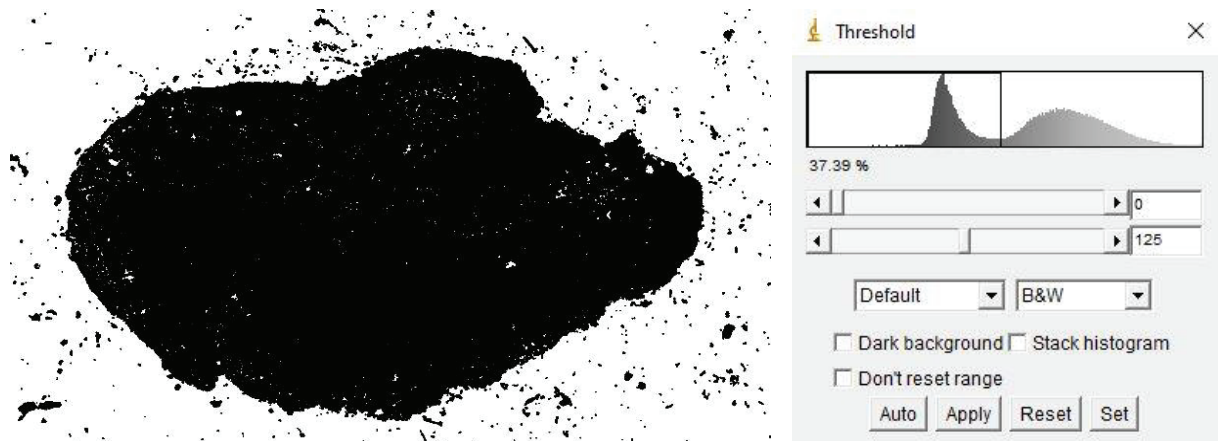


Bild 3-18: Erzeugte Binärgrafik aus Graustufenbild über Schwellwertbestimmung

Die Pixel der Feinbetonmatrix sind in der flacheren Kurve des Histogramms enthalten. Zwischen beiden Ausschlägen befindet sich noch ein Grundrauschplateau, welches insbesondere Pixel enthält, die sich in der Grenzfläche von Roving und Matrix befinden. Der korrekte Schwellwert ist auf diesem Plateau zu finden. Schwellwertverschiebungen auf diesem Plateau beeinflussen die Länge des Umfangs nur gering. Wird der Schwellwert verringert und erreicht die Steigung des

ersten Peaks, werden zu wenige Pixel des Rovings erfasst, das Binärbild wird heller und die Umfanglänge geringer. Bei einer Verschiebung nach rechts werden Artefakte der Matrix dem Roving zugerechnet, das Binärbild erhält mehr dunkle Pixel und die Umfanglänge wird überbewertet. Mit der Minimum-Methode der automatischen Schwellwertbestimmung liegt dieser in der Regel auf dem benannten Plateau. Trotz Schwellwertbildung behält das erzeugte Binärbild weiße Pixel in der Fläche des Rovings und Splitter aus schwarzen Pixeln im Bereich der Feinbetonmatrix, die in weiteren Schritten egalisiert werden.

Um die weißen Löcher in der Rovingfläche zu schließen, wird die Funktion Fill Holes genutzt. Im Ergebnis werden alle weißen Pixel, die sich innerhalb einer geschlossenen Fläche aus schwarzen Pixeln befinden, auf schwarz gesetzt. Im Binärbild verbleiben neben der Rovingfläche vereinzelt kleine Flächen aus schwarzen Pixeln. Über die Funktion zur Partikelanalyse wird für Flächen einer bestimmten Größe, die aus zusammenhängenden Pixeln bestehen, eine Umfanglänge bestimmt. Bei der Definition der zu bestimmenden Fläche ist ein unterer Grenzwert anzugeben, sodass nur die Rovingfläche bestehen bleibt. Am Beispiel der erzeugten Binärgrafik aus Bild 3-18 wird die Größe zwischen 50.000 Pixel<sup>2</sup> und unendlich festgelegt. Als Ergebnis bleibt eine Umfangsfläche des Rovings, die durch die Fill Holes-Funktion wieder schwarz gefüllt ist, wie Bild 3-19 darstellt. Bei der Partikelanalyse wird auch eine Querschnittsfläche und Umfanglänge der verbleibenden Flächen ausgegeben. Im Fall der isolierten Rovingfläche beträgt der berechnete Umfang circa 16,1 mm, was einer Überbewertung der realen Grenzfläche entspricht. Wie in Bild 3-19 auch zu sehen ist, weist die Grenzfläche des Rovings einige Artefakte auf und erhält dadurch eine zu große Umfanglänge.

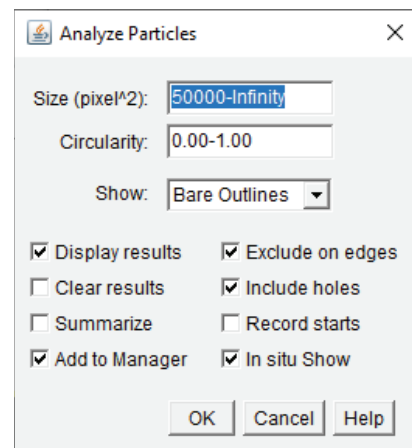
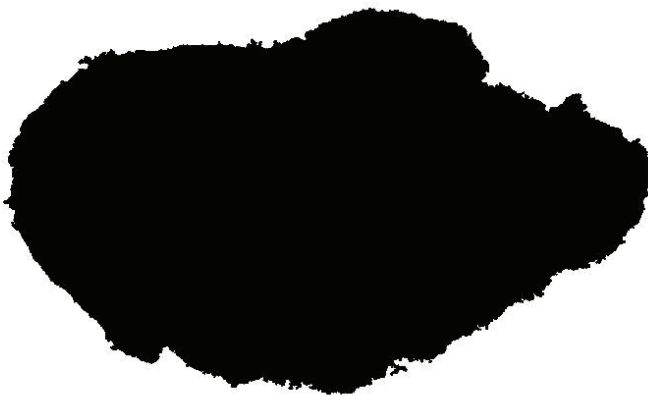


Bild 3-19: Isolierte Rovingfläche mit definierter Umfanglänge durch Partikelreduzierung

Die überbewertete Umfanglänge wird mit einer Gauß-Funktion zum Weichzeichnen (Gaussian Blur) verringert. Eine Standardabweichung der Verteilfunktion steuert die Varianz um einen Mittelpunkt, wodurch das Ausmaß des Unschärfeneffekts um einen Pixel bestimmt wird. Mit einem Wert von 50 Pixel konnten jegliche Artefakte an der Grenzfläche egalisiert werden. Durch das Weichzeichnen wird aus der Binärgrafik wieder ein Graustufenbild, welches mit der Funktion Make Binary wieder in eine Binärgrafik ohne Artefakte umgewandelt wird.

Aus der geglätteten Binärgrafik wird mit der Funktion zur Partikelanalyse erneut eine Grenzfläche zwischen schwarzen und weißen Pixeln erzeugt und der Flächeninhalt sowie die Umfanglänge werden berechnet. Für den Beispielroving aus Bild 3-16 a) ergibt sich ein Umfang von 10,6 mm, die der zu erwartenden Länge der Grenzfläche zwischen Roving und Feinbetonmatrix entspricht. Die erzeugte Umfangslinie wird zum Abgleich auf das Graustufenbild der Mikroskopieaufnahme gelegt, um visuell zu überprüfen, ob die berechnete Länge übereinstimmt. Bei Abweichungen können einzelne Schritte wiederholt werden, insbesondere die Einstellungen zum Schwellwert sollten variiert werden. Die einzelnen Schritte zur Ermittlung der Querschnittsfläche und des Rovingumfangs mit ImageJ sind als Grafiken in Bild 3-20 abgebildet.

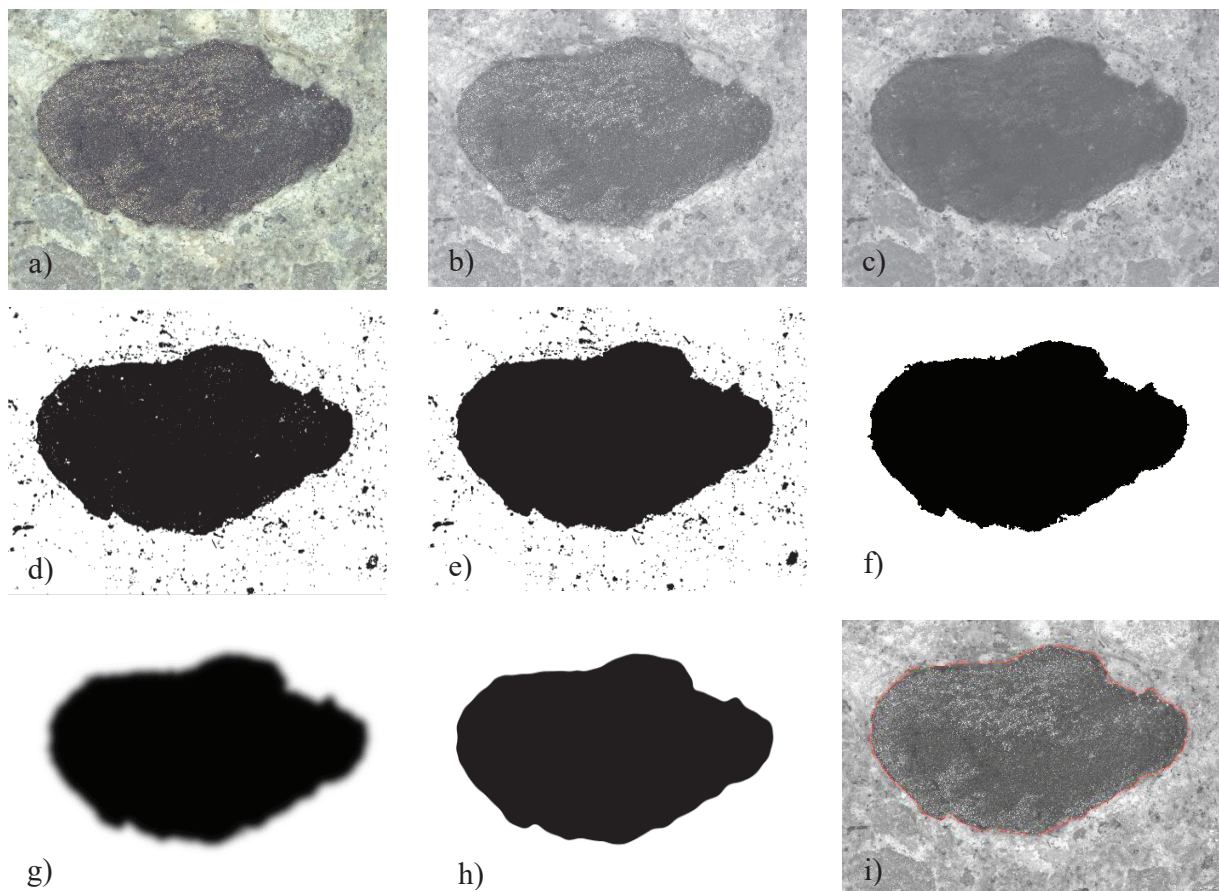


Bild 3-20: Visualisierter Ablauf der Ermittlung von Rovingquerschnittsfläche und Rovingumfang mit ImageJ, a) Mikroskopieaufnahme b) 8-Bit-Graustufenbild, c) Kontrastverbesserung durch Minimum-Filter, d) Binärgrafik über Schwellwertverfahren, e) Auffüllen von Löchern, f) Egalisieren von Splitterpixel, g) Weichzeichnen über Gauß-Funktion, h) Scharfzeichnen und Glätten, i) Überlagerung von erzeugter Grenzfläche mit Graustufenbild

Sofern einzelne Rovings durch den Tränkungsprozess oder die Betonage nicht mehr als zusammenhängendes Faserbündel vorliegen, sind die Teilflächen pro Roving zu addieren. Bei vielen kleinen Teilflächen ist bei der Partikelanalyse darauf zu achten, dass keine relevanten Teilflächen ausgelassen werden. Für jeden untersuchten Dehnkörper entstehen insgesamt 24 Rovingquer-

schnittsflächen und 24 Umfänge (8 Rovings pro Probekörper x 3 Messproben). Aus den 24 Einzelwerten einer Dehnkörperprobe wird ein Mittelwert gebildet und zur Bewertung der einaxialen Zugversuche herangezogen.

### 3.4.2 Untersuchungen zur Rissheilung von bewehrten Feinbetonproben

Für Prüfungen zur Rissheilung von Textilbetonproben gibt es bisher keine standardisierte Vorgehensweise. Verschiedene Untersuchungen [Edv96, Lie12, Roo13, Mor20] zeigten bereits die Fähigkeit zur autogenen Selbstheilung von filigranen Textilbetonproben. Die eigenen Untersuchungen zur Rissheilung wurden an gerissenen Dehnkörperproben aus den einaxialen Zugversuchen in zwei unterschiedlichen Versuchskonfigurationen mit druckloser Wasserlagerung sowie unter Druckwasserbeanspruchung durchgeführt. Bild 3-21 zeigt die Probekörperpräparation.

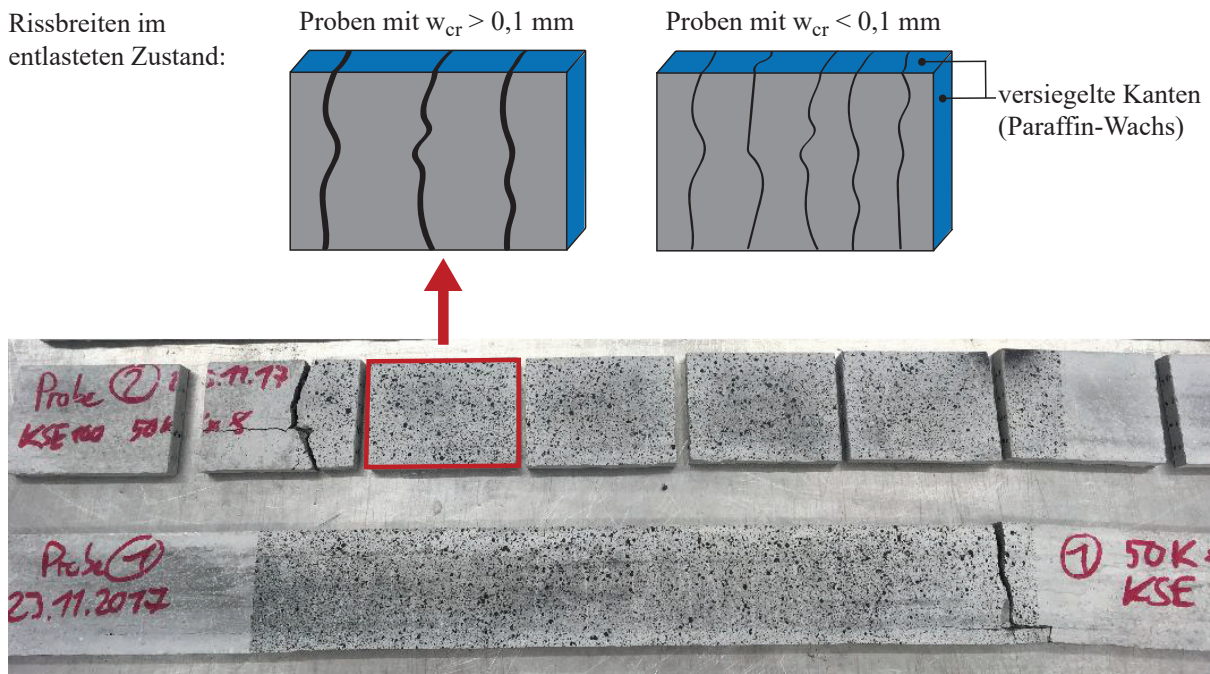


Bild 3-21: Geprüfte Dehnkörperproben mit Sägeschnitten und schematischer Probenpräparation für Rissheilungsuntersuchungen

Für beide Untersuchungsmethoden erfolgte eine Probenpräparation durch Sägen von 70 mm bzw. 100 mm langen Proben. Die 100 mm langen Proben wurden für Prüfungen mit druckloser Wasserlagerung verwendet. Die Versuche unter druckloser Wasserlagerung wurden in Anlehnung an die Messung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen bei teilweisem Eintauchen nach DIN 15148 [DIN15148] durchgeführt, vergleiche auch [Lie12]. Für eine definierte Wasseraufnahme über die Saugfläche, inklusive der Risse im Probekörper, wurden die lateralen Flächen mit einem Paraffin-Wachsgemisch versiegelt und im Prüfraum bei circa 23 °C und 50 % r. F. konditioniert. Während der Prüfung lagerten die Probekörper einzeln in Glasschalen auf jeweils zwei runden Edelstahldrähten ( $d = 3 \text{ mm}$ ). Bild 3-22 zeigt den schematischen Prüfaufbau in Anlehnung an DIN 15148.

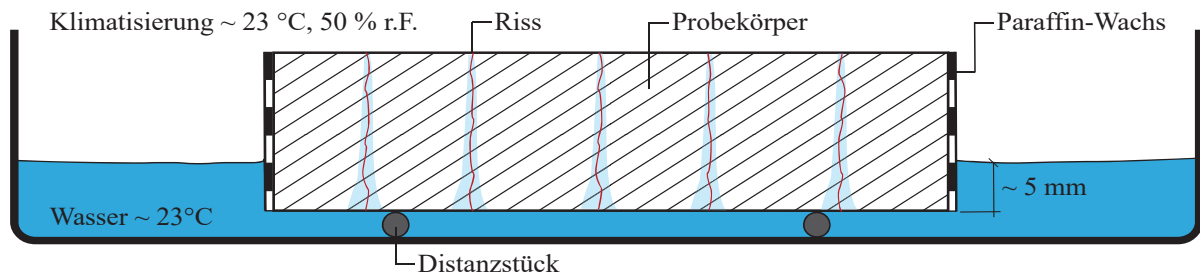


Bild 3-22: Schematische Darstellung der Rissheilungsuntersuchung (100 mm Proben) in Anlehnung an den Versuchsaufbau zum Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen bei teilweisem Eintauchen nach DIN 15148

Der Füllstand des Wassers wurde so eingestellt, dass die Probekörper bei einer Eintauchtiefe von circa fünf Millimeter lagerten. Durch regelmäßiges Kontrollieren und Auffüllen der Wassermenge wurde der dauerhafte Wasserkontakt bei konstanter Eintauchtiefe sichergestellt. Um der Bildung einer künstlich erhöhten Luftfeuchtigkeit unmittelbar über der Prüffläche vorzubeugen, wurden die Prüfschalen nicht abgedeckt. Die Entwicklung der Rissheilung wurde in regelmäßigen Zeitschritten fotografiert und durch Wägung geprüft. Die Wägung erfolgte, nachdem überschüssiges Wasser an den eingetauchten Flächen mit einem feuchten Schwammtuch entfernt wurde.

Die Prüfung unter Druckwasserbeanspruchung erfolgte visuell an einer eigens konzipierten Prüfanlage, um eine stufenlose künstliche Wassersäule zu erzeugen. Über ein geschlossenes System bestehend aus einem Wasserreservoir und einem Druckluftbereich wurde der Wasserdruck erzeugt. Ein Schlauchsystem verteilt das Wasser auf vier Probekörpereinspannungen. Die Probekörper wurden zwischen zwei transparenten PE-Rohren mit einem Innendurchmesser von 54 mm geklemmt. Die Klemmung erfolgte über verschraubte Gewindestangen. Um eine Abdichtung der wasserführenden Prüfseite zu gewährleisten, wurden einseitig Dichtringe eingesetzt. Über das offene PE-Rohr konnte durchgedrungenes Wasser ablaufen. Bild 3-23 zeigt die Prüfanlage zur Rissheilung unter Druckwasserbeanspruchung.

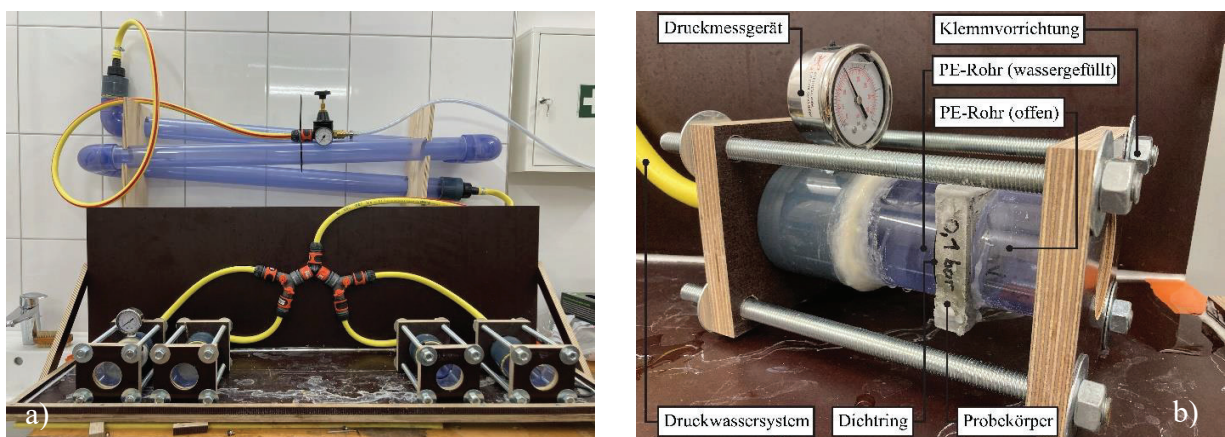


Bild 3-23: a) Druckwasserprüfanlage b) Probenhalterung zur rückseitigen Druckwasserbeanspruchung

Der Wasserdruck wurde mit einem stufenlos verstellbaren Manometer über den Luftdruck eingestellt. Untersucht wurden die Probekörper in den Druckstufen 0,1, 0,5 und 1,0 bar. Diese Wasserdrücke entsprechen Wassersäulen von einem, fünf und zehn Metern. Aufgrund des hydrostatischen

Paradoxons hat die Querschnittsfläche vor der zu prüfenden Fläche keinen Einfluss auf den Wasserdruck, sodass die Querschnittsänderungen im Drucksystem keinen Einfluss haben. Zur Gewährleistung korrekter Druckverhältnisse direkt vor der Prüffläche wurde bei einem der vier Probekörperhalterungen ein weiteres Druckmessgerät installiert. Jeder Druckwasserstrang konnte einzeln vom System abgeklemmt werden.

Die Probekörper wurden wie bei der drucklosen Wasserlagerung präpariert. Die Versiegelung der Kanten diente bei der Druckprüfung der Verhinderung eines unkontrollierten seitlichen Wasseraustritts, sodass die Rissheilung realitätsnah bewertet werden konnte. Untersucht wurden Probekörper mit mikroskopisch messbaren Rissbreiten im Bereich von  $0,01 \text{ mm} < w_{cr} < 0,20 \text{ mm}$ . Die Rissbreiten wurden vor der Prüfung an mehreren Messstellen über die gesamte Länge der Einzelrisse erfasst. Anhand der Messergebnisse wurden die Probekörper in Risskategorien eingeteilt, da die Risse eine schwankende Breite über die Risslänge aufwiesen. Die drei Risskategorien teilen sich wie folgt auf:

- Kategorie 1:  $0,00 \text{ mm} < w_{cr} < 0,05 \text{ mm}$
- Kategorie 2:  $0,05 \text{ mm} \leq w_{cr} \leq 0,10 \text{ mm}$
- Kategorie 3:  $w_{cr} > 0,10 \text{ mm}$

Geprüft wurden zu jeder Risskategorie vier Probekörper in den jeweiligen drei Druckstufen. Das Vorgehen ist zudem in [Len21a, Len21b] veröffentlicht worden.

### 3.4.3 Durchführung von Rissüberbrückungsversuchen nach MITEX

Um die rissüberbrückenden Eigenschaften des mineralischen Textilbeton-Instandsetzungssystems zu prüfen, wurden entsprechend des DURTEX-Prinzips Untersuchungen in Anlehnung an das BAW-Merkblatt MITEX durchgeführt. Das BAW-Merkblatt MITEX sieht für den Nachweis der Verwendbarkeit eines flächigen Instandsetzungssystems für Wasserbauwerke mit textildbewehrten Mörtel- und Betonschichten eine Systemprüfung vor. Ziel der Systemprüfung ist eine realitätsnahe Probekörperprüfung des instand zusetzenden Bauwerks. Der Grundkörper aus Beton, entsprechend einer zu bestimmenden Altbetonklasse, spiegelt das gerissene Bauwerk wider. Die Instandsetzungsschicht aus Textilbeton wird in einem weiteren Schritt aufgebracht. Im Bereich des Risses im Betonuntergrund ist ein Enthftungsmaterial anzubringen, um eine Rissverteilung in der Instandsetzungsschicht kontrolliert zu ermöglichen. Die Systemprüfung besteht aus vier aufeinanderfolgenden Prüfungen zur Applizierbarkeit, Haftzugfestigkeit, Rissverteilung und Haftzugfestigkeit nach Rissaufweitung [BAW19a]. Diese Systemprüfung ist mit bestimmten Abweichungen an einem Grundprobekörper für zwei Rissüberbrückungsprobekörper (RÜPK) durchgeführt worden. Im Folgenden werden die wichtigsten Schritte zur Herstellung der Probekörper und Durchführung der Prüfung aufgeführt und es werden die Abweichungen benannt.

Die Herstellung des erforderlichen Grundkörpers erfolgte in einer nichtsaugenden Schalung aus Furnier-Sperrholzplatten mit glatter Phenolharzfilmbeschichtung und Innenabmessungen von  $700 \times 500 \times 60 \text{ mm}$  (L x B x H). Der verwendete Beton entsprach mit einer mittleren Druckfestigkeit von  $57,1 \text{ N/mm}^2$  und einer mittleren Abreißfestigkeit von  $1,54 \text{ N/mm}^2$  einem Altbeton der

Klasse A4 nach ZTV-W LB 219. Die Sollbruchstelle (Nachbildung des Bauteilrisses) wurde durch Brechen an einer mittig eingeschnittenen vier Millimeter breiten und 20 mm tiefen Nut parallel zur kurzen Seite erzeugt. Die Oberfläche wurde mit einer Druckluft-Nadelpistole für die spätere Spritzbetonapplikation aufgeraut, sodass eine Rautiefe  $\leq 1,0$  mm erreicht wurde.

Für die Herstellung des Verbundkörpers wurden entsprechend der Empfehlungen des BAW-Merkblattes temporär drei Gewindestangen durch bereits einbetonierte PVC-Schläuche geführt und mit 9 Nm Spannkraft verschraubt, um einer Schädigung der Textilbetonschicht während der Weiterverarbeitung vorzubeugen. Die zu beschichtende Betonoberfläche wurde gereinigt und 24 Stunden vor der Spritzbetonapplikation mit wassergesättigten Tüchern befeuchtet. Das Enthäftungsmaterial (Kleband,  $d = 1,2$  mm auf Polymerbasis, vgl. DT-1 in [Mor20]) wurde entsprechend der Rissüberbrückungsklasse II (RÜK) nach BAW-MITEX mit einer Breite von 120 mm symmetrisch über den Riss geklebt. Die Breite des Enthäftungsbereichs ist in Abhängigkeit der Maschenweite zu wählen, woraus sich auch die Breite der Probekörper sowie die Anzahl der Rovings je Textilage ergeben (vgl. Tab. 4 in [BAW19a]). Die Rissüberbrückungsklasse II entspricht einer maximalen Rissbreitenänderung des zu überbrückenden Risses am Bauwerk von  $\Delta w_{op} \leq 0,3$  mm. Zum Erreichen der RÜK II ist bei der Systemprüfung eine minimale Rissaufweitung von  $w_{min,lab} = 0,45$  mm erforderlich [BAW19a].

Die Spritzapplikation erfolgte mit PAGEL TW 20 Trinkwassermörtel im Nassverfahren am nahezu senkrecht stehenden Probekörper. Es wurden drei Lagen Spritzmörtel sowie zwei Lagen Textilgelege verwendet. Die gesamte Schichtdicke der Instandsetzungsschicht betrug  $22 \pm 2$  mm. Das Textilgelege bestand aus zweifach getränkten SGL Sigrafil® C T50-4.4/255-E100 Carbonrovings in Kettrichtung und einfach getränkten Tenax®-E STS40 F13 24K TF13 Carbonrovings in Schussrichtung. Als Tränkungsmaterial wurde KSE 100 o. L. verwendet. Die Maschenweite zwischen den Schussrovings betrug 18 mm und 15 mm zwischen den Kettrovings. Der Zuschnitt des Verbundprobekörpers erfolgte entsprechend des BAW-Merkblattes MITEX. Bild 3-24 zeigt die zuge schnittenen Rissüberbrückungsprobekörper in der Seitenansicht.

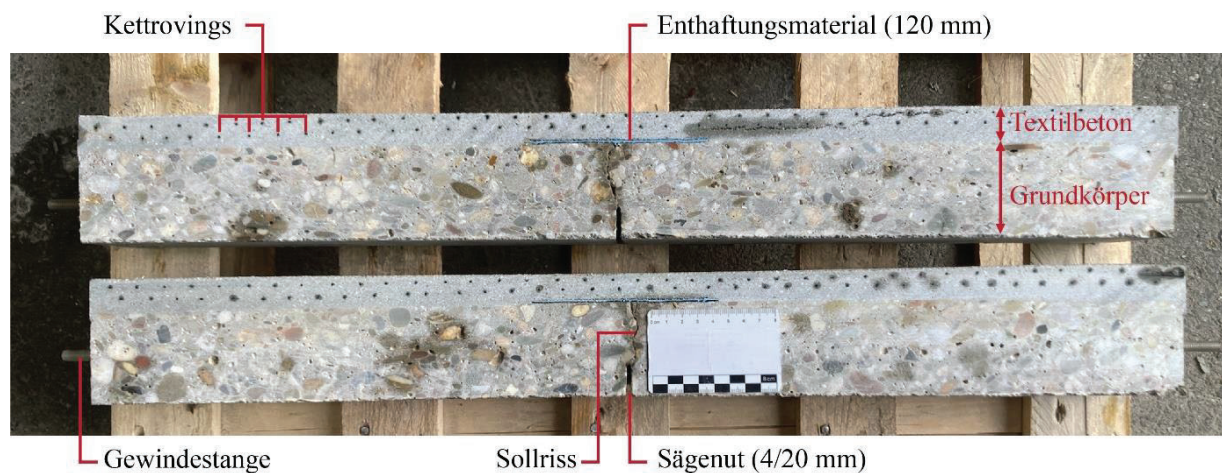


Bild 3-24: Längsschnitt der Rissüberbrückungsprobekörper (gesägt aus Verbundprobekörper)

Die beiden Rissüberbrückungsprobekörper wurden auf eine Breite von 90 mm gesägt, auf die sich zwölf Schussrovings in zwei Lagen verteilten. Der Bewehrungsgrad lag bei circa 1,2 %. Die Prüfung zur Applizierbarkeit erfolgte am vorgegebenen Längssägeschnitt sowie im Bereich der Haftzugproben. Die Prüfungen zur Haftzugfestigkeit vor und nach der Rissaufweitung wurden entsprechend des Merkblattes durchgeführt [BAW19a].

Die Rissverteilungsprüfung (Rissaufweitung) erfolgte entsprechend des BAW-Merkblattes MITEX in einer Prüfvorrichtung am Institut für Baustoffforschung der RWTH Aachen University (IBAC), die auch für die Untersuchungen in [Mor20] verwendet wurde. Für die Prüfung wurden die Rissüberbrückungsprobekörper auf zwei Trägerplatten geklebt. Der zu prüfende Riss im Grundkörper muss sich zwischen den Platten befinden. Bild 3-25 zeigt den schematischen Prüfaufbau sowie einen eingebauten Rissüberbrückungsprobekörper in der Prüfmaschine.

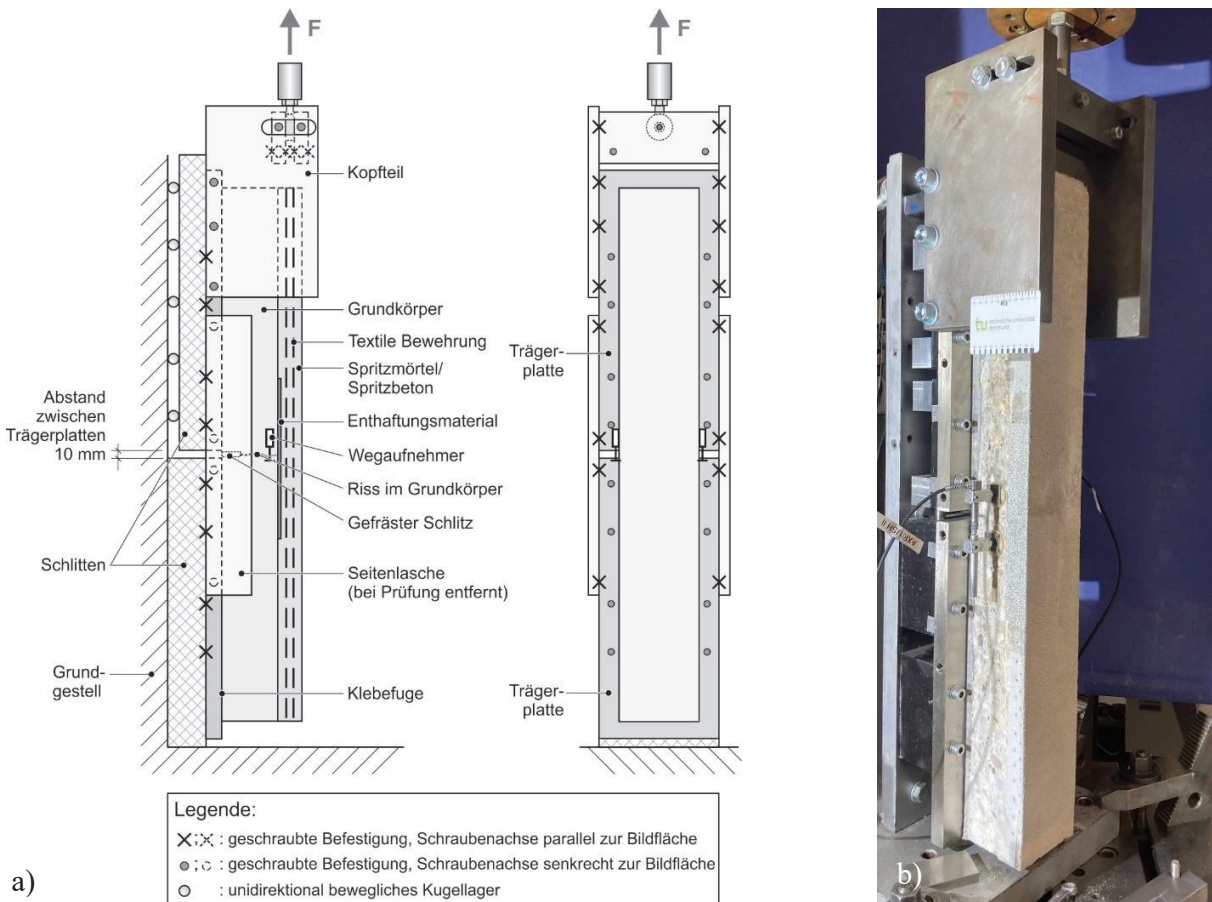


Bild 3-25: a) Schematischer Aufbau der Prüfeinrichtung zur Rissverteilung der Rissüberbrückungsprobekörper [BAW19a], b) Fotoaufnahme eines eingebauten Rissüberbrückungsprobekörpers in der Prüfeinrichtung

Bei der Rissüberbrückungsprüfung wurde in der Zugprüfmaschine mit verfahrbarem Schlitten die Zugkraft weggesteuert über die obere Trägerplatte mit einer Geschwindigkeit von  $0,05 \pm 0,01$  mm/min eingeleitet. Der Zugversuch wurde entsprechend der ausgewählten Rissüberbrückungsklassen bis zu einer maximalen Rissaufweitung durchgeführt. Die gemessene Rissaufweitung  $w_{GK,WA}$  ergab sich aus dem Mittelwert der beiden induktiven Wegaufnehmer (siehe Bild



3-25). Neben der Rissaufweitung wurde die Zugkraft dokumentiert. Die Einzelrissvermessung erfolgte auf einer Seite des Probekörpers über einen 200 mm langen Messbereich mittels optischem 3D-Messsystem (siehe Abschnitt 3.3.2 Photogrammetrische Messtechnik). Zum Einsatz kam das Messsystem GOM Aramis® M5. Durch den 200 mm langen Messbereich wurde auch der Übergang des Enthftungsmaterials zum direkten Verbund zwischen Textilbeton- und Grundkörperschicht erfasst. Die Rissvermessung erfolgte abweichend vom BAW-Merkblatt nicht über die Mittelung der Rissbreite über 5 Hilfslinien, sondern alle Einzelrisse wurden an der jeweils breitesten Stelle gemessen. Weitere detaillierte Beschreibungen zur Prüfung der Rissverteilung an Verbundprobekörpern nach dem BAW-Merkblatt MITEX können [BAW19a, Mor20] entnommen werden.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche zur flächigen Instandsetzung von Wasserbauwerken mit textilbewehrten Mörtel- und Betonschichten entsprechend der Systemprüfung nach dem BAW-Merkblatt MITEX wurden mit folgenden Abweichungen durchgeführt:

- Es wurde aus Gründen der Verarbeitbarkeit keine quadratische Maschenweite verwendet und die Textilfeinheit der Schussfäden wurde reduziert.
- Die geforderte Mindestdicke der Instandsetzungsschicht von 35 mm wurde mit einer Dicke von  $22 \pm 2$  mm unterschritten.
- Eine gleichmäßige Aufteilung der Feinbetonschichten zwischen den Textilgelegen konnte mit der Spritzapplikation nicht realisiert werden.
- Es wurden keine vier Verbundprobekörper hergestellt. Aus einem Verbundprobekörper wurden zwei Rissüberbrückungsprobekörper hergestellt.
- Die Breite des Enthftungstreifens entspricht mit 120 mm unter Berücksichtigung der gewählten Maschenweite der RÜK II. Die Versuche wurden mit einer Rissaufweitung für RÜK III und RÜK IV bzw. bis zum Versagen durchgeführt.



## 4 Ergebnisse der einaxialen Zugversuche an Dehnkörperproben und am Faserstrang

### 4.1 Einaxiale Zugversuche an Dehnkörperproben

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse zum Einfluss der unterschiedlichen Tränkungen auf die verwendeten textilen Bewehrungsmaterialien in Dehnkörperzugversuchen betrachtet. Ziel der einaxialen Zugversuche an Dehnkörperproben ist die Beurteilung von Zug- und Verbundtragverhalten mit Bezug auf Einzerrissbreiten, Rissanzahl und daraus resultierende Rissabstände. Untersucht wurden AR-Glas-, Basalt- und Carbonrovings im ungetränkten Zustand und mit KSE 100-Tränkung. Die Variation der Tränkungsmaterialien mit KSE 100, KSE 300, KSE 500E und KSE 100 o. L. sowie Einfach- und Zweifachtränkungen erfolgten an Carbonrovings (Sigrafil® CT50-4.4/255-E100).

#### 4.1.1 Zugtragverhalten – Spannungs-Dehnungsbeziehung

Das Zugtragverhalten der Dehnkörperproben wird über Spannungs-Dehnungsbeziehungen dargestellt. Die in den Versuchen gemessene Zugkraft wird entsprechend Gleichung (3-2) als Textilzugspannung der Dehnkörperproben ( $\sigma_{DKP}$ ) über die photogrammetrisch gemessene Dehnung der Probekörper abgebildet. Durch die Bezugsgröße der Textilzugspannung sind auch Prüfserien mit unterschiedlichem Bewehrungsgrad vergleichbar, wie es bei den AR-Glas-, Basalt- und Carbonroving-Untersuchungen der Fall ist. Die einzelnen Messwerte einer Prüfserie werden entsprechend den Erläuterungen zur Mittelwertbildung (siehe Abschnitt 3.3.2) dargestellt, wie in Bild 4-1 a) und b) abgebildet.

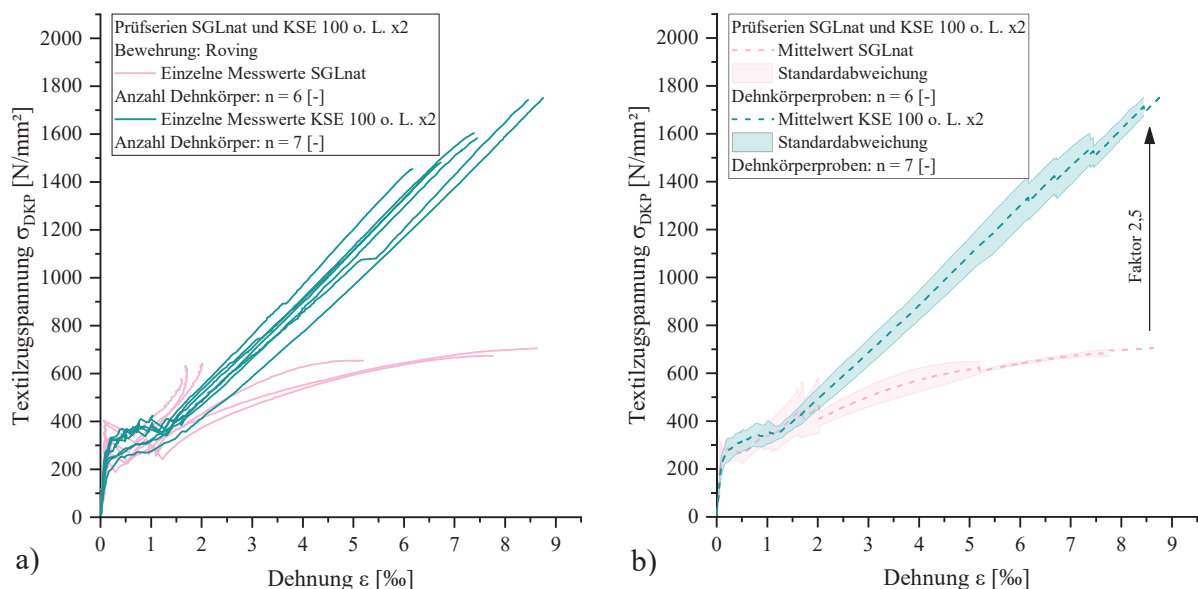


Bild 4-1: Spannungs-Dehnungsbeziehung von Dehnkörperproben mit ungetränkten und KSE 100 o. L. x2 getränkten Rovings, a) Einzelmesswerte über den ganzen Messbereich, b) Mittelwertkurven mit SD

In Bild 4-1 a) sind die Einzelmessungen der Prüfserien mit ungetränkten SGL-Rovings (SGLnat) und KSE 100 o. L. x2 Rovings dargestellt. Beide Prüfserien sind im ungerissenen Zustand I durch

einen steilen Anstieg der Zugspannung geprägt, wobei die Erstrissspannung variiert. Auch innerhalb der jeweiligen Prüfserien ist ein Unterschied der Erstrissbildung festzustellen, was auf Streuungen der Feinbetonzugfestigkeit und Ungenauigkeiten beim Probeneinbau zurückzuführen ist. Die Prüfserie SGLnat ist in zwei Chargen à drei Probekörper hergestellt worden, die Prüfserie KSE 100 o. L. x2 in zwei Chargen à vier Probekörper, wobei ein Probekörper Defekte aufwies. Für den Feinbeton Pagel TF 10 wird seitens des Herstellers eine maximale Lagerungszeit von zwölf Monaten angegeben. Innerhalb dieses Zeitraums wurde eine variierende Viskosität des angemischten Feinbetons bei gleichem Wassergehalt festgestellt, wodurch die Betonzugfestigkeiten einzelner Prüfserien unterschiedlich ausfallen.

KSE 100 o. L. x2 Dehnkörper weisen gegenüber Probekörpern mit ungetränkten Rovings eine um den Faktor 2,5 höhere Zugfestigkeit auf und versagten alle durch einen teleskopartigen Bruch der textilen Bewehrung. Die Probekörper mit ungetränkten Rovings weisen ein Bruchbild mit teilweise gerissenen Filamenten und anschließendem Auszug auf. Bei drei der sechs SGLnat-Proben liegt der Bruch außerhalb des Messbereichs, sodass die gemessene Dehnung bei circa zwei Promille und geringfügiger Laststeigerung bis zum Faserauszug stagniert. Bei den anderen drei SGLnat-Proben ist der Auszug der inneren Filamente durch den großen Dehnungszuwachs ohne signifikante Laststeigerung zu beobachten (siehe Bild 4-1a)).

Der Spannungsabfall im Rissbildungszustand (IIa) fällt bei den SGLnat-Proben sehr deutlich aus. Im untersuchten Dehnbereich sind maximal zwei Risse aufgetreten. Mit der Rissbildung geht ein direkter Schlupf der inneren Filamente einher. Die geringen Laststeigerungen sind auf einem verbleibenden Reibungsverbund der Filamente zurückzuführen. Ein Übergang in einen linearen Lastanstieg im Zustand IIb findet nicht statt.

Bei der Prüfserie KSE 100 o. L. x2 sind wenig ausgeprägte Spannungsrückgänge infolge der Rissbildung (IIa) zu verzeichnen. Bei den drei Proben mit geringerer Erstrisslast ist kaum ein Spannungsrückgang zu beobachten. Der typische Spannungsverlauf von Dehnkörperproben aus Textilbeton mit den Zuständen I über IIa zu IIb zeigt sich bei allen Proben der Prüfserie KSE 100 o. L. x2. Im Zustand IIb weisen die Dehnkörperproben mit KSE 100 o. L. x2 getränkten Rovings einen annähernd gleichen Steifigkeitsverlauf auf. Die unterschiedlichen Bruchspannungen im Bereich von 1.400 bis 1.800 N/mm<sup>2</sup> sind auf die Verwendung von acht Einzelrovings zurückzuführen sowie auf die unterschiedliche Geometrie der getränkten Rovings, wie in Abschnitt 5.1 weiter erläutert wird. Durch die Verwendung von Einzelrovings besteht gegenüber Textilgelegen eine höhere Wahrscheinlichkeit, dass einzelne Rovings unterschiedlich stark belastet werden und ein stufenartiges Versagen zu Streuungen innerhalb der Bruchspannungen führen kann.

Bild 4-1 b) zeigt die Mittelwertkurven der Spannungs-Dehnungsbeziehung von den Prüfserien SGLnat und KSE 100 o. L. x2. Die Detailausprägungen der Einzelmesswertkurven sind den Mittelwerten nicht mehr exakt zu entnehmen. Die Betrachtung von Mittelwertkurven ermöglicht aber eine übersichtlichere Vergleichbarkeit unterschiedlicher Prüfserien. Wie in Abschnitt 3.3.2 erläutert, sind die Spannungsabfälle in den Mittelwertkurven, wie in Bild 4-1 b), bei sechs bis acht Promille an der KSE 100 o. L. x2 Linie zu sehen. Sie sind nicht auf weitere Risse im Probekörper

zurückzuführen, sondern entstehen durch die Mittelwertbildung. Darstellungen von Einzelmesswerten sind für alle Prüfserien im Anhang A2 aufgeführt.

In Bild 4-2 a) sind die Mittelwertkurven der Spannungs-Dehnungsbeziehung von AR-Glas-, Basalt- und Carbonrovings in ungetränkter und mit KSE 100 getränkter Ausführung dargestellt. Die Kurvenverläufe der ungetränkten Proben weisen einen typischen Verlauf mit steilem Lastanstieg in Zustand I auf. Die charakteristischen Zustände IIa und IIb stellen sich bei keiner der ungetränkten Prüfserien ein. Das liegt daran, dass durch den Textilschlupf die Dehnkörper mit ungetränkten Basaltrovings keine Laststeigerung nach dem Erstriss erfahren. Bei den Proben mit ungetränkten Carbonrovings fällt die Laststeigerung nach Erstriss gering aus. Einzig die AR-Glas-Proben weisen einen kurzen steilen Anstieg der Spannung auf, bevor ein teleskopartiges Ausziehen bei Erreichen der Bruchspannung eintritt.

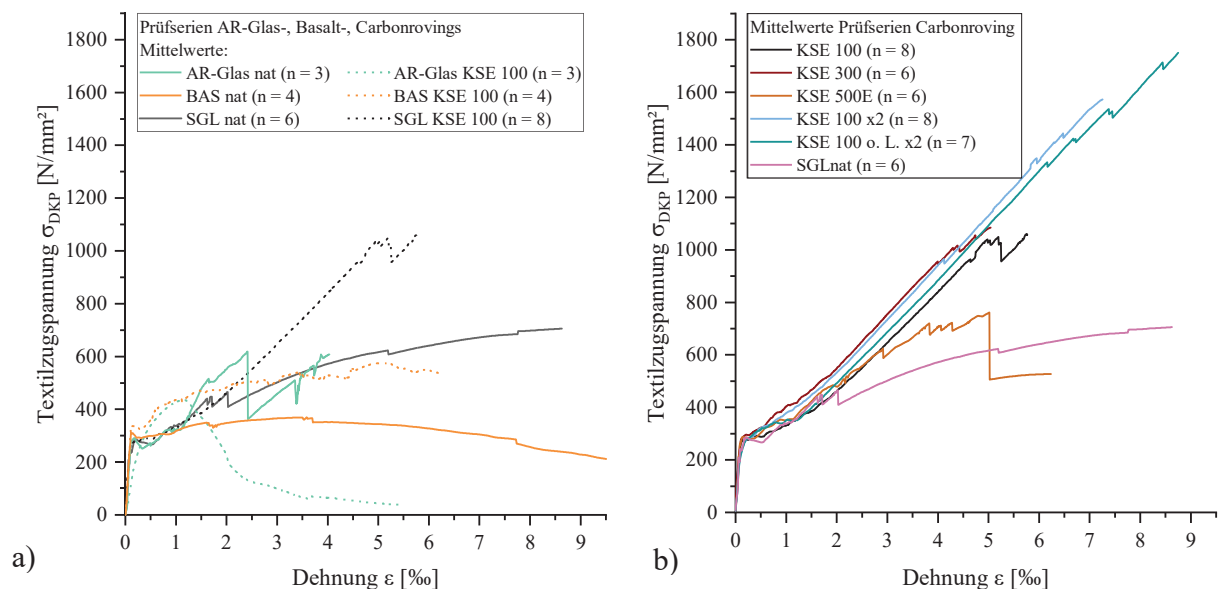


Bild 4-2: Mittelwertkurven der Spannungs-Dehnungsbeziehung von Dehnkörperproben, a) AR-Glas-, Basalt- und Carbonrovings mit KSE 100-Tränkung, b) Carbonrovings mit unterschiedlicher KSE-Tränkung

Der BAS KSE 100 Prüfserie widerfährt während der Rissbildung eine leichte Spannungssteigerung und kontinuierliche Dehnung, sodass keine charakteristischen Zustände IIa und IIb eintreten. Insgesamt liegt das Spannungsniveau der BAS KSE 100 Dehnkörper über den ungetränkten Proben. Die Rissbildung der Prüfserie SGL KSE 100 zeigt einen typischen Verlauf im Zustand IIa und IIb mit einer linearen Spannungssteigerung. Die Spannungs-Dehnungslinie der AR-Glas KSE 100 Prüfserie weist einen atypischen Verlauf auf. Die Dehnkörper versagten durch einen mittigen Riss, der während der Laststeigerung kontinuierlich über die Probekörperbreite einwuchs, wodurch ein typischer Spannungsverlust ausblieb. Die AR-Glas KSE 100 Proben sind durch die Textiltränkung mit Kieselsäureester weniger tragfähig und weisen weniger Risse auf als ohne Tränkung. In Tabelle 4-1 sind die Ergebnisse der Dehnkörperversuche mit unterschiedlichen textilen Bewehrungen zusammengefasst.

Im Vergleich zu den Carbonproben mit einem Bewehrungsgrad von 1,46 % ist der Bewehrungsgrad der Dehnkörper mit Basalt (1,01 %) und AR-Glas (0,67 %) geringer, wodurch beim Eintritt des Erstrisses eine größere Spannung auf einen geringeren Textilquerschnitt wirkt. Dadurch können entsprechend stärkere Schädigungen der Rovings nicht ausgeschlossen werden, die eine weitere Laststeigerung beeinträchtigen. Aus Gründen der Verarbeitbarkeit konnten mit den vorhandenen Rovings keine höheren Bewehrungsgrade bei der Dehnkörperherstellung mit AR-Glas und Basalt realisiert werden.

Tabelle 4-1: Prüfsreihe I – Dehnkörperproben mit Textilvariation ungetränkt und mit KSE 100-Tränkung – Bruchlast, Bruchspannung und Rissanzahl

Tränkung	Bruchlast $F_u$ [kN]	Bruchspannung $\sigma_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Rissanzahl <sup>1)</sup> [-]	Anzahl Proben [-]
SGL nat	9,9 ± 0,7	658 ± 43	1,5 ± 0,5	6
SGL KSE 100	16,2 ± 1,3	1054 ± 84	16 ± 1,6	8
BAS nat	3,9 ± 0,2	374 ± 22	3,0 ± 1,5	4
BAS KSE 100	5,7 ± 0,4	541 ± 34	9,0 ± 2,9	4
AR-Glas nat	4,8 ± 1,2	680 ± 173	3,7 ± 0,6	3
AR-Glas KSE 100	3,1 ± 0,2	436 ± 35	1,0 ± 0,0	3

<sup>1)</sup> Bezug auf 300 mm freie Weglänge, äußerste Randschraube nicht erfasst.

Lagerung 24 h in der Schalung, 6 Tage Wasserbad bei 20 °C, 21 Tage Klimaschrank (20 °C / 65 % r. F.)

Die Untersuchungen an den verschiedenen textilen Bewehrungsmaterialien zeigen, dass eine mineralische Tränkung auf Basis von Kieselsäureester bei Carbonrovings das größte Potential bietet. Die weiteren Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurden daher mit der Carbonendlosfaser SGL Sigrafil® CT50—4.4/255-E100 durchgeführt. Aus Gründen der vereinfachten Lesbarkeit wird weitestgehend auf den Zusatz SGL in der Prüfserienbeschreibung verzichtet, wie auch der Tabelle 3-4 zu entnehmen ist.

Bild 4-2 b) zeigt die Spannungs-Dehnungsbeziehung der Prüfserien mit Variationen von Tränkungsmaterial und Tränkungshäufigkeit. Als Referenzgröße ist die Prüfserie mit ungetränktem Carbonroving dargestellt. Die Prüfserien mit den unterschiedlichen mineralischen Tränkungen weisen alle einen steilen Spannungsanstieg im Zustand I auf und gehen mit dem Erstriss im Bereich von 250 bis 300 N/mm<sup>2</sup> in die Rissbildungsphase (Zustand IIa) über. Während der Rissbildungsphase liegt bei allen Prüfserien eine Spannungssteigerung vor, die der OH-Theorie entspricht (siehe Abschnitt 2.2.2). Mit Ausnahme der Prüfserie KSE 500E findet die Rissbildung unter geringen Spannungsabfällen statt (siehe auch Spannungs-Dehnungsdiagramme der einzelnen Prüfserien in Anhang A2). Daraus folgt eine Mehrfachrissbildung mit geringen Rissbreiten, deren genaue Betrachtung in Abschnitt 4.1.2 erfolgt.

Bei den Prüfserien mit KSE 100- und KSE 300-Tränkungen liegt die Bruchspannung im Bereich von 1.000 N/mm<sup>2</sup>. Die Ergebnisse bestätigen erste Untersuchungen zu Dehnkörperversuchen mit KSE-getränkten Rovings, die in [Len20] veröffentlicht sind. Auf Basis der ermittelten Zugtragfähigkeiten wurde das weitere Versuchsprogramm auf KSE 100-Tränkungen aufgebaut und im späteren Verlauf auf das für diese Arbeit entwickelte Tränkungsmaterial KSE 100 ohne Lösemittel (KSE 100 o. L.) ausgeweitet.

Die Prüfserien mit zweifach getränkten Rovings weisen höhere Zugfestigkeiten auf, wie die Kurven KSE 100 x2 und KSE 100 o. L. x2 in Bild 4-2 b) zeigen. Eine positive Auswirkung der Mehrfachtränkung ist unabhängig von der Menge des Tränkungsmaterials, welches aufgrund der unterschiedlichen Gelabscheidungen von KSE 100 und KSE 100 o. L. in der Rovingmatrix enthalten ist, zu beobachten (siehe Tabelle 3-2 zur Gelabscheidung). Die unterschiedlichen Tränkungsmaterialien und die Tränkungshäufigkeit beeinflussen auch die Form des Rovingquerschnitts, welche einen wesentlichen Beitrag zum Verbundverhalten leistet (siehe Abschnitt 5.1). KSE 100 o. L. x2 Probekörper weisen mit  $1.595 \pm 114 \text{ N/mm}^2$  die höchste Zugspannung der untersuchten Dehnkörperproben mit mineralisch getränkten Rovings auf.

Eine Zusammenstellung der Ergebnisse zur Zugtragfähigkeit aus den Dehnkörperzugversuchen mit Kieselsäureester getränkten Carbonrovings und aus den Betrachtungen zur Rissbildung und zu Rissbreiten, die im Folgenden erläutert werden, ist in Tabelle 4-2 in Abschnitt 4.3 aufgeführt.

#### 4.1.2 Rissbildung / Rissbreiten

Das Rissverhalten der Dehnkörperproben im einaxialen Zugversuch wurde mit der in Abschnitt 3.3.2 beschriebenen photogrammetrischen Messtechnik analysiert. Die Rissbreitenmessung erfolgte an der jeweils größten Rissbreite der Einzelrisse. In Rissbreiten-Spannungs-Diagrammen sind die Rissbreiten der Einzelrisse als zusammengefasste linearisierte Graphen dargestellt. Grafiken mit den Einzelrissen jeder Prüfserie sind in Anhang A2 aufgeführt.

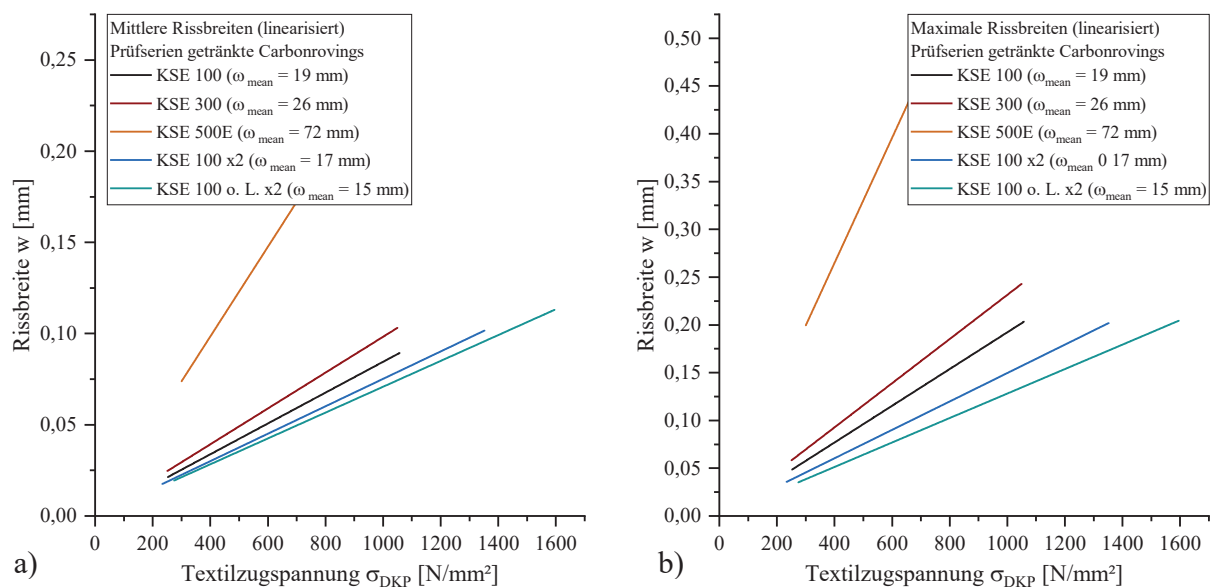


Bild 4-3: Linearer Verlauf der Rissbreiten-Spannungsbeziehung von Dehnkörperproben mit unterschiedlich getränkten Rovings, a) mittlere Rissbreiten, b) maximale Rissbreiten

In Bild 4-3 sind die linearisierten Graphen für die mittlere Rissbreite a) und die maximale Rissbreite b) von allen Prüfserien mit KSE-Tränkung aufgeführt. Auf die Darstellung der Rissbreiten von Dehnkörperproben mit ungetränkten Carbonrovings und getränkten AR-Glas- und Basaltrovings wurde aufgrund der geringen Rissanzahl verzichtet. Die Entwicklung der Rissbreiten weist einen Zusammenhang zur Zugtragfähigkeit auf. Ein besseres Verbundverhalten führt zu geringeren

Rissabständen aufgrund der höheren Rissanzahl, aus denen sich die geringeren Rissbreiten ergeben. Bild 4-3 zeigt, dass die kritische Rissbreite für die Rissheilung von 0,10 mm mit Ausnahme der Prüfsérie KSE 500E bei den mittleren Rissbreiten zwischen 900 und 1.500 N/mm<sup>2</sup> erreicht wird.

Bei den Prüfserien mit zweifach getränkten Rovings (KSE 100 x2 und KSE 100 o. L. x2) treten gegenüber den Prüfserien KSE 100 und 300 mit einfach getränkten Rovings bei gleicher Textilzugspannung geringere Rissbreiten auf (siehe Bild 4-3). Wie bereits bei den Ergebnissen zum Zugtragverhalten der Dehnkörperproben erläutert, beeinflusst das Verbundverhalten aufgrund der Rovinggeometrie infolge des Tränkungsmaterials und der Tränkungshäufigkeit das Rissverhalten der Dehnkörperproben. Im Vergleich aller Prüfserien weisen die KSE 100 o. L. x2 Proben den geringsten mittleren Rissabstand von 15 mm und die kleinsten mittleren und maximalen Rissbreiten auf. Die maximalen Rissbreiten der relevanten Prüfserien überschreiten den Wert von 0,10 mm unter Textilzugspannungen um 800 N/mm<sup>2</sup> (Bild 4-3 b)).

Einen Zusammenhang zwischen mittlerer Rissbreite und der für die Gebrauchstauglichkeit maßgebenden maximalen Rissbreite wurde in [Han15, Mor20] betrachtet. HANSL beschreibt auf Basis experimenteller einaxialer Zugversuche an Dehnkörperproben mit SBR-Textilgelegen den Ansatz eines mathematischen Modells zur direkten Berechnung des maximalen Risses. Aus dieser Berechnung geht vereinfacht der Faktor 1,5 zwischen mittlerer und maximaler Rissbreite hervor [Han15]. MORALES hat am Beispiel von einaxialen Zugversuchen an Dehnkörperproben mit EP-imprägnierten Textilgelegen anhand von 58 Probekörpern einen Faktor für den oberen Grenzwert von 2,5 zwischen mittlerer und maximaler Rissweite ermittelt [Mor20]. Für mineralische Tränkungsmaterialien sind keine Untersuchungen bekannt, weshalb auf Basis der Rissbreiten aus 56 Dehnkörperproben in Anlehnung an die Untersuchungen von MORALES ein Faktor bestimmt wird. Die betrachteten Rissbreiten wurden kurz vor dem Versagen der Dehnkörperproben erfasst. Bild 4-4 zeigt die Einzelwerte der maximalen Rissbreiten in Bezug auf die mittlere Rissbreite der jeweiligen Dehnkörperprobe. Die rote Linie beschreibt den Verhältniswert nach HANSL und die gestrichelten schwarzen Linien zeigen die ermittelten Grenzen des Verhältniswertes auf. Die untere Linie entspricht einem Faktor von 1,2, die obere Grenze kann bei einem Faktor von 2,2 gesetzt werden, wodurch nur drei Messwerte außerhalb der Grenzen liegen. Für Dehnkörperproben der Prüfsérie KSE 100 o. L. x2 deckt ein Faktor von 1,9 das Verhältnis von mittlerer zu maximaler Rissbreite ab. Der Faktor von 1,5 entspricht nur bei 50 % der Proben dem Verhältnis.

Für die Gebrauchstauglichkeit ist die Unterschreitung der Rissbreite von 0,10 mm maßgebend, um eine Rissheilung zu ermöglichen. In Bezug auf Untersuchungen an Rissüberbrückungsprobekörpern (siehe Abschnitt 6.2.2) lässt sich aus den Ergebnissen von MORALES ableiten, dass in Dehnkörperproben Rissbreiten < 0,10 mm im Bereich von Textilzugspannungen bis 1.000 N/mm<sup>2</sup> anzustreben sind [Mor20], damit das Instandsetzungssystem bis zum GZG funktioniert. Aus den eigenen Ergebnissen zur Zugtragfähigkeit und Rissbildung ist abzuleiten, dass die Prüfserien KSE 100 x2 und KSE 100 o. L. x2 für ein mögliches Instandsetzungssystem geeignet sind, da im Bereich von 1.000 N/mm<sup>2</sup> entsprechend geringe Rissbreiten vorliegen.



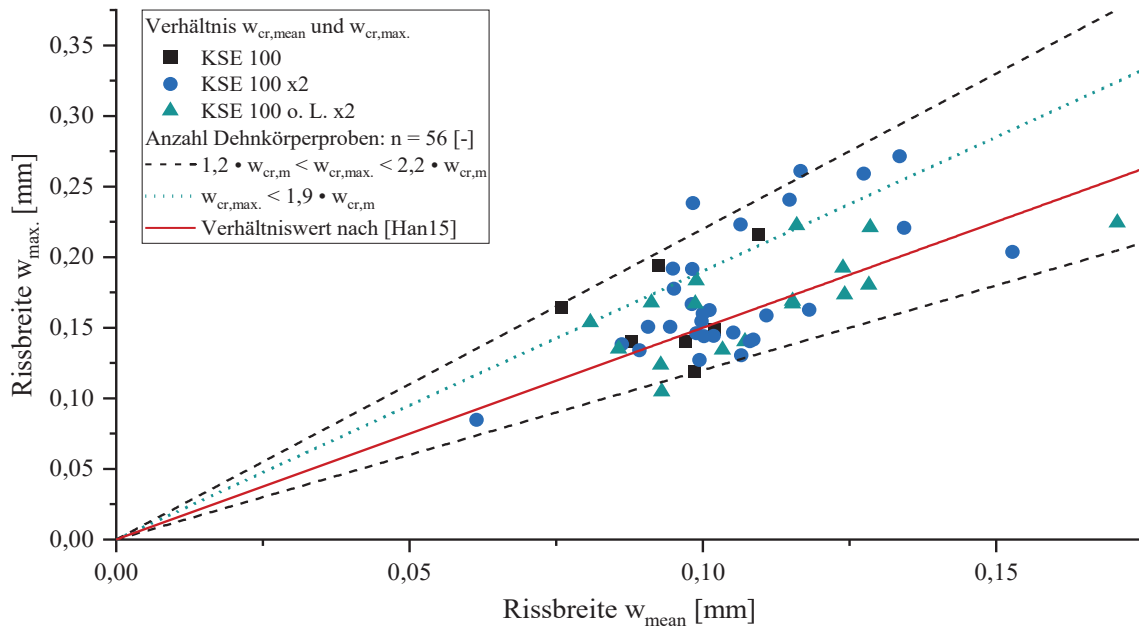


Bild 4-4: Darstellung des Verhältnisses von maximaler Rissbreite zu mittlerer Rissbreite von Dehnkörperproben mit mineralisch getränktem Carbonroving

Bild 4-5 fasst die Ergebnisse der Untersuchungen zur mittleren und maximalen Rissbreite sowie dem aus der Rissanzahl ermittelten mittleren Rissabstand zusammen. Tränkungsmaterial und Tränkungshäufigkeit zeigen eine deutliche Auswirkung auf das Rissverhalten der Verbundproben. Entsprechend einer unteren Grenze für die Gebrauchstauglichkeit sind in Bild 4-5 die Rissbreiten und Rissabstände bei einer Zugspannung der Dehnkörperproben von 1.000 N/mm<sup>2</sup> dargestellt.

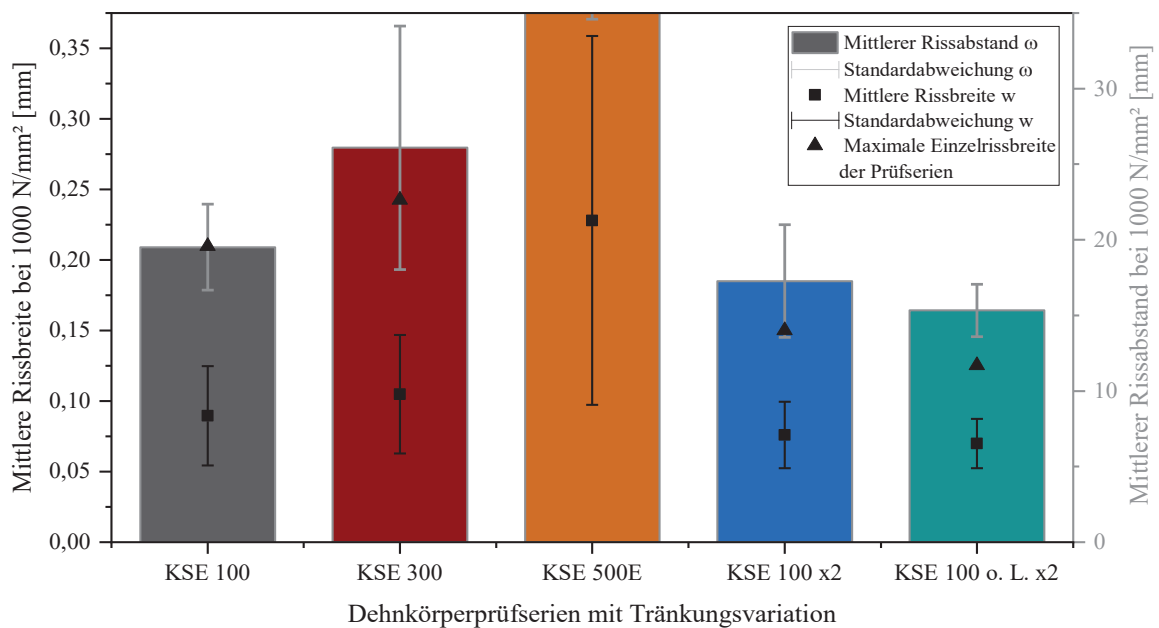


Bild 4-5: Mittlere Rissbreiten und mittlerer Rissabstand von Dehnkörperproben bei 1.000 N/mm<sup>2</sup> Zugspannung – Prüferien mit unterschiedlicher Rovingtränkung und Tränkungshäufigkeit

Für Textilbeton ist neben der primären Rissbildung im Zustand IIa auch eine sekundäre oder diffuse Rissbildung bekannt (siehe Abschnitt 2.2), die im Verlauf der linearen Spannungssteigerung im Zustand IIb auftritt. Der Übergang von Zustand IIa zu IIb stellt dann kein abgeschlossenes Rissbild dar und ist als Ende der primären Rissbildung zu bezeichnen. Bild 4-6 zeigt am Beispiel einer Dehnkörperprobe mit KSE 100 x2 getränkten Rovings verschiedene Stufen der Rissbildung anhand von 2D-Visualisierungen der Probekörperoberflächen mittels GOM Aramis.

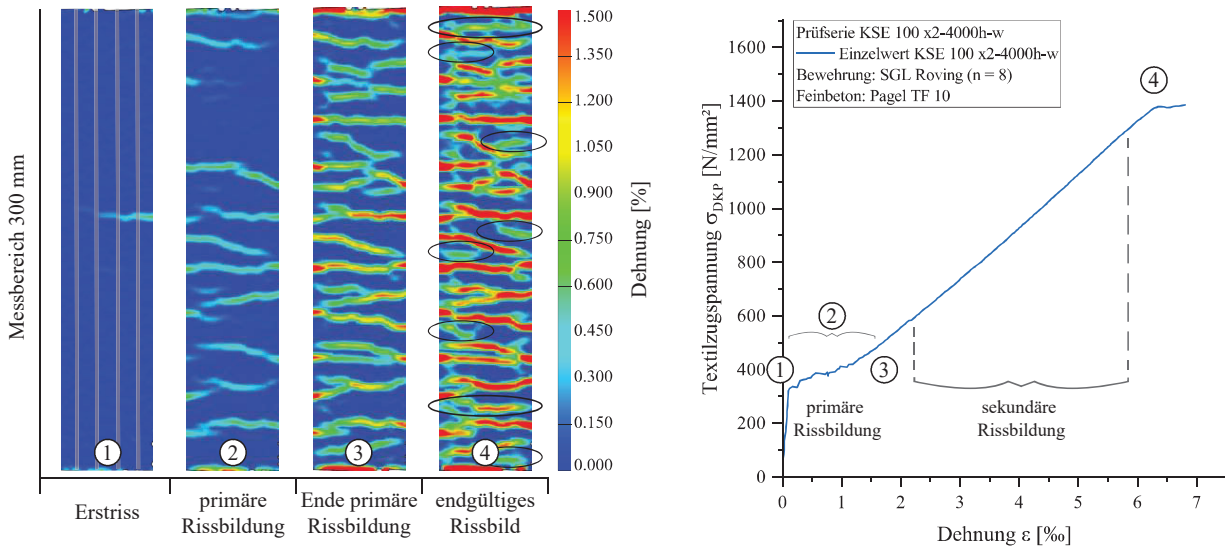


Bild 4-6: Entwicklung primärer und sekundärer (diffuser) Rissbildung einer Dehnkörperprobe mit KSE 100 x2 Rovings in Bezug zur Spannungs-Dehnungsline: (1) Erstriss, (2) primäre Rissbildung, (3) Ende primäre Rissbildung, (4) endgültiges Rissbild

Die erste Dehnungsdarstellung (1) zeigt die Entstehung des Erstrisses am Ende von Zustand I. Schematisch sind die Rovingstränge dargestellt. Darstellung (2) zeigt die primäre Rissbildung im Zustand IIa. Aufgrund der fehlenden Schussfäden gegenüber Textilgelegen sind die Risse überwiegend nicht exakt orthogonal zur Belastungsrichtung. Die Rissbildung wird durch mögliche Querschnittsveränderungen der Rovings über deren Länge und lokal unterschiedliches Verbundverhalten beeinflusst. Die dritte Darstellung der Dehnkörperprobe zeigt das Ende der primären Rissbildung am Übergang zu Zustand IIb (Bild 4-6 (3)). Im Laufe der linearen Spannungssteigerung im Zustand IIb entstehen sekundäre Risse. Am Beispiel der aufgeführten Dehnkörperprobe findet die diffuse Rissbildung im Dehnbereich von circa zwei bis sechs Promille statt. Der Dehnungsdarstellung (4) können die sekundären Risse (schwarze Ellipsen) entnommen werden. Es entsteht ein endgültiges Rissbild kurz vor dem Erreichen der Bruchspannung. Die sekundäre Rissbildung ist vorrangig bei Dehnkörperproben mit einem guten Verbundtragverhalten zu beobachten (KSE 100 x2 und KSE 100 o. L. x2).

### 4.1.3 Versagensmechanismen

Bei den einaxialen Zugversuchen an Dehnkörperproben mit ungetränkten und mineralisch getränkten Rovings konnten unterschiedliche Versagensmechanismen festgestellt werden. Am häufigsten tritt ein Versagen am Ende der freien Messlänge im Übergangsbereich zur Klemmvorrichtung auf, wie exemplarisch in Bild 4-7 a) dargestellt ist. Das seitliche Kippen der Klemmhalterung bzw. der Dehnkörperprobe lässt auf ein stufenartiges Versagen der einzelnen Rovings schließen. Unterschiedlich starke Belastungen oder Verbundeigenschaften der einzelnen Rovings können für dieses Versagen ursächlich sein.

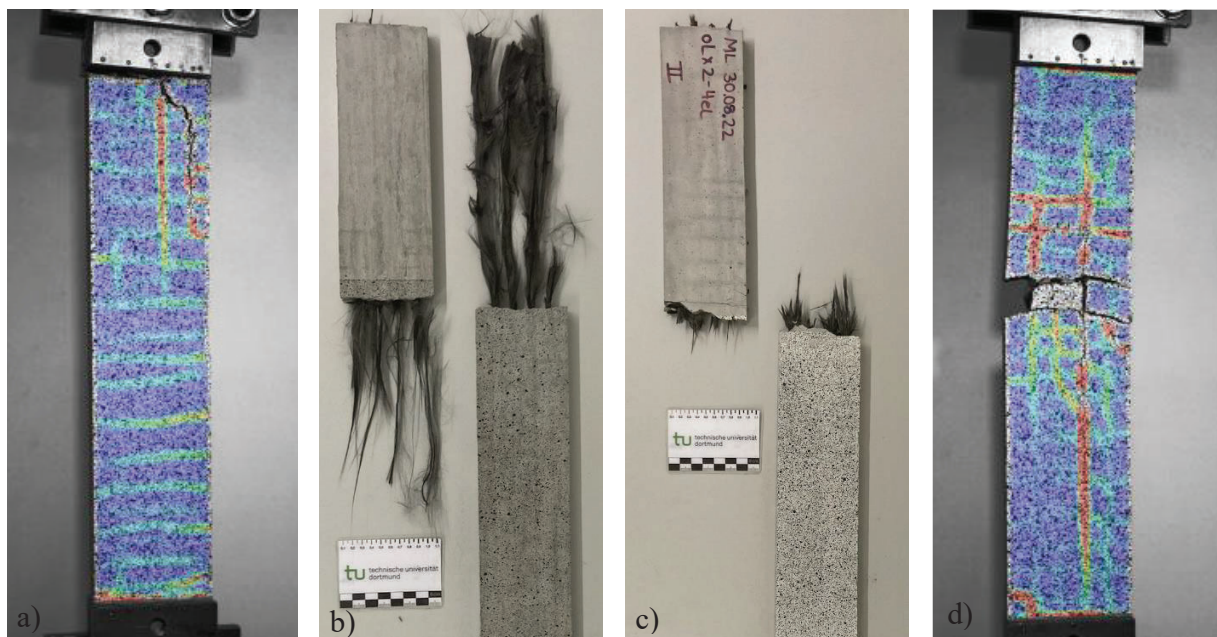


Bild 4-7: Versagenszustände und Bruchbild beim Erreichen der Bruchspannung, a) Versagen im Übergang zur Klemmvorrichtung (KSE 100), b) Bruchbild Mischversagen mit teleskopartigem Kernfaserauszug (KSE 100), c) Bruch der Bewehrung im Übergang zur Klemmvorrichtung (KSE 100 o. L. x2), d) Versagen mittig in der freien Weglänge (KSE 100 o. L. x2)

Das Bruchbild am Übergang zur Klemmung lässt sich je nach Verbundtragverhalten in zwei Versagensmechanismen unterscheiden. Bild 4-7 b) zeigt ein Mischversagen mit teleskopartigem Kernfaserauszug und Riss der äußeren Filamente. Ein guter Verbund der äußeren Filamente zur Feinbetonmatrix und ein geringerer innerer Verbund zwischen den Filamenten führen zu diesem Mischversagen. Diese Versagensart konnte bei den Prüfserien mit einfach getränkten Rovings beobachtet werden. Insbesondere bei KSE 300 und 500E sowie bei KSE 100 Prüfserien mit geringen Zugspannungen. Bild 4-7 c) zeigt den Bewehrungsbruch am Rand der freien Weglänge. Eine umfangreichere Durchtränkung durch zweifache Tränkungsapplikation führt bei den Prüfserien KSE 100 x2 und KSE 100 o. L. x2 zu diesem Bruchbild. Es besteht ein verbesserter Verbund der inneren Filamente gegenüber einfach getränkten Rovings. Bei den benannten Prüfserien mit verbesserten Verbundeigenschaften ist auch ein Versagen mittig in der freien Weglänge, wie in Bild 4-7 d) dargestellt, zu beobachten. Weitere Versagensmechanismen nach [Sch18a], wie die Längs-

rissbildung in der Bewehrungsebene, Betonabplatzungen oder Längsrissbildungen in der Klemmung traten bei den einaxialen Zugversuchen nicht auf. Längsrissbildungen in der Fläche mit seitlicher Betonabplatzung sind nur vereinzelt aufgetreten und können auf Lageungenauigkeiten einzelner Rovingstränge im Herstellungsprozess zurückgeführt werden.

#### 4.2 Faserstrangzugversuche

Die Faserstrangzugversuche haben zum Ziel, die Auswirkung der unterschiedlichen Tränkungs-materialien auf die Zugfestigkeit zu bestimmen. Diese stellt ein Maß zur Bewertung des inneren Verbundes dar. Aus einem Abgleich dieser Ergebnisse mit den Untersuchungen zur Zugtragfähigkeit der Dehnkörperproben kann eine Wechselwirkung zwischen Tränkungs-material und Betonmatrix untersucht werden. Die Faserstrangzugversuche wurden entsprechend der standardisierten Prüfungen durchgeführt (siehe Abschnitt 3.3.3).

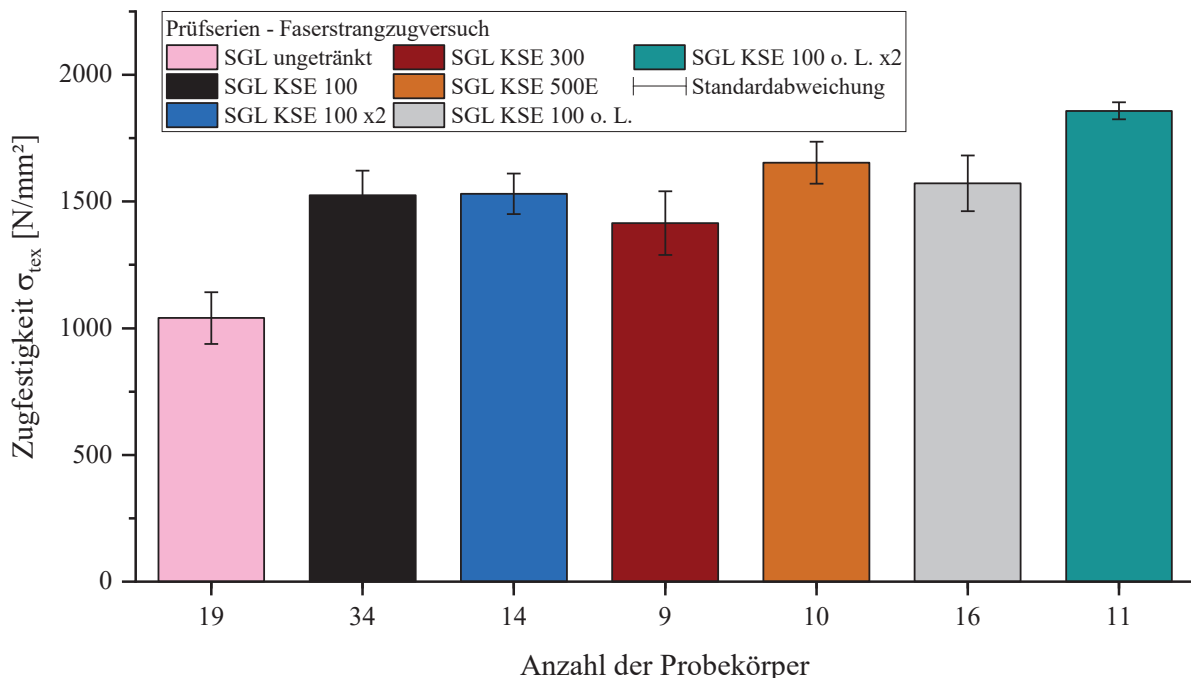


Bild 4-8: Zugfestigkeit  $\sigma_{\text{tex}}$  einzelner Rovings mit unterschiedlicher Tränkung

Als Referenz zur Wirksamkeit der unterschiedlichen Tränkungs-materialien dient die ermittelte Rovingzugfestigkeit ungetränkter Carbonrovings (Sigrafil® C T50-4.4/255-E100) mit  $\sigma_{\text{tex,SGLnat}} = 1.040 \pm 102 \text{ N/mm}^2$ . Den Herstellerangaben ist nur die Filamentzugfestigkeit von  $4.400 \text{ N/mm}^2$  für den ungetränkten Zustand zu entnehmen [SGL17]. Als Vergleichsgröße kann dieser Wert aufgrund der unterschiedlichen Prüfverfahren auf Makro- und Mesoebene nicht herangezogen werden (siehe Abschnitt 2.1.2). Die im Datenblatt angegebene Zugfestigkeit von  $2.000 \text{ N/mm}^2$  bezieht sich auf Epoxid-Prepreg Carbonendlosfasern (Sigrafil® C T50-4.0/240-E100) [SGL17].

Der ermittelte Wert für ungetränkte Rovings fällt höher aus als die im Verbundprobekörper erreichte Bruchspannung von  $\sigma_{\text{DKP,SGLnat}} = 658 \pm 43 \text{ N/mm}^2$ . Ein mäßiger Verbund der äußeren Fila-

mente und wenig Verbundkraft der inneren Filamente sowie eine für ungetränkte Rovings zu geringe Verankerungslänge führen zu geringeren Zugspannungen der Dehnkörperproben mit ungetränkten Carbonrovings.

Bei allen Prüfserien mit getränkten Rovings ist eine Steigerung der Zugfestigkeit gegenüber der Prüfserie mit ungetränktem Roving festzustellen (siehe Bild 4-8). KSE 100 getränkte Rovings weisen eine um circa 50 % höhere Zugfestigkeit auf. Zwischen der ein- und zweifachen Tränkung mit KSE 100 ist kein Unterschied in der Zugfestigkeit festzustellen. Die positive Wirkung der zweiten Tränkung ist erst anhand der Ergebnisse aus den einaxialen Dehnkörperzugversuchen festzustellen, da die Dehnkörperproben mit zweifachgetränkten Rovings Zugspannungen auf gleichem Niveau zur Zugfestigkeit der Faserstrangzugversuche erreichen. Einfach getränkten KSE 100 Rovings erzielen in Dehnkörperproben lediglich Zugspannungen von  $\sigma_{DKP,KSE100} = 1.054 \pm 84 \text{ N/mm}^2$ .

Die Rovingzugfestigkeiten von KSE 300 ( $\sigma_{\text{tex},KSE300} = 1.414 \pm 125 \text{ N/mm}^2$ ) und KSE 500E ( $\sigma_{\text{tex},KSE500E} = 1.653 \pm 83 \text{ N/mm}^2$ ) liegen 40 bis 60 % über dem Wert von ungetränkten Rovings. Ein Transfer der ermittelten Rovingzugfestigkeit in die Dehnkörper ist wie bei den KSE 100 Proben nicht gegeben. Insbesondere bei der KSE 500E-Prüfserie kann nur 50 % der ermittelten Rovingzugfestigkeit in die Verbundprobekörper übertragen werden. Der unzureichende Verbund ist durch die Art der Gelabscheidung (siehe Abschnitt 3.1.2) und die Rovingform (siehe Abschnitt 5.1.2) zu erklären. Es besteht kein ausreichender äußerer Verbund von Roving zu Feinbeton. Auch ist der innere Verbund unter den Filamenten zu gering, sodass über die Verankerungslänge keine ausreichende Kraftübertragung stattfindet und die inneren Filamente ausgezogen werden.

Die KSE 100 o. L.-Prüfserien weisen eine Zugfestigkeit von  $\sigma_{\text{tex},KSE100o.L.} = 1.572 \pm 110 \text{ N/mm}^2$  bei einfacher Tränkung und von  $\sigma_{\text{tex},KSE100o.L.x2} = 1.858 \pm 34 \text{ N/mm}^2$  bei zweifacher Tränkung auf. Die einfach getränkte Prüfserie KSE 100 o. L. zeigt aufgrund der durch die Tränkung entstandene Rovingform eine ähnliche Zugtragfähigkeit in Dehnkörperproben auf wie KSE 500E-Proben und sind daher nicht weiter betrachtet worden. Bei der Prüfserie mit KSE 100 o. L. x2-Tränkung ist der Transfer der Rovingzugfestigkeit in die Zugtragfähigkeit der Dehnkörperproben möglich. Des Weiteren weisen die Ergebnisse aus den Faserstrangzugversuchen der KSE 100 o. L. x2-Prüfungen nur eine geringe Standardabweichung auf.

Bei allen Prüfserien wurden nur Faserstränge ausgewertet, die entsprechend der Prüfkriterien nach REMPEL keinen Textilschlupf oder Bruch im Bereich der Einspannung aufwiesen [Rem18]. Das Bruchbild der Faserstränge fällt für die unterschiedlichen Tränkungsmaterialien sehr unterschiedlich aus. Im Anhang A3 sind zu den verschiedenen Prüfserien typische Bruchbilder der Faserstrangzugproben aufgeführt.

### 4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse aus den einaxialen Zugversuchen an Dehnkörperproben und an den Faserstrangzugversuchen zeigen die zugfestigkeitssteigernde Wirkung der mineralischen Tränkungen. Ein Einfluss der Rovingquerschnitte aufgrund der Gelabscheidung der Tränkungsmaterialien und der Tränkungshäufigkeit auf die Zugtragfähigkeit und das Rissverhalten der Dehnkörperproben ist gegeben. Die Prüfserien KSE 100 x2 und KSE 100 o. L. x2 weisen die vergleichsweise höchsten Zugtragfähigkeiten, ein feines Rissbild mit geringen Rissbreiten und folglich geringen Rissabständen auf.

Die einaxialen Zugversuche an Dehnkörperproben mit den KSE 100 x2 getränkten Rovings zeigen eine große Streuung der Ergebnisse. Einzelne Prüfserien versagten unerwartet früh und weisen atypische Rissbilder mit wenigen Rissen auf. Zurückzuführen sind diese Schwankungen auf die unregelmäßige Ausbildung der Rovingquerschnittsform und des Filamentgefüges infolge der Tränkung. Bild A2-12 in Anhang A2 enthält Spannungs-Dehnungsbeziehungen von KSE 100 x2-Dehnkörperproben, die diese Streuung aufzeigen. Die Prüfserien mit KSE 300 und 500E wurden aufgrund der ermittelten Ergebnisse nicht in zweifacher Tränkungs Ausführung untersucht. Detaillierte Untersuchungen zum Einfluss des Tränkungsmaterials und der Rovingquerschnittsform sind in Abschnitt 5.1 aufgeführt.

In Bezug auf die Textilzugspannung aus den Faserstrangzugversuchen ist festzustellen, dass die ungetränkten Carbonendlosfasern gegenüber den Angaben aus dem technischen Datenblatt des Herstellers [SGL17] lediglich 25 % der maximalen Filamentzugfestigkeit aufweisen. Dies ist auf die verwendete Prüfmethode ohne Epoxidharztränkung und Maßstabeffekte zurückzuführen (siehe Abschnitt 2.1.2 und 2.2.1). Durch die Tränkung mit den KSE-Produkten ergeben sich gegenüber den ungetränkten Rovings höhere Rovingzugspannungen, die je nach Tränkungs material auch in Dehnkörperversuchen erzielt wurden, sodass ein relativer Textilausnutzungsgrad von 100 % möglich ist. Daraus ist abzuleiten, dass für die relevanten Prüfserien valide Methoden für die Ermittlung der Materialeigenschaften angewendet wurden. Für jedes Tränkungs material ist eine individuelle Zugspannung zu ermitteln, da die Gelabscheidung und Rovinggeometrie das Verbundverhalten und die Zugspannung beeinflussen.

Tabelle 4-2 fasst die Untersuchungsergebnisse zusammen. Aufgeführt sind die mittleren Bruchlasten mit den entsprechenden mittleren und maximalen Rissbreiten sowie die mittleren und maximalen Rissbreiten bei einer Zugkraft von 15 kN, die der unteren Grenze von circa 1.000 N/mm<sup>2</sup> für die Gebrauchstauglichkeit entspricht. Des Weiteren ist der mittlere Rissabstand der Prüfserien, der aus der jeweiligen Rissanzahl errechnet wurde, aufgeführt.

Tabelle 4-2: Prüferserie II – Dehnkörperproben mit KSE-Variation an SGL Rovings – Bruchlast, Rissbreiten und Rissanzahl

Prüferserie	Bruchlast $F_u$ [kN]	Mittlere Rissbreite bei 15 kN [mm]	Max. Rissbreite bei 15 kN [mm]	Mittlere Rissbreite bei $F_u$ [mm]	Max. Einzel- rissbreite [mm]	Mittlerer Rissab- stand [mm]	Anzahl Proben
SGLnat	9,9 ± 0,7	-	-	-	-	125 ± 27,4	6
KSE 100	16,2 ± 1,3	0,086 ± 0,042	0,359	0,093 ± 0,031	0,203	17,9 ± 2,5	8
KSE 300	16,1 ± 1,2	0,103 ± 0,042	0,227	0,112 ± 0,046	0,246	25,1 ± 6,6	6
KSE 500E	12,2 ± 2,5	0,310 ± 0,330	1,478 <sup>1)</sup>	0,310 ± 0,330	1,478	63,0 ± 21,3	6
KSE 100 x2	20,8 ± 2,2	0,074 ± 0,024	0,146	0,102 ± 0,033	0,202	16,8 ± 2,6	8
KSE 100 o. L. x2	24,5 ± 1,8	0,071 ± 0,018	0,133	0,128 ± 0,022	0,222	14,3 ± 1,7	8

<sup>1)</sup> Bruchlast < 15 kN

Die untersuchten mineralisch getränkten Rovings weisen gegenüber vergleichbarer textiler Bewehrung mit Polymer- oder Acrylattränkung geringere Zugfestigkeiten von  $\sigma_{\text{tex}} = 1.858 < 3.000 \text{ N/mm}^2$  auf, vergleiche [Jes10, Mor20]. Entsprechend ist von einem Einsatz der hier verwendeten mineralisch getränkten Rovings im Bereich konstruktiver Verstärkungen abzusehen, da die Materialeffizienz nicht ausgeschöpft wird. Für die flächige Instandsetzung von Bauwerken zur Rissüberbrückung sind die ermittelten Zugfestigkeiten ausreichend. Des Weiteren weisen die Dehnkörperproben die erforderlichen Anforderungen an geringe Rissbreiten auf.

Dehnkörperproben mit KSE 100 o. L x2 führen zur höchsten Zugtragfähigkeit, weshalb die Untersuchungen zur praxisnahen Anwendbarkeit mit Textilgelegen und Rissüberbrückungsprobekörpern (siehe Abschnitt 6.1.3 und 6.2.2) mit dieser Tränkungsvariante durchgeführt wurden. Die Untersuchungen zur beschleunigten Alterung und zur Temperaturbeständigkeit wurden zuvor an Dehnkörperproben mit KSE 100 x2 getränkten Rovings durchgeführt (siehe Abschnitt 6.1.1 und 6.1.2).





## **5 Interpretation und Analyse der Ergebnisse und Einflussgrößen**

### **5.1 Einflussgrößen auf das Zugtragverhalten und die Rissbildungseigenschaften**

In folgenden Abschnitten werden verschiedene Einflüsse auf das Zugtragverhalten und die Rissbildungseigenschaften beschrieben, um die Ergebnisse aus den Dehnkörperversuchen aus Abschnitt 4.1.1 interpretieren zu können. Es wird der Einfluss des Tränkungsmaterials infolge der unterschiedlichen Gelabscheidungen auf den Faservolumengehalt untersucht, aus dem sich auch die Variation der Rovinggeometrien ergibt. Diese Geometrieunterschiede führen zu divergierenden Umfängen und Querschnittsflächen, die einen Einfluss auf die Verbundfläche zwischen Roving und Feinbetonmatrix haben und somit das Verbundverhalten maßgeblich beeinflussen. Aus dem Verbundverhalten ergibt sich die Qualität des Zugtrag- sowie des Rissverhaltens. Des Weiteren werden gealterte Dehnkörperproben unter den genannten Einflussparametern in einaxialen Zugversuchen betrachtet.

#### **5.1.1 Einflussbetrachtung des Tränkungsmaterials auf den Faservolumengehalt**

Wie in Abschnitt 3.1.2 beschrieben, besitzen Kieselsäureester-Produkte unterschiedliche Partikelausprägungen der ausreagierten Kieselgele (siehe Bild 3-1) sowie unterschiedliche Gelabscheidungsraten. Die Gelabscheidungsrate beschreibt die Masse des Kieselgels (amorphes  $\text{SiO}_2$ ), welche durch die Reaktion der Kieselsäureester mit Feuchtigkeit entsteht. Bei den Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurden in Petrischalen circa acht Zentimeter lange Rovingproben der SGL Sigrafil® CT50-4.4/255-E100 Endlosfaser mit den KSE-Produkten beträufelt, sodass eine optische Durchträngung der Fasern zu verzeichnen war. Für jedes KSE-Produkt wurden sechs Proben untersucht. Die Untersuchungen wurden bei einer Prüftemperatur von 20 °C und zwei relativer Luftfeuchten von 40 und 80 % in einem Klimaschrank durchgeführt, sodass je Kieselsäureester insgesamt zwölf Messungen erfolgten. Die Variation der relativen Luftfeuchtigkeit berücksichtigt mögliche Einflüsse auf die Verkieselung durch hohe oder niedrige Luftfeuchtigkeit. Mit einem Bereich von 40 bis 80 % r. F. ist der stetige Bereich der Luftfeuchtigkeit für Innenräumen und Außenluftbedingungen abgedeckt. Aus den Herstellerangaben zu den KSE-Produkten ist in Bezug auf die Verarbeitung nur ein Hinweis auf die einzuhaltenden Material-, Umgebungs-, und Untergrundtemperaturen von 8 bis 25 °C angegeben [KSE 100].

Die Messung der Gelabscheidungsrate erfolgte über Wägung in den Zeitschritten nach 24 Stunden, 7, 14, 21 und 28 Tagen. 28 Tage ist die angegebene Mindestreaktionszeit des Herstellers für KSE 100 [KSE100]. Die Referenzgrößen sind Wägungen unmittelbar nach Applikation der Kieselsäureester auf die Rovingproben. Aus der Massendifferenz ergibt sich die Gelabscheidung durch Verkieselung. Bild 5-1 zeigt die Gelabscheidungsraten in Prozent. Alle Prüfserien weisen über die Zeitschritte nur geringe Abweichungen zwischen den zwei betrachteten Klimarandbedingungen auf, sodass die Ergebnisse eine stabile Reaktion über den gesamten Bereich einer relativen Luftfeuchtigkeit von 40 bis 80 % bei 20 °C Prüftemperatur darstellen. Insgesamt kann auch die Streubreite als vernachlässigbar gering betrachtet werden.

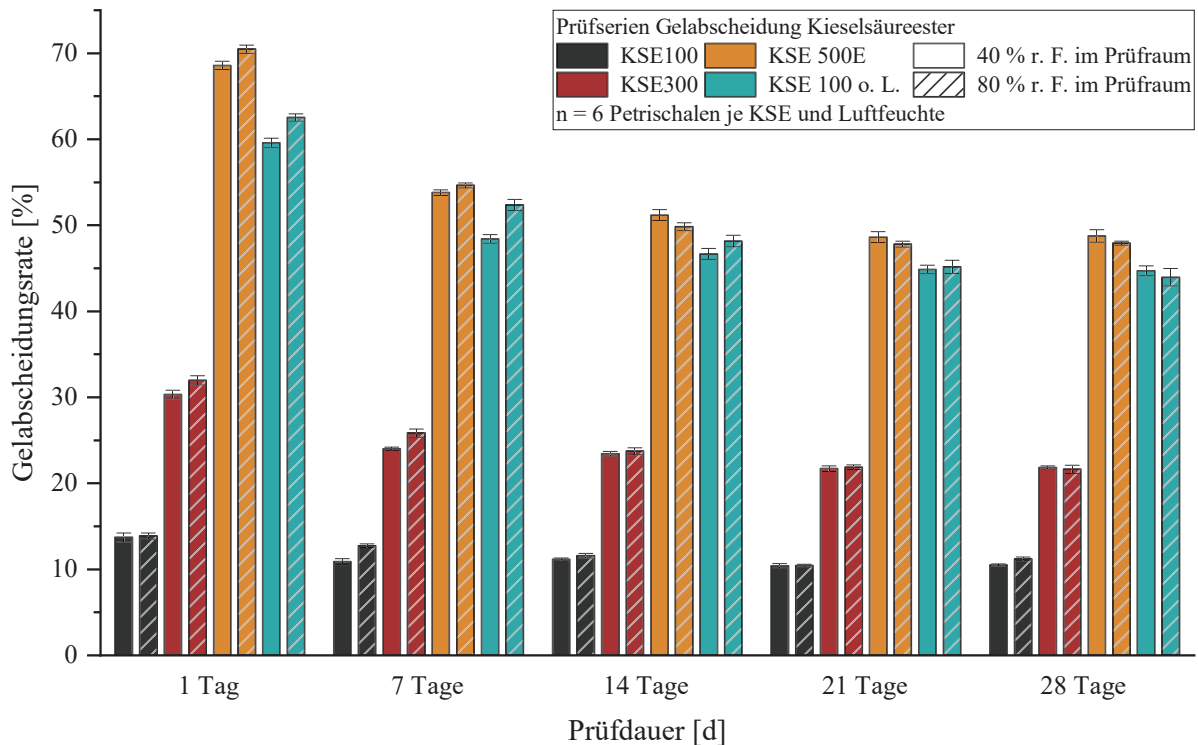


Bild 5-1: Gelabscheidungsrate (Verkieselung) am Roving in Petrischalen bei unterschiedlichen Luftfeuchten

Die Prüfserien mit KSE 100 und KSE 500E entsprechen nach 28 Tagen Reaktionszeit mit Gelabscheidungsrate von 10 bzw. 49 % den Angaben der technischen Datenblätter [KSE 100, KSE 500E]. Die Prüfserie mit KSE 300 weist mit circa 22 % eine etwas geringere Gelabscheidungsrate auf als die im Datenblatt angegebenen 30 %. Die ermittelte Gelabscheidungsrate der entwickelten Kieselsäureester KSE 100 o. L. liegt mit 45 % im Rahmen der vergleichbaren Herstellerangabe von circa 42 %.








Die unterschiedlichen Gelabscheidungsrate beeinflussen den Fasertränkungsgehalt bzw. Faservolumengehalt der Carbonrovings. Die Bestimmung des Fasertränkungsgehalts erfolgte über Wägung von zehn Zentimeter langen Rovingstücken, aus getränkten Rovings, die entsprechend der Tränkungsprozesse nach Abschnitt 3.2.1 hergestellt wurden. Als Referenz diente die Wägung von ungetränkten Rovingproben, deren mittlere Masse mit  $345 \pm 1,1$  mg dem rechnerischen Gewicht aus Textilfeinheit und Dichte entspricht. Über die Dichte des Rovings sowie des Kieselgels wurde der Faservolumengehalt rechnerisch ermittelt. Das Kieselgel wurde mit einer Dichte von  $2,2 \text{ g/cm}^3$  angenommen. Entsprechend der steigenden Gelabscheidungsrate von KSE 100, KSE 300, KSE 100 o. L. und KSE 500E findet eine Verringerung des Fasertränkungsgehalts bzw. Faservolumengehalts statt, wie die Ergebnisse in Tabelle 5-1 zeigen. Bei Rovings mit KSE 100-Tränkung liegt der höchste Faservolumengehalt von 97 % aufgrund der geringen Gelabscheidungsrate vor.

Die Tränkung führt zur Veränderung der Rovinggeometrie, die im Falle von KSE 100 von einer rundlich kompakten Form bis zu einer länglich aufgelockerten Querschnittsgeometrie führen kann,

wie die schematischen Darstellungen in Tabelle 5-1 zeigen. Die Darstellungen sind aus den Untersuchungen zum Rovingquerschnitt aus Abschnitt 5.1.2 abgeleitet.

Durch die teilweise aufgelockerte Struktur der KSE 100-Rovings wird die Verbundfläche vergrößert, wodurch höhere Zugtragfähigkeiten und verbesserte Rissbildungen erreicht werden. Eine zweifache Tränkung mit KSE 100 verändert den Faservolumengehalt nur geringfügig. Der Rovingquerschnitt ist aber weniger kompakt und weist häufiger eine länglichere und aufgelockerte Form auf, wodurch die Verbundfläche vergrößert wird. Insgesamt ist die Streuung der Rovingform bei KSE 100-Tränkungen hoch, wodurch Schwankungen in den Ergebnissen zur Zugtragfähigkeit zu erklären sind. KSE 300 führt infolge der erhöhten Gelabscheidung zu einem Faservolumengehalt von circa 93 %. Gleichzeitig bleibt die Rovinggeometrie kompakt, weit aufgefächerte Formen wie bei KSE 100 sind weniger vorhanden.

Tabelle 5-1: Fasertränkungs- und Faservolumengehalt getränkter Carbonrovingproben

Tränkungsmaterial	Gewicht 10 cm Roving [mg]	Fasertränkungs- gehalt* <sup>1</sup> [%]	Faservolumen- gehalt* <sup>2</sup> [%]	Schematische Rovingquerschnitte im Feinbeton* <sup>3</sup>
SGLnat (Referenz)	345 ± 1,1	-	-	
KSE 100	358 ± 2,2	96	97	
KSE 100 x2	365 ± 1,8	95	96	
KSE 300	378 ± 2,8	91	93	
KSE 500E	453 ± 11,5	76	80	
KSE 100 o. L.	461 ± 11,6	75	78	
KSE 100 o. L. x2	632 ± 6,6	55	60	

\*<sup>1</sup> Ermittelt aus Wägung

\*<sup>2</sup> Rechnerisch aus Gewicht und der Rovingdichte von 1,8 g/cm<sup>3</sup> und einer SiO<sub>2</sub>-Dichte von 2,2 g/cm<sup>3</sup>

\*<sup>3</sup> Darstellungen anhand mikroskopisch erfasster Querschnitte von in Feinbeton eingebetteten Rovings

KSE 500E und KSE 100 o. L. führen aufgrund der hohen Gelabscheidungsraten zu reduzierten Faservolumengehalten im Bereich von 80 %. Gleichzeitig zeigen die Rovingquerschnitte eine sehr kompakte Form, ähnlich wie die von ungetränkten Carbonrovings. Das Zugtragverhalten und die Rissbildungseigenschaften sind aufgrund der geringen Verbundfläche infolge der Rovingform gegenüber ungetränkten Dehnkörperproben nur geringfügig verbessert.

Die zweifache Tränkung KSE 100 o. L. x2 führt zu einem Faservolumengehalt von 60 %. Die Querschnittform des Rovings wird gegenüber der einfachen Tränkung stark aufgelockert, sodass zwischen den einzelnen Filamenten eine größere Menge Kieselgel (SiO<sub>2</sub>) zu finden ist. Auch liegen längliche Formen mit vereinzelt Filamentbündeln vor oder Rovingquerschnitte mit vereinzelt Filamentansammlungen und vielen einzelnen Filamenten, die von der Tränkungsmatrix umgeben sind. Die Kombination aus einem geringen Faservolumengehalt und Rovingquerschnitten mit vergrößerter Verbundfläche weisen die größten Verbundkräfte in den Dehnkörperproben auf.

### 5.1.2 Einflussbetrachtung der Tränkung auf den Umfang und die Querschnittsfläche

Die Bilder 5-2 bis 5-6 zeigen exemplarische Aufnahmen von jeweils drei Rovingquerschnitten aus Dehnkörperproben unterschiedlicher Prüfserien.

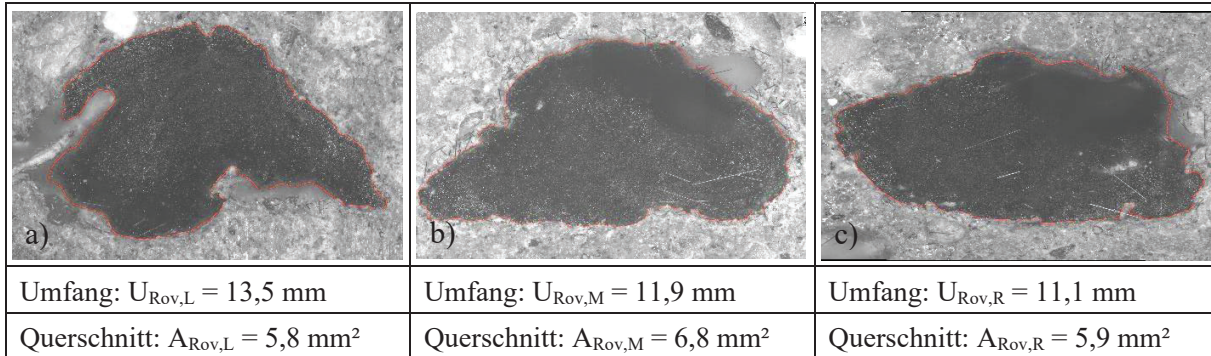


Bild 5-2: Querschnittsaufnahmen eines ungetränkten Rovings (SGLnat), a) links, b) mittig, c) rechts aus der freien Messlänge einer Dehnkörperprobe (siehe Abschnitt 3.4.1)

Bild 5-2 zeigt den Querschnitt eines ungetränkten Rovings in der Feinbetonmatrix einer Dehnkörperprobe, dessen Form über die Länge geringfügig variiert. Die Filamente liegen zu einem Faserbündel zusammen. Gegenüber der rechnerischen Textilquerschnittsfläche von  $1,92 \text{ mm}^2$  weist der Roving Flächen von  $5,8$  bis  $6,8 \text{ mm}^2$  auf. Zwischen den Filamenten findet sich kein nennenswerter Anteil der Feinbetonmatrix, sondern hauptsächlich Luft. Der Rovingumfang von  $11,1$  bis  $13,5 \text{ mm}$  schwankt über die drei untersuchten Stellen a), b) und c) nur gering. Die exemplarisch dargestellten Querschnitte eines ungetränkten Rovings in der Feinbetonmatrix spiegeln die Werte für die mittlere Querschnittsfläche der Rovings der Dehnkörperproben von  $A_{\text{SGLnat}} = 5,7 \pm 0,6 \text{ mm}^2$  und den mittleren Umfang von  $U_{\text{SGLnat}} = 12,3 \pm 1,2 \text{ mm}$  wider.

Bild 5-3 zeigt die Variation der Geometrie eines Rovings mit KSE 100-Tränkung über die Probekörperlänge. Die Querschnitte in a) und b) weisen Rovingumfänge von  $12,3$  bzw.  $12,9 \text{ mm}$  auf. In der Querschnittsaufnahme c) beträgt die Länge mit  $32,6 \text{ mm}$  einen zweieinhalbfach so hohen Wert. Die Form des Rovings variiert von einem kompakteren Filamentbündel zu mehreren kleineren Filamentbündeln, die eine entsprechend größere Kontaktfläche zum Feinbeton aufweisen. Bei der KSE 100-Tränkung befindet sich nur wenig  $\text{SiO}_2$  in der Rovingmatrix. Lokale Unterschiede in der Tränkungsmenge können nicht ausgeschlossen werden und sind neben dem geringen Tränkungsgehalt insgesamt eine mögliche Erklärung für die große Variation innerhalb eines Rovings. Im Mittel beträgt der Umfang der untersuchten KSE 100-Rovings  $U_{\text{KSE100}} = 12,5 \pm 3,7 \text{ mm}$  und die Querschnittsfläche  $A_{\text{KSE100}} = 4,1 \pm 1,5 \text{ mm}^2$ . Bei den Untersuchungen zum Einfluss der Tränkung auf den Umfang und die Querschnittsfläche der Rovings wurden auch Dehnkörperproben mit KSE 100 getränkten Rovings untersucht, die in die Auswertung zur Zugtragfähigkeit und Rissbildung nicht miteingegangen sind, da ein unerwartet frühes Versagen und keine Rissbildung eintraten. Diese Ergebnisse können Anhang A2 entnommen werden.

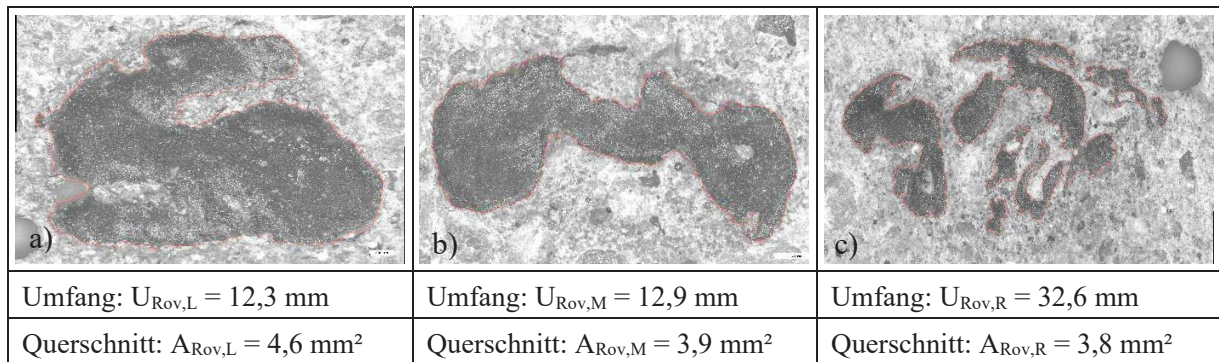


Bild 5-3: Querschnittsaufnahmen eines Rovings mit KSE 100-Tränkung, a) links, b) mittig, c) rechts aus der freien Messlänge einer Dehnkörperprobe

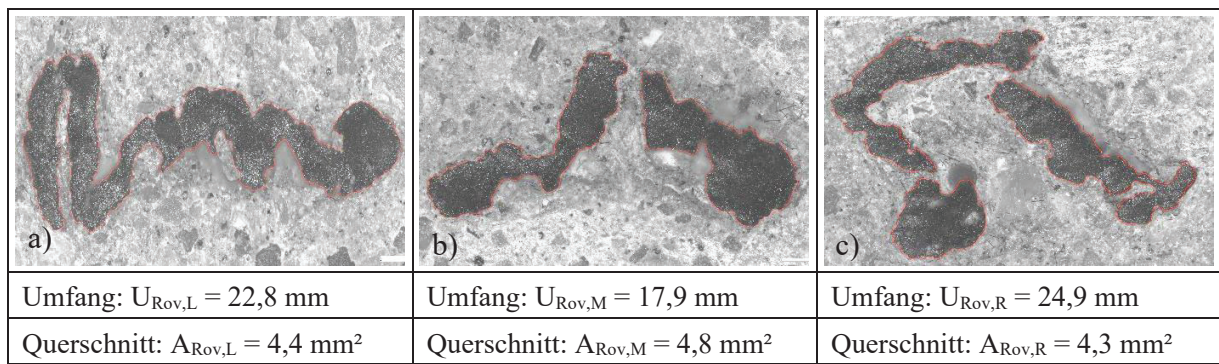


Bild 5-4: Querschnittsaufnahmen eines Rovings mit KSE 100 x2-Tränkung, a) links, b) mittig, c) rechts aus der freien Messlänge einer Dehnkörperprobe

Die drei Querschnitte von zweifach getränkten Rovings mit KSE 100 in Bild 5-4 zeigen eine Trennung des 50k Rovings in mehrere Faserbündel. Carbonrovings mit hoher Textilfeinheit werden bei der Herstellung aus mehreren sogenannten Direktrovings mit geringer Textilfeinheit zu Heavy Tows (assemblierter Roving) zusammengefügt [Che11]. Durch die zweifache Tränkung findet ein Aufteilen der Heavy Tows in Direktrovings statt. Folglich besitzen die KSE 100 x2 getränkten Rovings eine vergrößerte Verbundfläche zur Feinbetonmatrix. Die Schwankung in der Rovinggeometrie besteht, wie bei der einfachen KSE 100-Tränkung, auch nach einer zweiten Tränkung weiterhin, wie die Einzelwerte in Bild 5-4 a) bis c) zeigen. Für KSE 100 x2 getränkte Rovings konnten vereinzelt auch kompakte oder weit aufgefächerte Querschnitte festgestellt werden, wie bei einfacher KSE 100-Tränkung (siehe Bild 5-3 a) und c)). Im Mittel weist der Rovingumfang mit  $U_{\text{KSE100x2}} = 23,4 \pm 4,7 \text{ mm}$  eine deutlich höhere Verbundfläche gegenüber KSE 100-Rovings auf. Die mittlere Querschnittsfläche beträgt  $A_{\text{KSE100x2}} = 5,3 \pm 1,2 \text{ mm}^2$ . KSE 100 und KSE 100 x2-Rovings enthalten gegenüber ungetränkten Rovings weniger Luft zwischen den Filamenten.

Die Ergebnisse für Tränkungsmaterialien mit höheren Gelabscheidungsraten, wie KSE 300, KSE 500E und KSE 100 o. L. weisen kompaktere Querschnittsformen auf. In Bild 5-5 sind exemplarische Querschnitte eines Rovings mit höherer Gelabscheidungsrate dargestellt. Die Aufnahme c) des getränkten KSE 100 o. L. zeigt einen nahezu runden Roving mit einer entsprechend geringen

Verbundfläche des Umfangs von 9,4 mm. Ein Eindringen der Feinbetonmatrix zwischen die Filamente findet kaum statt, der Filamentzwischenraum ist mit Tränkungsmaterial und Luft ausgefüllt.

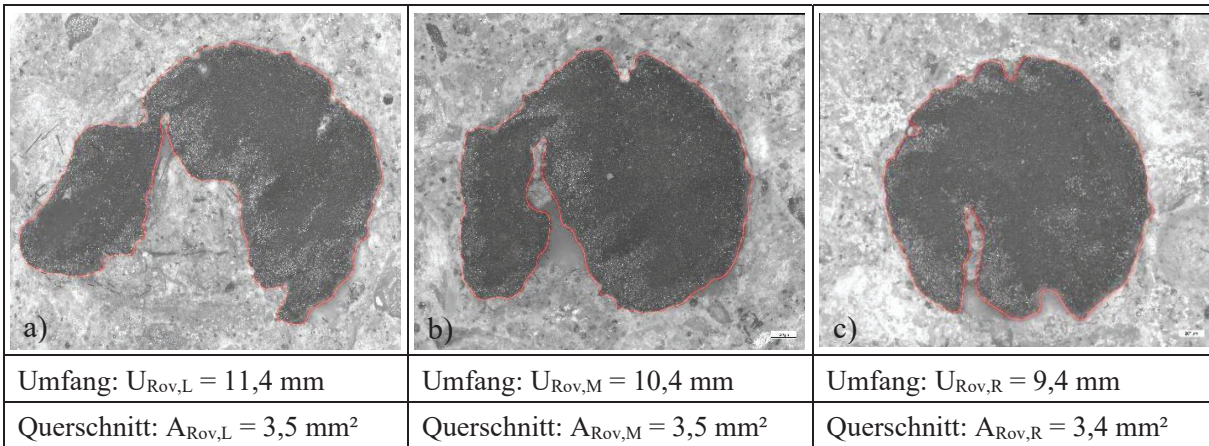


Bild 5-5: Querschnittsaufnahmen eines Rovings mit einfacher KSE 100 o. L.-Tränkung, a) links, b) mittig, c) rechts aus der freien Messlänge eines Dehnkörpers

Der mittlere Umfang  $U_{KSE100o.L.} = 9,7 \pm 2,2 \text{ mm}$  liegt unterhalb des Umfangs von ungetränkten Rovings. KSE 300 und KSE 500E liegen mit  $U_{KSE300} = 13,2 \text{ mm}$  und  $U_{KSE500E} = 14,0 \pm 0,2 \text{ mm}$  im Bereich von KSE 100. Der sehr geringe Umfang der KSE 100 o. L. getränkten Rovings wird durch die zweite Tränkung deutlich erhöht, wie die Darstellungen in Bild 5-6 zeigen.

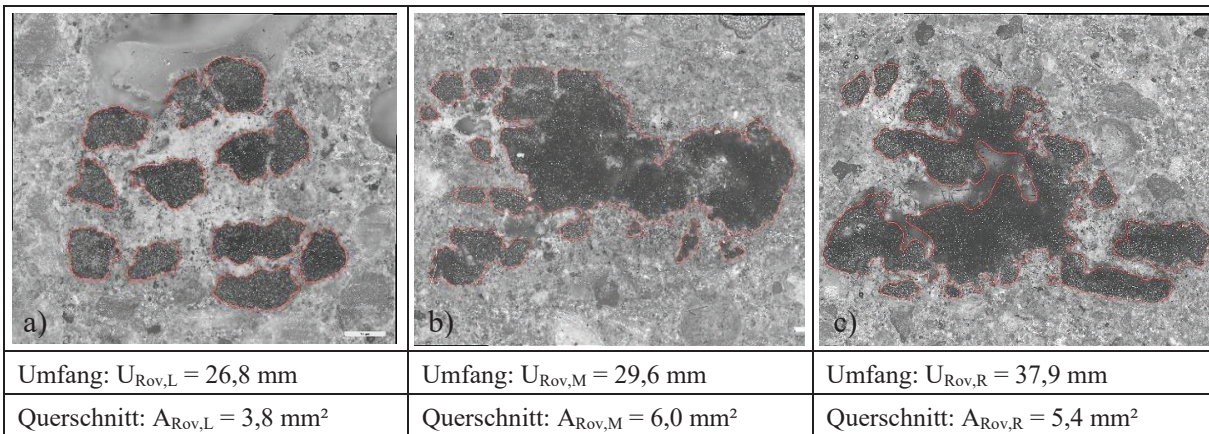


Bild 5-6: Querschnittsaufnahmen eines Rovings mit KSE 100 o. L. x2-Tränkung, a) links, b) mittig, c) rechts aus der freien Messlänge eines Dehnkörpers

Die drei Aufnahmen eines Rovings mit KSE 100 o. L. x2-Tränkung zeigen eine große Variation der Geometrie. Der Querschnitt des Rovings in Bild 5-6 a) weist eine Struktur zwölf einzelner Filamentbündel auf, die an der zweiten und dritten Messstelle c) und b) zu einem größeren Bündel mit vereinzelt kleinen Filamentbündeln übergeht. Die Umfänge variieren von 26,8 bis 37,9 mm und der Querschnitt von 3,8 bis 6,0 mm<sup>2</sup>. Zwischen den Filamentbündeln sind einige Einzelfilamente zu finden.

Gegenüber KSE 100 haben die KSE 100 o. L. getränkten Rovings einen geringeren Faservolumengehalt und sind durch den höheren Anteil an Tränkungsmaterial in der Rovingmatrix wesentlich steifer. Das Aufbrechen der Tränkungsmatrix beim Aufrollen zwischen erster und zweiter Tränkung (siehe Abschnitt 3.2.1) führt offensichtlich zu einem stärkeren Aufspreizen des Rovings. Zwischen den einzelnen Filamentbündeln in Bild 5-6 a) sind homogene weißliche Bereiche zu sehen. Es findet sich weniger Gesteinskörnung aus der Feinbetonmatrix zwischen den Filamentbündeln. Es ist anzunehmen, dass eine chemische Reaktion zwischen Tränkungsmaterial und Feinbeton bzw. Zementleim stattfindet. Diese Annahme wird mittels analytischer Methoden in Abschnitt 5.2 näher betrachtet. Die Beobachtung konnte vorwiegend bei KSE 100 o. L. x2-Querschnitten festgestellt werden. Es spricht dafür, dass größere Mengen Tränkungsmaterial sowie eine Rovingaufweitung für eine umfangreiche Interaktion von Kieselgel und Feinbeton erforderlich sind.

Die in Abschnitt 3.4.1 beschriebene Methode zur Ermittlung der Rovinggeometrien mittels Mikroskopieaufnahmen ist bei den Querschnitten mit KSE 100 o. L. x2-Tränkungen nur noch bedingt anwendbar, wie am Beispiel des Querschnitts a) aus Bild 5-6 erläutert werden kann. Bild 5-7 zeigt den benannten Querschnitt mit dem entsprechenden Histogramm zur Schwellwertbildung in ImageJ, um die Rovingflächen zu vermessen.

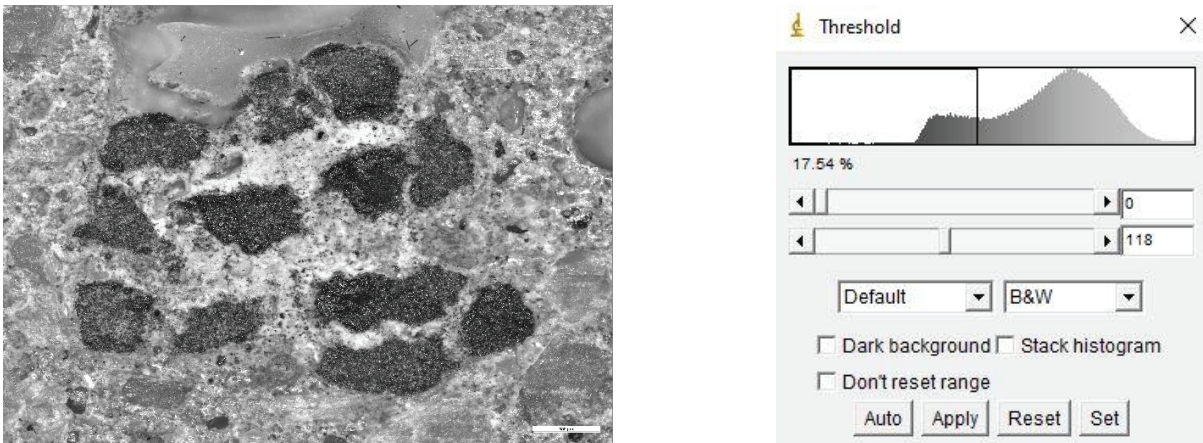


Bild 5-7: Graustufenbild einer KSE 100 o. L. x2 Probe mit entsprechendem Histogramm für die Schwellwertbildung einer Binärgrafik

Das Histogramm zur Schwellwertbildung weist nicht mehr den typischen Peak der relevanten Pixelinformationen auf. Es ist lediglich ein breites leicht abfallendes Plateau sowie ein großer Peak mit vielen undefinierten Pixelinformationen vorhanden. Das Niveau des Grundrauschens ist deutlich höher als bei Graustufenbildern mit zusammenhängenden Filamenten zu einem Bündel. Für die unzureichende Differenzierung der relevanten Pixelinformationen ist die Vermischung des Kieselgels in der Rovingmatrix sowie vereinzelt Filamente in der Feinbetonmatrix verantwortlich. Daraus folgt eine Unterschätzung der Verbundfläche von Rovingbereichen und einzelnen Filamenten, die mit dem Feinbeton in Kontakt stehen, wie der Rovingquerschnitt in Bild 5-8 a) zeigt. Die roten Umrandungslinien in a) zeigen die Rovingbereiche, die in die Bestimmung des Umfangs und der Querschnittsfläche eingehen. Über eine Anpassung der Analysemethode könnten auch fehlende kleinere Faserbündel berücksichtigt werden. Die Detailaufnahme in Bild 5-8 b) zeigt, dass in der

Matrix viele einzelne Filamente eingebunden sind, die über die angewendete Messmethode nicht erfasst werden können. Mit einer Anpassung des Schwellwertes ist die weiße Umrandung, die den gesamten Bereich von Faserbündel und Einzelfilamenten erfasst, erzeugt worden. Daraus ergibt sich jedoch keine genaue Kontaktfläche von den Filamenten zur Feinbetonmatrix. Innerhalb der weißen Umrandung weist die Matrix die benannte homogenere weißliche Materialstruktur auf. Die ermittelten Umfänge von KSE 100 o. L. x2 getränkten Rovings können folglich als unterrepräsentiert bezeichnet werden.

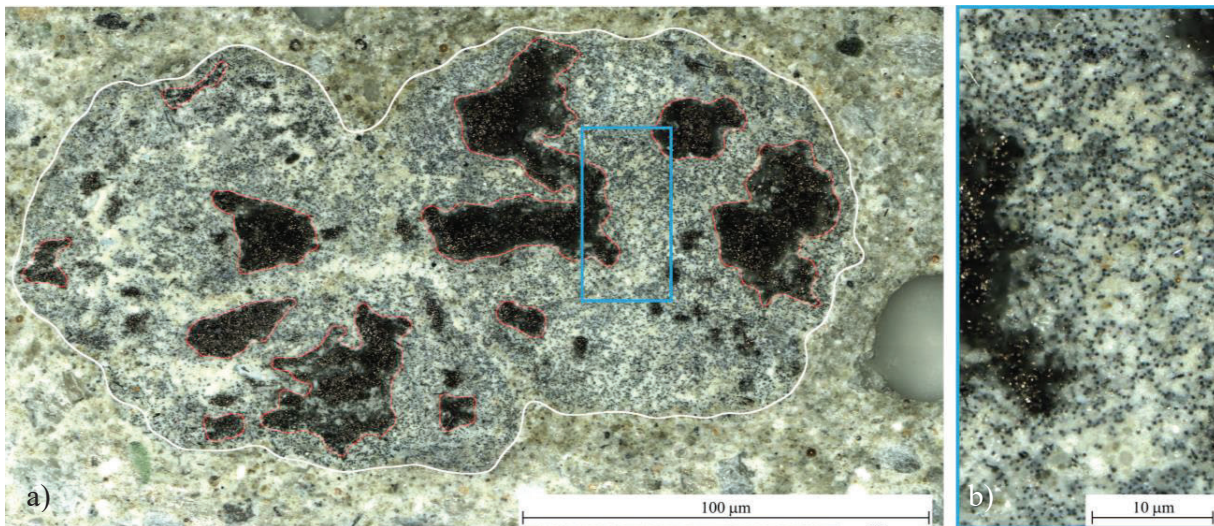


Bild 5-8: Rovingquerschnitt KSE 100 o. L. x2 mit unterschiedlich definiertem Umfang (rot/weiß) in a) und Detailansicht einzelner Filamente in b)

Basierend auf den Ergebnissen aus Abschnitt 4.1.1 resultiert aus der Einflussuntersuchung zu Umfängen und Querschnittsfläche die Annahme, dass die Art der Verkieselung, die Menge und Häufigkeit des Tränkungsmaterials und der daraus resultierende Faservolumengehalt die Rovinggeometrie unterschiedlich stark beeinflussen und maßgeblich auf das Verbundverhalten einwirken. Eine entsprechende Auswirkung auf die Zugtragfähigkeit und Rissbildung ist gegeben, die im folgenden Abschnitt 5.1.3 näher betrachtet wird.

### 5.1.3 Einflussbetrachtung der Textilgeometrie auf die Zugtragfähigkeit und Rissbildung

In Bild 5-9 ist der Bezug der ermittelten Textilzugspannung sowie des zugehörigen mittleren Rissabstands einzelner Dehnkörperproben auf den entsprechenden mittleren Umfang der Proben dargestellt. Jeder Datenpunkt entspricht einem ermittelten Mittelwert einer Dehnkörperprobe der verschiedenen Prüfserien. Die quadratischen Datenpunkte der KSE 100-Prüfserien zeigen eine Bandbreite der mittleren Umfänge von  $U_{KSE100} = 7$  bis 20 mm. Für Dehnkörperproben mit einem mittleren Rovingumfang  $U < 15$  mm fallen die erreichten Textilzugspannungen gering aus. Die gesetzte Größe von  $1.000 \text{ N/mm}^2$  für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit für Rissüberbrückungsprobekörper wird nicht erreicht. Gleichzeitig zeigen diese Proben ein unzureichendes Rissbild mit mittleren Rissabständen von  $> 20$  bis über 100 mm. Dehnkörperproben mit ungetränkten Rovings sowie KSE 500E und KSE 100 o. L.-Tränkungen weisen auch mittlere Umfänge kleiner 15 mm und unzureichende Textilzugspannungen auf. Der exemplarische mittlere Umfang für die Prüfserie



KSE 300 liegt genau im GZG. Es lässt sich festhalten, dass die im Rahmen dieser Arbeit festgestellten mittleren Umfänge unterhalb von 15 mm nicht für eine Gebrauchstauglichkeit im Verbundprobekörper ausreichen.

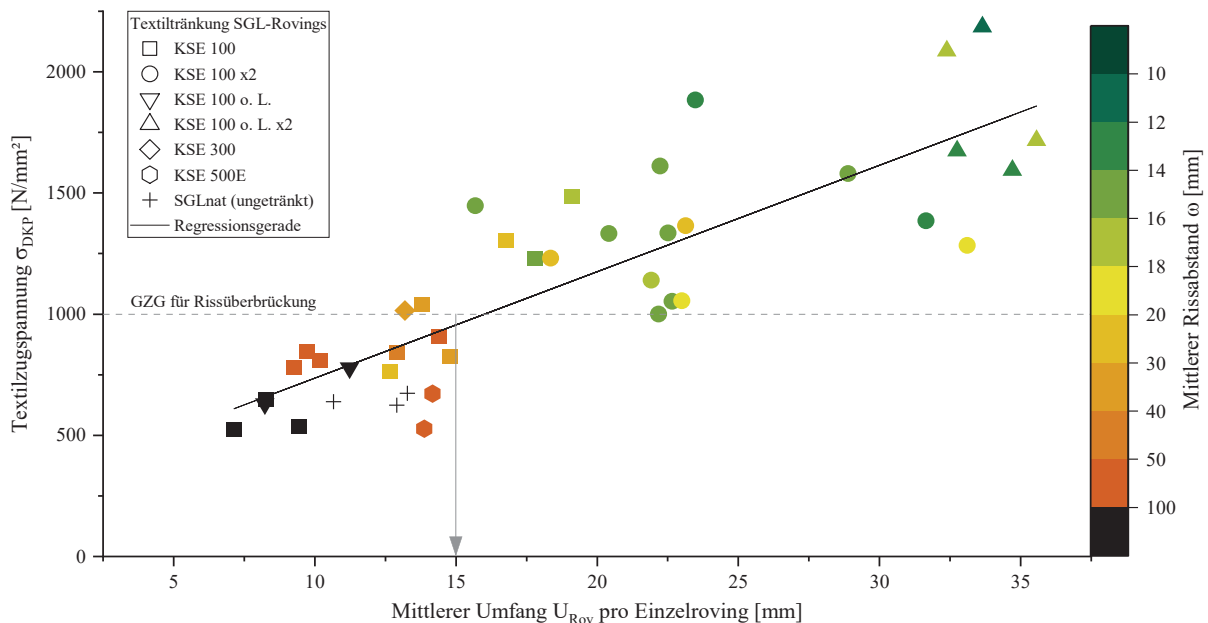


Bild 5-9: Einfluss des mittleren Rovingumfangs auf die Textilzugspannung und den mittleren Rissabstand

Die zweifache Tränkung mit KSE 100 führt zu mittleren Rovingumfängen von  $U_{KSE100x2} = 15$  bis 33 mm, gleichzeitig schwankt die Zugspannung von circa 1.000 bis 1.750 N/mm<sup>2</sup>. Entsprechend groß ist die Streuung der mittleren Rissabstände von  $\omega_{KSE100x2} = 13$  bis 20 mm, auch wenn die Einzelrissbreiten (siehe Tabelle 4-2) eine Gebrauchstauglichkeit aufzeigen.

KSE 100 o. L. x2-Rovingquerschnitte weisen einen Umfang von  $U_{KSE100o.L.x2} = 33,8 \pm 1,3$  mm auf und zeigen die höchste Zugspannung bei den geringsten mittleren Rissabständen im Bereich von 10 bis 17 mm. Eine geringe Streubreite in der Rissanzahl bleibt erhalten. In Bezug auf den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit weisen die Werte eine ausreichende Sicherheit auf. Bei der Ermittlung der Umfänge ist die in Abschnitt 5.1.2 beschriebene Unterschätzung der Rovingumfänge von KSE 100 o. L. x2-Proben zu berücksichtigen. Eine genauere Betrachtung würde zu größeren Umfanglängen führen. Die Untersuchungen zum Einfluss der Umfänge zeigen, dass auch bei mineralischer Tränkung größere Rovingumfänge zu höheren Zugspannungen und geringeren Rissabständen führen, mit denen geringere Rissbreiten einhergehen. Dies deckt sich mit den bekannten Erkenntnissen zum Einfluss des Rovingumfangs, vergleiche [Ban04, Jes04, Lor14].

#### 5.1.4 Einflussbetrachtung gealterter Proben auf die Zugtragfähigkeit und Rissbildung

Untersuchungen in [Len20] zeigten, dass Nachbehandlung und Lagerungsbedingungen nach der Betonage von Dehnkörperproben mit mineralisch getränkten Carbonrovings einen Einfluss auf die Zugtragfähigkeit und Rissbildung haben. Eine dauerhafte Wasserlagerung bis 24 Stunden vor der

Prüfung nach dem Ausschalen der Probekörper führte zu geringfügiger Verringerung der Zugspannung und zu kleineren Rissbreiten. Dieser Einfluss der Nachbehandlung von Dehnkörperproben mittels Wasserlagerung wurde an Prüfserien mit KSE 100 getränkten Rovings im Rahmen dieser Arbeit weiter untersucht. Die Lagerungen erfolgten bis zur Prüfung nach 28 Tagen (KSE 100-28d-w) bzw. 365 Tage (KSE 100-365d-w) im Wasser. Des Weiteren wurden Proben über 720 Tagen unter klimatischen Randbedingungen bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit gelagert und geprüft. In Bild 5-10 a) ist die Spannungs-Dehnungsbeziehung und in b) die Rissbreiten-Spannungsbeziehung der Prüfserien KSE 100, KSE 100-28d-w und KSE 100-365d-w dargestellt.

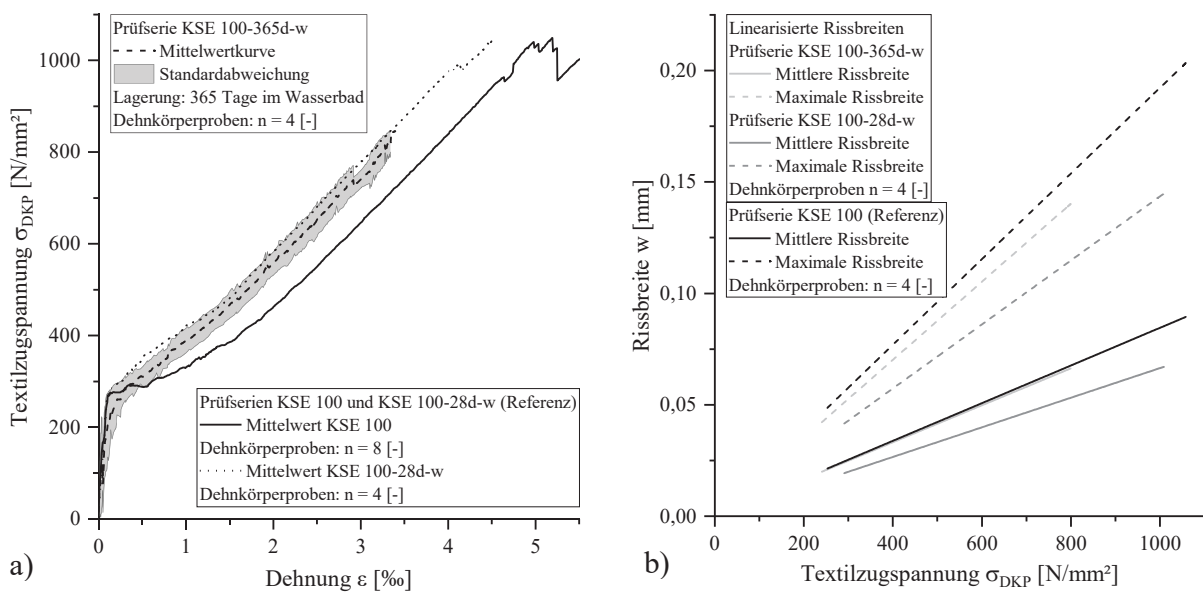


Bild 5-10: Dehnkörperproben nach 365 Tagen Wasserlagerung bei 20 °C mit KSE 100 getränkten Rovings, a) Spannungs-Dehnungsbeziehung, b) Rissbreiten-Spannungsbeziehung

Die Spannungs-Dehnungslinien der wassergelagerten Dehnkörperproben KSE 100-28d-w und KSE 100-365d-w weisen gegenüber dem Verlauf der KSE 100 Prüfserie ein steiferes Rissverhalten auf. Die Erstrisslasten aller Prüfserien sind annähernd gleich. Der Anstieg der Spannung im Zustand I ist bei den KSE 100-28dw-Proben, die bis zur Prüfung nach 28 Tagen in Wasser lagerten, etwas steiler. Im Zustand IIa weisen beide wassergelagerte Prüfserien kaum Spannungsabfälle während der Rissbildung auf. Der Verlauf ist nahezu linear, wie im Zustand IIb zu sehen ist (vgl. auch Einzelwerte Anhang A2). Die Bruchspannung der Prüfserien KSE 100 und KSE 100-28d-w liegen auf einem Niveau. Die mittlere Bruchspannung der Prüfserie mit 365 Tagen in Wasser gelagerten Proben liegt bei  $800 \pm 33$  N/mm<sup>2</sup> und weist damit eine Reduzierung um circa 20 % auf. Die verringerte Bruchspannung der 365 Tage im Wasserbad gealterten Proben ist nicht zwingend auf die Alterung zurückzuführen, da KSE 100 getränkte Rovings einer Schwankung aufgrund der unregelmäßigen Rovingumfänge von  $U_{KSE100} = 7$  bis 20 mm infolge des Tränkungsprozesses unterliegen (siehe Abschnitt 5.1.2 und 5.1.3).

Die Rovingquerschnitte einer Dehnkörperprobe der Prüfserie KSE 100-365d-w weisen einen mittleren Umfang von  $U_{KSE100-365d-w} = 12,7$  mm auf, der im Vergleich zur Referenzprüfserie KSE 100

mit  $U_{KSE100} = 17,5$  mm geringer ausfällt und unter dem kritischen Wert von 15 mm liegt. Die verringerte Bruchspannung kann durch die geringere Verbundfläche von Roving und Feinbetonmatrix erklärt werden. Dehnkörperproben mit vergleichbarem mittleren Rovingumfang weisen ähnliche Bruchspannungen auf (siehe Bild 5-9). Die mittleren und maximalen Rissbreiten der KSE 100-365d-w-Prüfserie fallen gegenüber den KSE 100-28d-w Proben etwas höher aus, liegen aber unterhalb der Rissbreiten der Referenzproben KSE 100 (siehe auch Tab 5-2). Die dauerhafte Wasserlagerung verbessert die Rissbildungseigenschaften in Bezug auf Rissbreiten und den mittleren Rissabstand, da trotz geringerer Verbundfläche vergleichbare Rissbreiten erreicht wurden. Die Untersuchungen in [Len20] können mit den erreichten Ergebnissen bestätigt werden.

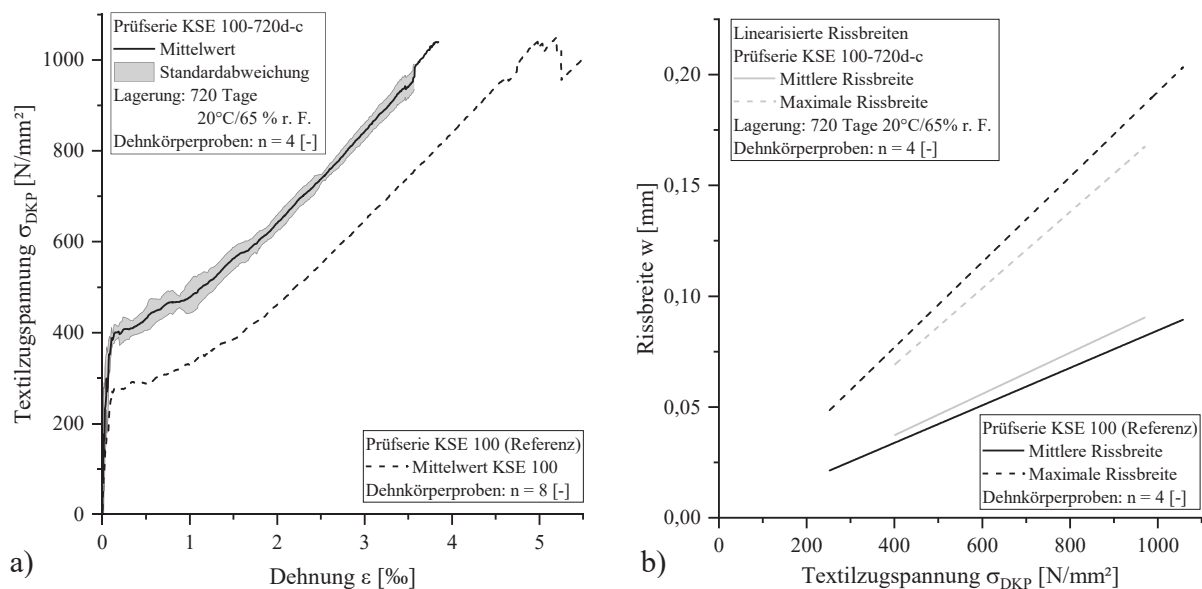


Bild 5-11: Dehnkörperproben nach 720 Tagen Lagerung im Klimaschrank bei 20 °C und 65 % r. F. mit KSE 100 getränkten Rovings, a) Spannungs-Dehnungsbeziehung, b) Rissbreiten-Spannungsbeziehung

Der Spannungs-Dehnungsverlauf der Prüfserie KSE 100-720d-c weist die charakteristischen Zustände für Textilbetondehnkörperproben auf, wie in Bild 5-11a) dargestellt ist. Gegenüber der Referenzkurve der Prüfserie KSE 100 fällt die Erstrissspannung der klimatisch gealterten Proben KSE 100-720d-c um circa 150  $N/mm^2$  höher aus. Durch die Alterung unterliegt der Feinbeton einem Festigkeitszuwachs, welcher maßgeblich zur Erhöhung der Erstrissspannung führt. Die Dehnkörperproben KSE 100-720d-c unterliegen entsprechend einer geringeren Dehnung.

Trotz eines geringen mittleren Umfangs der KSE 100-720d-c-Proben ( $U_{Rov} = 13,7$  mm) werden Zugspannungen auf dem Niveau der Referenzprüfserie KSE 100 erreicht. Eigentlich müsste die geringere Verbundfläche in Analogie zu den KSE 100-365d-w-Proben geringere Zugspannungen aufweisen. Es ist daher anzunehmen, dass die fortschreitende Alterung der Proben auch bei geringem Rovingumfang zu einer Verbesserung der Verbundeigenschaften führt. Eine mögliche Erklärung kann der Festigkeitszuwachs durch Vernadelung des Feinbetons in die Rovingmatrix sein, wodurch weitere Filamente am Lastabtrag beteiligt werden. Dies zeigen auch die mittleren und maximalen Rissbreiten der Prüfserie KSE 100 720d-c, die trotz größerer Rissabstände im Bereich

der Referenzproben (KSE 100) liegen (siehe Tabelle 5-2). In Tabelle 5-2 sind die Ergebnisse zu den gealterten Prüfserien mit KSE 100 getränkten Rovings zusammengefasst.

Tabelle 5-2: Prüfserie III – Dehnkörperproben KSE 100 und Alterung klimatisch und wassergelagert – Bruchlast, Rissbreiten und Rissanzahl

Prüfserie	Bruchlast $F_u$	Mittlere Rissbreite	Maximale Einzelrissbreite	Mittlerer Rissabstand	Anzahl Proben
	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	
KSE 100	16,2 ± 1,3	0,093 ± 0,031	0,203	19,1 ± 2,8	8
KSE 100 28d-w	15,1 ± 0,9	0,060 ± 0,041	0,150	17,9 ± 2,5	8
KSE 100 365d-w <sup>2a)</sup>	12,3 ± 0,5	0,071 ± 0,031	0,133	20,6 ± 3,0	4
KSE 100 720d-c <sup>2b)</sup>	14,9 ± 0,6	0,099 ± 0,032	0,180	26,2 ± 2,1	4

<sup>1)</sup> Bezug auf 300 mm freie Weglänge, äußerste Randschicht nicht erfasst.

<sup>2a)</sup> 24 h in Schalung, 363 Tage Wasser bei 20 °C, 1 Tag Trocknung bei Raumluft (wassergelagert)

<sup>2b)</sup> 24 h in Schalung, 6 Tage Wasser bei 20 °C, 713 Tage Klimaschrank bei 20 °C / 65 % r. F. (klimatisch)

### 5.1.5 Zusammenfassung der unterschiedlichen Einflussgrößen

Die Untersuchungen zu den Einflussgrößen auf das Zugtragverhalten und die Rissbildungseigenschaften von Dehnkörperproben mit mineralisch getränkten Rovings zeigen, dass die Gelabscheidungsrate des Tränkungsmaterials und die Tränkungshäufigkeit die Rovinggeometrie maßgeblich beeinflussen. Bei Dehnkörperproben mit mittleren Rovingumfängen  $U_{Rov} < 15$  mm weisen die Rovings in der Regel keine ausreichende Verbundfläche zum Feinbeton auf, da Zugspannungen von über 1.000 N/mm<sup>2</sup> und mittlere Rissabstände  $\omega < 20$  mm nur vereinzelt erreicht werden. Rovingumfänge  $U_{Rov} > 20$  mm sind mit den gewählten Materialparametern anzustreben.

Die Tränkungsmaterialien KSE 100 und KSE 100 ohne Lösemittel führen bei zweifacher Tränkung zu Zugfestigkeiten und Rissbreiten, die den festgelegten Anforderungen ( $w_{cr,max} < 0,10$  mm bei  $\sigma_{DKP} > 1.000$  N/mm<sup>2</sup>) für das Instandsetzungssystem entsprechen. KSE 100 x2 Prüfserien zeigen gegenüber KSE 100 x2 o. L. eine größere Streuung, da die geringe Gelabscheidungsrate von KSE 100 keine gleichmäßige Herstellung von durchtränkten Rovingquerschnitten ermöglicht. Probekörper mit KSE 100 o. L. x2-Tränkung weisen die höchsten Zugspannungen und feinsten Rissbilder bei geringer Streubreite auf.

Die hohe Gelabscheidungsrate von KSE 100 o. L. führt bei zweifacher Tränkung zu einem Faservolumengehalt von ~ 60 %. Die mikroskopisch aufgenommenen Querschnitte der einbetonierten KSE 100 o. L. x2-Rovings zeigen, dass der Feinbeton in die getränkte Rovingmatrix eindringen kann und Einzelfilamente umschließt. Der Ausnutzungsgrad der Rovings wird erhöht, da mehr Filamente am Lastabtrag direkt beteiligt werden. Der Einfluss der Tränkungsmaterialien und die Tränkungshäufigkeit auf die Interaktion von Roving und Feinbetonmatrix wird anhand von analytischen Untersuchungen in Abschnitt 5.2 näher beschrieben.

Eine dauerhafte Wasserlagerung der Dehnkörperproben nach der Betonage führt gegenüber einer Normlagerung zu geringeren Rissbreiten und Rissabständen. Eine verringerte Bruchspannung kann einer Wasserlagerung nicht oder nur bedingt zugeordnet werden. Die Alterung der Dehnkörperproben zeigt insbesondere bei den klimatisch gelagerten Proben KSE 100-720d-c, dass von einer Nachverfestigung der Kontaktzone zwischen Rovings und Feinbetonmatrix auszugehen ist. Bruchspannung und Rissbreiten der gealterten Dehnkörperproben, die geringere Rovingumfänge aufwiesen, sind im Rahmen der Messgenauigkeit vergleichbar zur Referenzprüfserie. Die geringere Verbundfläche führt zu weniger Rissen, welche infolge der Alterung aber durch den besseren Verbund der Filamente die Rissbreiten beschränken. Ein negativer Einfluss durch Alterung konnte anhand der Ergebnisse nicht festgestellt werden.

## 5.2 Analytische Untersuchungen

In den folgenden Abschnitten wird die Wirkungsweise der mineralischen Tränkung am Roving und in Verbundkörperproben mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) und der energiedispersiven Röntgenspektroskopie (EDX) untersucht. Es wurden ungetränkte sowie mineralisch getränkte Rovings (KSE 100, KSE 100 o. L., KSE 100 o. L. x2) in Epoxidharz eingebettet und zu circa fünf Millimeter dicken Mounts präpariert. Die Oberfläche der EP-Mounts wurde planparallel mit feinem Schleifpapier geplättet und mit Diamantschleifpaste (3  $\mu\text{m}$ ) poliert. Des Weiteren wurden Proben aus geprüften Dehnkörperproben gesägt.

Die Untersuchungen erfolgten mit den Rasterelektronenmikroskopen JEOL JSM-6510 im Low-Vacuum-Mode und ZEISS Crossbeam 550L ohne zusätzliche Besputterung zur Erhöhung der Leitfähigkeit. Die REM-Aufnahmen sind das Ergebnis einer rasterförmigen Abtastung mit einem Elektronenstrahl (Primärelektronen). Das Auftreffen der Primärelektronen auf Oberflächen emittiert Sekundärelektronen, die von einem Detektor erfasst und in Spannungsimpulse umgewandelt ein BES-Bild (Backscattered Electron Shadow Image) ergeben [Gri90]. Relevante Bereiche von Filamenten, Tränkung und Feinbeton wurden qualitativ mit einer Elementanalyse mittels EDX-Detektors hinsichtlich der chemischen Eigenschaften untersucht. Des Weiteren wurden Temperatureinflüsse auf die Eigenschaften des Tränkungsmaterials KSE 100 o. L. mittels Thermogravimetrischer Analyse (TGA) untersucht.

### 5.2.1 Rasterelektronenmikroskopie-Analyse

Bild 5-12 zeigt BES-Aufnahmen in unterschiedlichen Vergrößerungsstufen eines ungetränkten Rovings a) und den Einfluss der Tränkungen KSE 100 b), KSE 100 o. L. c) und KSE 100 o. L. x2 d) auf das Filamentgefüge der Carbonrovings. Die BES-Darstellung ist eine Kombination der Analysen von Secondary Electrons (SE) und Backscattered Electrons (BSE). Während SE-Aufnahmen die Oberflächentopografie wiedergeben, spiegeln BSE-Aufnahmen einen chemischen Kontrast anhand der atomaren Masse wider. Die Bilder a1-a2) zeigen den ungetränkten Roving (SGLnat). Filamente und Epoxidharz sind kaum zu unterscheiden, da die emittierten Sekundärelektronen jeweils auf Kohlenstoffbasis beruhen. Die Filamente liegen anders als im Feinbeton sehr verstreut.

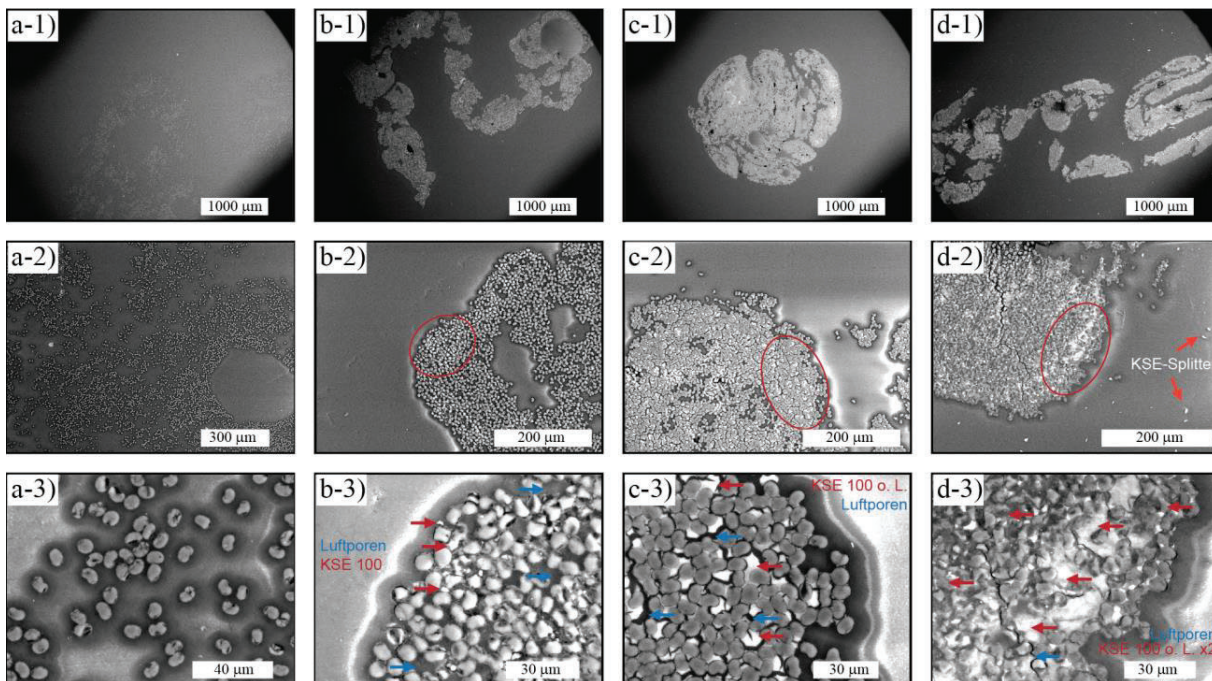


Bild 5-12: REM-Aufnahmen Rovingquerschnitte in EP-Harz, a) SGLnat, b) KSE 100, c) KSE 100 o. L., d) KSE 100 o. L. x2. REM-Einstellungen: Spannung 20 kV, Strahldurchmesser 60, Druck 50-70 Pa, Signal BES

Bei 1.000-facher Vergrößerung in a-3) ist ein ausreichender Kontrast der einzelnen Filamente zum Epoxidharz ersichtlich. Dieser Kontrast wird durch eine geringe Topografie, die beim Schleifen der Mounts am Übergang vom weicheren Epoxidharz zu den härteren Filamenten entsteht, bestimmt. Topografische Unterschiede können zu einer größeren Streuung der Sekundärelektronen führen, aus denen Schattenwürfe oder Blendeffekte im Bild entstehen.

Bei den Aufnahmen 5-12 b-1), c-1) und d-1) ist der Einfluss der Tränkung auf die Querschnittsform ersichtlich. Des Weiteren zeigen diese Aufnahmen einen deutlichen Kontrast von getränktem Roving und dem umgebenen Epoxidharz. Bei 250-facher Vergrößerung in b-2), c-2) und d-2) ist das weiße Kieselgel zwischen den Filamenten zu erkennen (rote Ellipsen). Bei KSE 100 (b-2) sind die weißen Bereiche nur vereinzelt erkennbar. Die Begründung liegt in der geringen Gelabscheidungsrate und dem entsprechend geringen Kieselgel in der Rovingmatrix. Des Weiteren können auch herstellungsbedingte Effekte „fehlendes“ KSE begünstigen, denn durch das Schleifen und Polieren der EP-Mounts bricht KSE aus der Matrix, wie die KSE-Splitter in Bild 5-12 d-2) zeigen. Dieses Herausbrechen scheint auch die Ursache für nahezu KSE freie Randbereiche (dunkelgrau) zwischen den äußeren Filamenten des Rovings und der EP-Matrix zu sein. Dieser Effekt ist bei den Aufnahmen mit KSE 100 o. L. und KSE 100 o. L. x2-Rovings zu sehen (siehe c-3) und d-3) in Bild 5-12). Durch das „fehlende“ KSE entsteht die Topografie im Übergangsbereich von Roving zu Epoxidharz, die zu den entsprechenden Schattierungen in der Bild Darstellung beitragen.

Bei dem Roving mit einfacher KSE 100 o. L.-Tränkung zeigt sich die hohe Gelabscheidungsrate in Form von gefüllten Zwischenräumen mit Kieselgel (siehe 5-12 c-3)). Die Kontaktflächen des Kieselgels zu den Filamenten weisen an vielen Stellen scharfe Bruchkanten auf, sodass das Kieselgel nur an einigen Filamenten haftet, aber keinen umfangreichen Verbund der Filamente untereinander schafft. Die scharfen Bruchkanten können auf Spannungen bei der Bildung des Kieselgels (Kondensationsreaktion mit Wasser) zurückgeführt werden. Der KSE 100 o. L. x2 getränkte Roving weist nur noch vereinzelte Luftporen zwischen den Filamenten auf (siehe Bild 5-12 d-3)). Die Filamente werden vom ausreagierten Kieselgel ummantelt, die SiO<sub>2</sub>-Bindungen untereinander führen zum Materialverbund, Spannungsbrüche treten vereinzelt auf.

Diese Ummantelung zeigt sich an der REM-Aufnahme einer Oberfläche eines mit KSE 100 o. L. x2 getränkten Carbonrovings (siehe Bild 5-13). Das ausreagierte Kieselgel ist auf und zwischen den einzelnen Filamenten zu erkennen. Die Einzelfilamente sind größtenteils vom Kieselgel umschlossen. Die Tränkungsschicht zeigt aber auch verschiedene Fehlstellen.

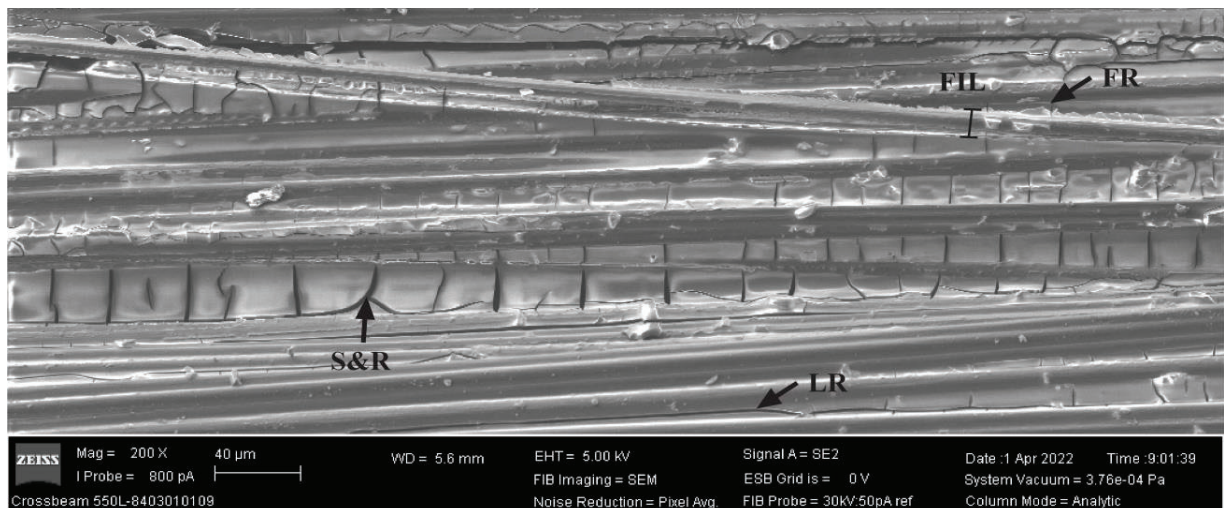


Bild 5-13: FIB-REM-Aufnahme eines KSE 100 o. L. x2 getränkten Carbonrovings in Faserlängsrichtung mit Schalen- und Rissbildung der Tränkung (S&R), Längsrisse (LR) in der Tränkung zwischen Filamenten, Tränkungsfragmente (FR) am teilweise getränkten Einzelfilament (FIL)

Ein diagonal verlaufendes Einzelfilament (FIL) weist nur eine geringe Anhaftung von KSE auf. Dies ist an verbliebenen Fragmenten des Kieselgels (FR) zu erkennen. Da es sich um ein außenliegendes Filament handelt, können auch Beschädigungen nach der Tränkung zum vorliegenden Zustand geführt haben. Die Fragmente zeigen, dass das Tränkungsmaterial KSE 100 o. L. x2 in intaktem Zustand in einer gewissen Schichtdicke vorliegt.

Der getränkte Roving zeigt auch eine für ausreagierte Kieselsäureester typische Schalen- und Rissbildung (S&R) [Bos07]. Insbesondere an lokalen Stellen mit viel Tränkungsmaterial zwischen den Filamenten. Am unteren Rand des Bildes 5-13 ist eine Längsrissbildung (LR) zwischen nahezu vollständig getränkten Filamenten zu sehen. Schalen- und Rissbildung infolge von Spannungen im ausreagierten Kieselgel werden an den äußeren Filamenten begünstigt, da das Entweichen des

Ethanol von der Oberfläche schneller voranschreitet als bei innenliegendem Kieselgel. Ein ähnliches Verhalten konnte beim Ausreagieren von Kieselsäureester in den Petrischalen festgestellt werden (siehe Abschnitt 3.1.2).

Mit der energiedispersiven Röntgenspektroskopie wurde das Kieselgel am Roving sowie im Verbund mit der Feinbetonmatrix untersucht. Mit EDX lässt sich eine qualitative Verteilung der chemischen Elemente analysieren. Jedes chemische Element sendet eine charakteristische Röntgenstrahlung aus, wenn es durch Primärelektronen angeregt wird. Primärelektronen trennen beim Auftreffen auf die Oberfläche ein Elektron der inneren Schale heraus. Die entstandene (Energie-)Lücke wird durch ein Elektron einer höheren (äußeren) Schale ersetzt, dabei tritt eine Emissionsstrahlung auf, die vom Detektor bestimmt werden kann. Je nach Übergang eines Elektrons auf den Elektronenschalen (z. B. K-Schale, L-Schale oder M-Schale) kommt es zu unterschiedlich starken Emissionen, die für die vorhandenen Elemente charakteristisch sind. Die sogenannte  $K_{\alpha}$ -Linie ist in charakteristischen Röntgenspektren besonders stark ausgeprägt und wird bei der EDX-Analyse verwendet. Jedes Element weist eine spezifische Wellenlänge in der  $K_{\alpha}$ -Linie mit einer zugehörigen Photonenenergie auf, sodass über die Häufigkeit der detektierten Emission eine qualitative Analyse der Elemente möglich ist.

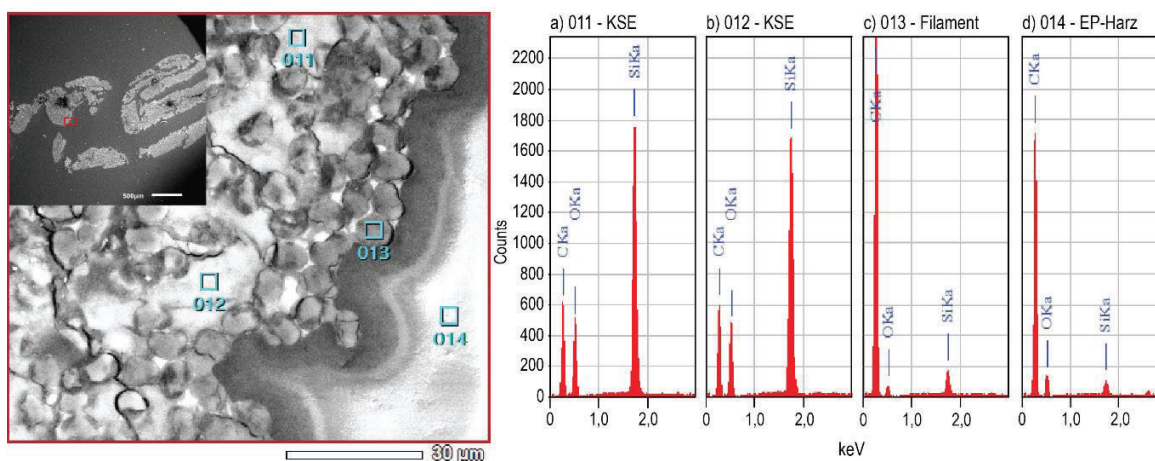


Bild 5-14: REM-EDX-Aufnahme KSE 100 o. L. x2 getränkter Roving in EP-Mount gebettet mit Element-Counts über Spottmessung, a) Zwischenraum mit KSE 100, b) Zwischenraum mit KSE 100, c) Mittig auf Filamentquerschnitt, d) EP-Matrix

Am Beispiel des Rovings mit KSE 100 o. L. x2-Trängung ist an vier Stellen über eine Spottmessung mittels kleiner rechteckiger Messflächen eine EDX-Analyse durchgeführt worden. Angeregt wurden die Spots über einen Zeitraum von 30 Sekunden bei 20 kV. Bild 5-14 zeigt den Bildausschnitt der BES-Aufnahme mit vier Messstellen und den dazugehörigen Peakdarstellungen der detektierten Elemente. Die Spots 011 und 012 liegen im Filamentzwischenraum, der mit KSE 100 o. L. gefüllt ist. Entsprechend zeigt das EDX-Spektrum viele Counts der  $K_{\alpha}$ -Linie bei einer Wellenlänge von 1,84 keV für Silicium (Si) (siehe 5-14 a) und b)). Des Weiteren ist eine Anregung von Sauerstoff (O) aufgrund kleiner Poren im Kieselgel gegeben sowie eine geringe Anregung der  $K_{\alpha}$ -Linie für Kohlenstoff (C) durch die kohlenstoffhaltige Umgebung mit Carbonfilamenten und EP-Harz. Die Spottmessung 013 mittig auf einem Filament zeigt viele Counts für das Element Kohlenstoff



auf, während Sauerstoff und Silicium zu vernachlässigen sind (siehe Bild 5-14 c)). Gleiches ist auch am Spot 014 für die EP-Matrix zu sehen. Weitere Elemente oberhalb der Wellenlänge von 3,0 keV wurden nicht detektiert.

Die Interaktion der getränkten Carbonrovings mit KSE 100 o. L. x2 und der Feinbetonmatrix wurde an Proben aus einer geprüften Dehnkörperprobe mittels REM-EDX-Aufnahme durchgeführt. Bild 5-15 zeigt die Aufnahme des Querschnitts in der geringsten Vergrößerungsstufe. Der getränkte Roving unterteilt sich nach der Betonage in mehrere Bereiche aus Filamentbündeln (FB), bei denen viele Einzelfilamente zu einem Bündel zusammenliegen. Zwischen den Filamenten der Filamentbündel ist kein Feinbeton vorhanden. Des Weiteren liegen Filamentansammlungen (FS) vor. Das Gefüge zwischen den Filamenten ist nicht so dicht wie bei Filamentbündeln, die Feinbetonmatrix dringt teilweise zwischen die Filamente. Die Filamentansammlungen sind in Bild 5-15 a) als dunkelgraue Punktsammlungen zu erkennen (FS), während die Filamentbündel als schwarze Flächen erscheinen. Den dritten Bereich bilden Einzelfilamente (FIL), die weit auseinander liegen und jeweils von der Feinbetonmatrix umschlossen sind.

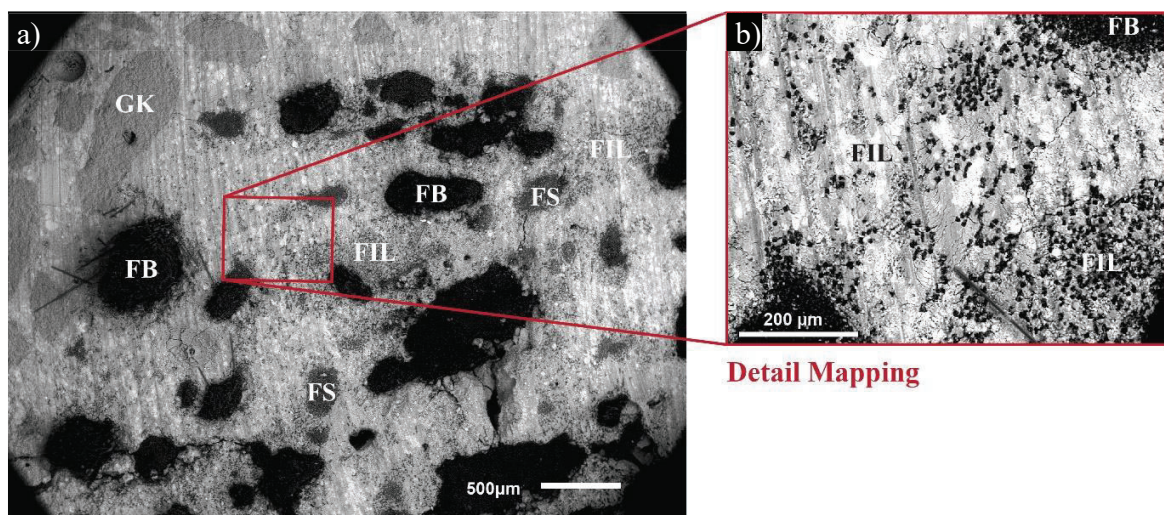


Bild 5-15: REM-Aufnahme eines KSE 100 o. L. x2 getränkten Rovings in Feinbeton aus einer geprüften Dehnkörperprobe mit Detailbestimmung für qualitative Elementbestimmung mittels EDX-Detektor. Filamentbündel (FB), Filamentansammlung (FS), Einzelfilamente (FIL) und Gesteinskörnung (GK)

Gesteinskörnungen (GK) aus der Feinbetonmatrix dringen nur an den Rand des getränkten Rovings. Zwischen den Filamentbündeln, Filamentansammlungen und Einzelfilamenten sind nur gesteinskörnungsfreie Feinbetonanteile (Zementleim) vorzufinden (siehe 5-15 a)). Anhand des rot markierten Details Mapping wurden die Spotmessungen sowie ein Flächenmapping mittels EDX durchgeführt.

Bild 5-16 zeigt das Detail aus Bild 5-15 b) in einer weiteren Vergrößerung mit drei rechteckigen Flächen für die Spotmessung und die entsprechenden EDX-Spektren. Der Spot 008 liegt in einem hellweißen Bereich im Feinbeton, während Spot 009 in einem hellgrauen Feinbetonbereich liegt. Spot 010 liegt mittig auf einem Carbonfilament. Die Peakdarstellungen der Spots 008 und 009

zeigen vorwiegend Calcium und Silicium der  $K_{\alpha}$ -Linien. Beim Spot 008 überwiegt Calcium, während bei Spot 009 etwas mehr Silicium-Counts vorliegen. Dies können partiell unterschiedlich hohe Anteile der Elemente infolge des Tränkungsmaterials sein. Bei der EDX-Analyse dieser Probe ist zu beachten, dass es sich um eine gesägte Feinbetonprobe handelt, die nicht nachbehandelt wurde und somit eine gewisse Topografie aufweist, welche zu stärkeren Streuungen in den Element-Counts führen kann. Neben den Hauptelementen Silicium und Calcium finden sich auch für Feinbeton typische Elementspuren von Sauerstoff (O), Natrium (Na), Magnesium (Mg), Aluminium (Al) und Schwefel (S) (siehe 5-16 a) und b)). Die Spotmessung 010 mittig auf dem Carbonfilament zeigt erwartungsgemäß einen dominierenden Kohlenstoffpeak (siehe 5-16 c)).

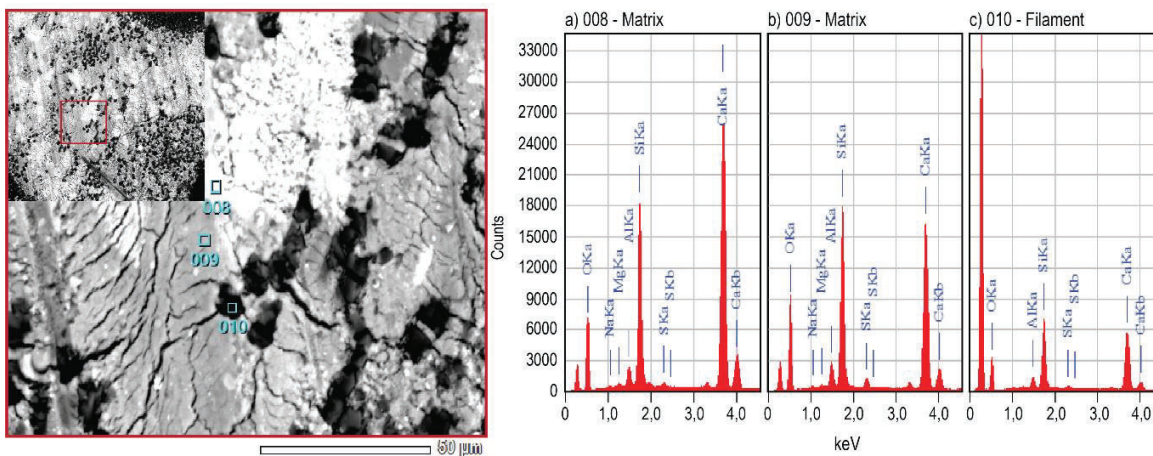


Bild 5-16: REM-EDX-Aufnahme KSE 100 o. L. x2 getränkter Roving im Feinbeton mit Element-Counts

Um die Ursache der unterschiedlichen Kontrastbereiche in Weiß und Grau und die genauere Verteilung von Si und Ca zu analysieren, wurde das Detail aus Bild 5-15 b) mit einem EDX-Flächenmapping untersucht. Beim Mapping werden für jedes Pixel des Bildausschnittes die Häufigkeit der zu untersuchenden Elemente anhand der Emission der charakteristischen Röntgenstrahlung erfasst. Die Messung erfolgt mehrmals über die ausgewählte Probenfläche, bis eine aussagekräftige Darstellung der gemessenen Elemente möglich ist. Es wird eine zweidimensionale farbige Elementverteilung über die Probenfläche aufgetragen. Bild 5-17 zeigt das REM-Referenzbild a) und die Darstellung der vorhandenen Elemente der gemessenen Häufigkeit für Calcium b), Silicium c) und Kohlenstoff d). Entsprechend der in Bild 5-17 abgebildeten Farbskala wird die örtliche Häufigkeit eines Elements von wenig (schwarz/dunkelblau) zu viel (rot/weiß) dargestellt.

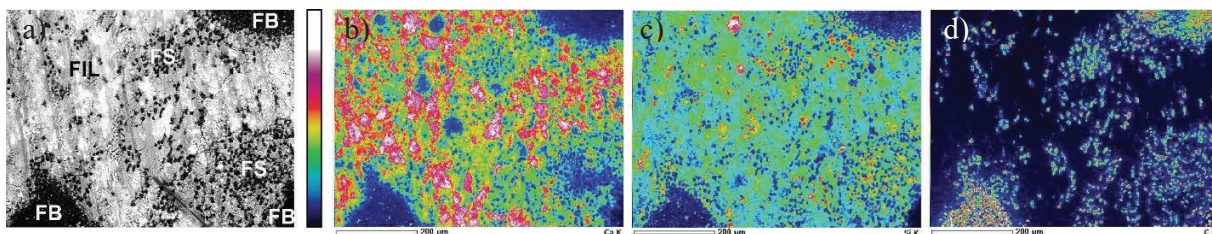


Bild 5-17: EDX-Mapping mit Elementverteilung, a) REM Referenzbild, b) Calcium, c) Silicium, d) Kohlenstoff. Rovingbereiche: Filamentbündel (FB), Filamentansammlung (FS) und Einzelfilamente (FIL)

Der Vergleich des Referenzbildes a) mit der Elementverteilung zeigt eine Deckung der weißen Bereiche, der gesteinskörnungsfreien Feinbetonmatrix zwischen den Filamenten, mit der Häufigkeitsverteilung von Calcium (rot-weiße Färbung in b)). Die Bereiche mit Filamentbündel (FB) lassen kaum ein Eindringen von Zementleim zwischen die Filamente zu, sodass weniger Calcium nachzuweisen ist. Silicium ist in den Filamentbündeln auch kaum nachzuweisen, da es nur in geringen Schichtdicken vorliegt, wie Bild 5-17 c) zeigt. Die Emission der charakteristischen Röntgenstrahlung des Kohlenstoffs überwiegt. Zusätzlich führt die herstellungsbedingt stärkere Topografie der Filamentbündel dazu, dass eine größere Streuung der Strahlung auftritt. Die Elemente, die in geringerer Menge vorliegen, werden unterrepräsentiert. Silicium ist vorwiegend zwischen den Filamentansammlungen (FS) nachzuweisen. Durch die zweifache Tränkung ist der Bereich der Filamentansammlung aufgelockert und mit Kieselgel gefüllt. Dies zeigen vermehrt gelb und rot gefärbte Bereiche in Bild 5-17 c), die den FS-Bereichen aus a) entsprechen. Die Elementverteilung für Kohlenstoff in d) zeigt die einzelnen Filamente in der Umgebung von Calcium- und Siliciumverbindungen sowie die Filamentbündel. Die deutlichere Färbung in Rot der Filamente, die im Bündel vorliegen, deutet auf die Wirkung der Signalstärke durch häufigeres lokales Auftreten und größere Mengen des Elements hin.

Neben der Topografie der Probe beeinflussen Fluoreszenz, Absorption und die Ordnungszahl der Elemente die quantitative Analyse der EDX-Spektren. Leichtere Elemente sind erst ab größeren Gewichtsanteilen besser nachweisbar. Für die untersuchten Elemente ist Kohlenstoff mit der Ordnungszahl 9 schlechter nachweisbar als Silicium (Ordnungszahl 11) und Calcium (Ordnungszahl 14).

Calcium kommt in Form von Calciumoxiden unter anderem als Tricalciumsilicat  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  im Portlandzement vor und reagiert durch die Zugabe von Wasser in der ersten Hydratationsstufe zu Calciumhydroxid  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  und Trisulfat (Ettringit). Es entsteht ein Zementleim mit hohem pH-Wert  $> 12$ . Dieser thixotrope Zementleim dringt zwischen die Filamente, zwischen die Filamentansammlungen und an den Rand der Filamentbündel des getränkten Rovings. Das dort vorliegende amorphe Siliciumdioxid  $\text{SiO}_2$  (Kieselgel der Tränkung) sowie die im Zement enthaltenen Siliciumverbindungen werden aufgrund des basischen Milieus gelöst und reagieren in der zweiten Stufe der Hydratation zu Calciumsilicathydraten (CSH-Phasen). Amorphes Siliciumdioxid ist in Säuren und im pH-neutralen Bereich wenig löslich. Ab einem pH-Wert von 8 nimmt die Löslichkeit mit steigendem pH-Wert rapide zu [Ile78]. In der Zementmatrix sind pH-Werte  $> 12$  vorhanden, die das  $\text{SiO}_2$  entsprechend gut lösen. Die Beteiligung des Kieselgels der Tränkung am Hydratationsprozess lässt sich aus der Überlagerung von Calcium- und Siliciumelementen im Bereich zwischen den Filamenten aus den Mappings in Bild 5-17 ableiten.

### 5.2.2 Thermogravimetrische Analyse des Tränkungsmaterials

Ein Temperatureinfluss auf die KSE 100 o. L.-Tränkung wurde mittels Thermogravimetrie Analyse (TGA) untersucht. Die TGA ist ein Verfahren zur Bestimmung der Massenänderung einer Probe in Abhängigkeit von Temperatur und Zeit. Vorrangig wird die TGA zur Bestimmung des Zersetzungsverhaltens von Polymeren eingesetzt [Ehr20]. Mithilfe der kombinierten TGA/DSC 3+

der Fa. Mettler Toledo wird zeitgleich zur TGA eine dynamische Differenzkalorimetrie DDK (besser bekannt als differential scanning calorimetry (DSC)) durchgeführt. Mit der DSC wird der gewichtsbezogene Wärmestrom einer Probe gemessen. Ferner kann mit der kombinierten TGA-DSC z. B. die Glasübergangstemperatur einer Probe bestimmt werden. Die Glasübergangstemperatur bzw. die Erweichungstemperatur bestimmt für (teilweise) amorphe Polymere den Zeitpunkt des Übergangsbereichs zu einem gummielastischen, flexiblen oder hochviskosen Zustand (entropieelastischer Bereich). Der Glasübergangspunkt wird in einem materialspezifischen Temperaturbereich durch die Veränderung des Wärmestroms erkennbar. Darüber hinaus können weitere Effekte bestimmt werden, die durch exotherme oder endotherme Reaktionen mit oder ohne Masseverlust einhergehen (z. B. Verdampfungs-, Schmelz- oder Oxidationsvorgänge).

Die Prüfung des Kieselgels wurde mit einer Starttemperatur von 25 °C bis zu einer Endtemperatur von 1.050 °C durchgeführt. Die dynamische Aufheizrate betrug 25 K/min. Die Prüfkammer wurde mit Stickstoff evakuiert.

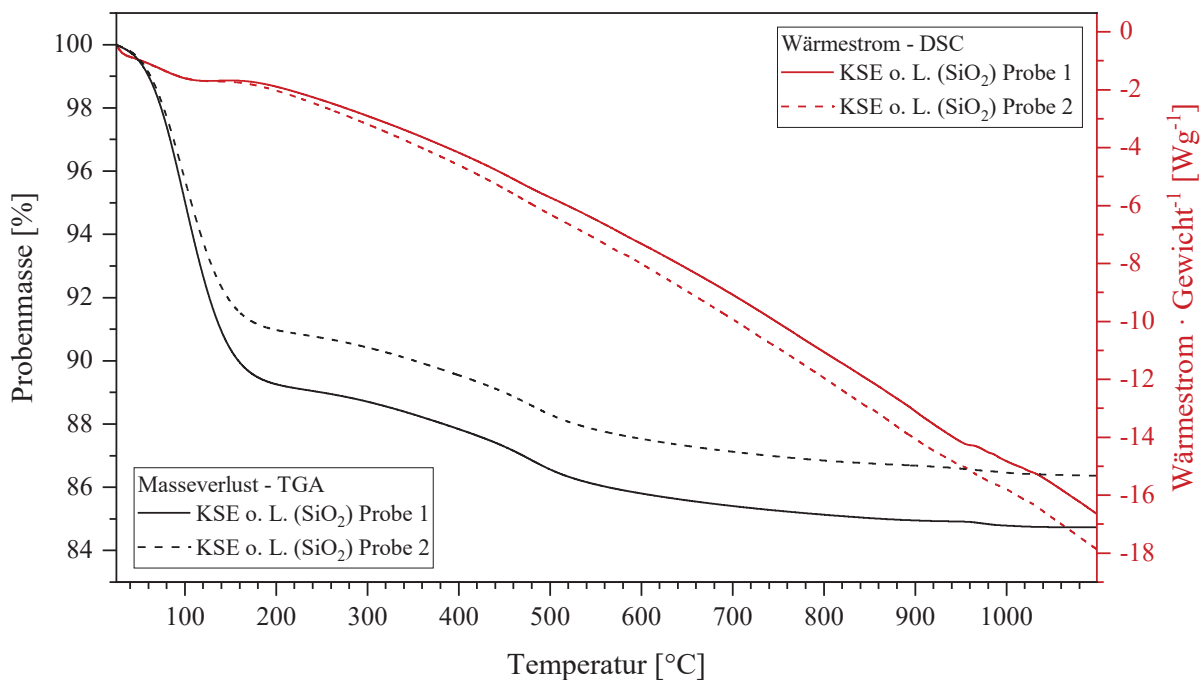


Bild 5-18: Messkurven aus thermogravimetrischer Analyse (TGA) und dynamischer Differenzkalorimetrie (DSC) von ausreagiertem Kieselgel der KSE 100 o. L.-Tränkung

Bild 5-18 zeigt die TGA- / DSC-Kurven von zwei Messungen des Kieselgels (KSE 100 o. L.). Die Kurven des Masseverlustes verlaufen gleichmäßig mit einer relativen Differenz von circa zwei Prozent zueinander. Dieser Unterschied lässt sich dadurch erklären, dass das Probenmaterial nicht konditioniert wurde und unter Raumluftbedingungen lagerte. Entsprechend kann der initiale Wassergehalt der Proben variieren. Die Kurven des Massenverlustes weisen von Beginn an eine leichte Massenreduzierung auf, die im Bereich von 100 bis 150 °C stark zunimmt. Physikalisch gebundenes Wasser verdampft in diesem Bereich und führt zur Gewichtsreduzierung der Probenmasse auf circa 91 bis 93 Gewichtsprozent. Die kontinuierliche Gewichtsverringerng flacht ab circa 500 °C

weiter ab und pendelt sich bei etwa 83 bzw. 85 % Probenmasse ein. In der Hauptsache verlieren die Proben Masseanteile durch verdampfendes Wasser.

Die TGA-Messkurven zeigen einen endothermen Reaktionsverlauf (Verdampfen von Wasser aus der Probe) und weisen keine Bereiche oder Wendepunkte auf, die auf ein Erweichen des Probenmaterials hindeuten. Ausgasungen oder Oxidationen von Spurenelementen, wie Natriumoxid, die in einer Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) in geringsten Gewichtsanteilen nachzuweisen waren, können für die andauernde Gewichtsreduzierung und den Knickpunkt bei 500 °C verantwortlich sein. Des Weiteren kann ein Aufbrechen der Kieselgelstruktur durch Temperaturspannungen im Verlauf der Messung ein verzögertes Freisetzen von Porenwasser bewirken. Insgesamt können die Kurvenverläufe als typisch für amorphes SiO<sub>2</sub> angesehen werden, wie z. B. vergleichbare Messungen in [Ari20] zeigen. Eine Glasübergangstemperatur konnte für das Kieselgel im Bereich bis 1.050 °C nicht festgestellt werden. Üblicherweise weist amorphes SiO<sub>2</sub> Glasübergangstemperaturen von über 1.200 °C auf, z. B. [Cha10]. Anzunehmen ist, dass die Erweichungstemperatur für das untersuchte KSE in einem ähnlichen Temperaturbereich liegt.

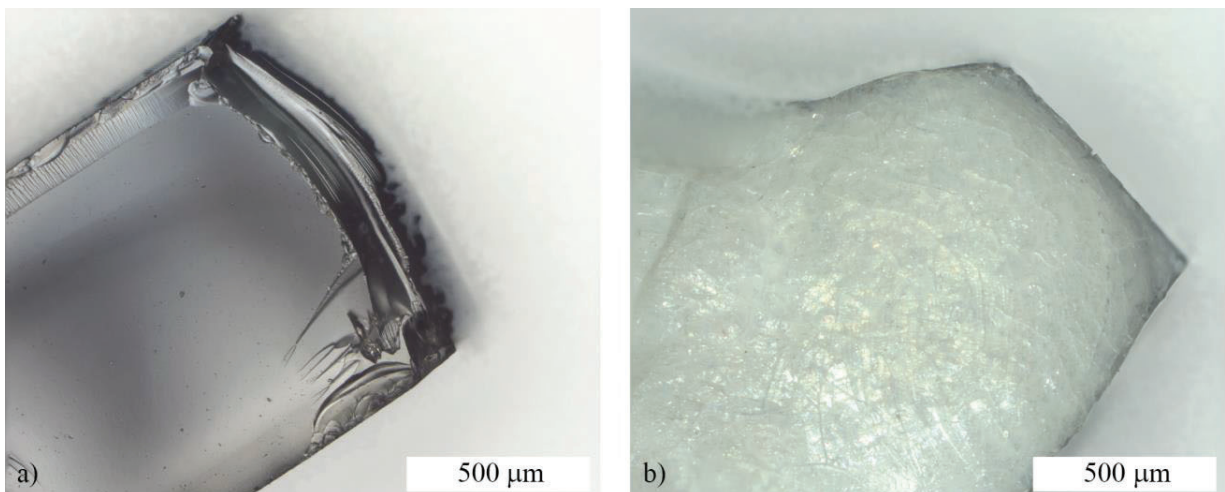


Bild 5-19: Kieselgel (KSE 100 o. L.) a) ausreagiert unbehandelt und b) nach TGA bis 1.050 °C

Bild 5-19 zeigt Kieselgel vor und nach der TGA. Das unbehandelte KSE o. L. ist transparent mit scharfen Bruchkanten durch die Spannungen während der Polykondensationsreaktion (siehe Bild 5-19 a)). Das auf 1.050 °C erhitzte Kieselgel in b) zeigt eine vielfach gebrochene und spröde Struktur.

WILHELM untersuchte verschiedene polymergetränkte und mineralisch getränkte Carbonrovings mittels TGA und konnte die typischen Erweichungstemperaturen im Bereich von 200 °C für die Polymertränkungen aufzeigen. Die geprüften mineralischen Tränkungsmaterialien auf Basis von Zementsuspension zeigten eine Gewichtsreduzierung infolge des verdampfenden Wassers aus der Rovingtränkungsmatrix. Alle Proben zeigen ab 550 °C ein Zersetzen der Carbonfasern, welches bei den polymergetränkten Proben zu einem vollständigen Masseverlust der Proben führt. Die mineralisch getränkten Proben behalten eine Restmasse von 50 bis 60 %, die auf die Zementsuspension zurückzuführen ist. [Wil21]

Die im Rahmen dieser Arbeit mit der TGA untersuchte Tränkung weist wie die mineralischen Tränkungen in [Wil21] lediglich einen Masseverlust infolge von entweichendem freiem Wasser auf. Für mineralische Tränkungen von Carbonrovings kann festgehalten werden, dass in Bezug auf die Temperaturbeständigkeit die Carbonfasern limitierend sind. Beim Masseverlust der Tränkung sind gegebenenfalls Schwindprozesse infolge der Wasserabgabe zu berücksichtigen.

### 5.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse aus den analytischen Untersuchungen

Die analytischen Untersuchungen mittels Rasterelektronenmikroskop und energiedispersiven Röntgenspektroskopie zeigen, dass eine Tränkung mit Kieselsäureester mit hohen Gelabscheidungsraten zu umfangreichen Durchdringungen des Rovinggefüges führt. Die zweite Tränkung der Rovings erhöht den inneren Verbund der Filamente, da das Kieselgel die Filamente umfassender umschließt. Dies zeigt sich an den höheren Zugfestigkeiten von zweifachgetränkten Rovings gegenüber einfach getränkten Rovings, insbesondere im Verbundprobekörper.

Die Untersuchungen an der Rovingoberfläche zeigen aber auch bestehenbleibende Schalenbildungen und Risse infolge von Schwindspannungen auf, die zu Fehlstellen in der Tränkungsschicht führen (siehe Bild 5-14). Für die alkaliresistenten Carbonfasern haben die Fehlstellen keine Auswirkung. Mit einem Elastifizierer wie bei KSE 500E könnten durch spannungsärmere Kieselgelbrücken Risse verringert werden [KSE500E]. Es sollte nach Möglichkeit ein lösemittelfreier Elastifizierer eingesetzt werden. Ob eine geschlossene Tränkungsschicht den Einsatz von alkaliempfindlichen Fasern wie Basalt ermöglicht, ist zu untersuchen, da während der Hydratation der alkalische Zementleim die Tränkungsschicht aus amorphem Kieselgel löst und an der Bildung von CSH-Phasen beteiligt. Dieser Prozess führt zu einem guten Verbund vieler Filamente des getränkten und aufgelockerten Rovinggefüges und erhöht die Zugtragfähigkeit, wie die Ergebnisse aus Dehnkörperversuchen mit KSE 100 o. L. x2 zeigen (siehe Abschnitt 4.1).

Die Untersuchungen des Tränkungsmaterials mit der thermogravimetrischen Analyse zeigten bis zu einer Temperatur von 1.050 °C, dass keine Beeinträchtigungen des Tränkungsmaterials infolge einer Temperaturerhöhung zu erwarten sind.

## **6 Weitergehende Untersuchungen am entwickelten Instandsetzungssystem**

### **6.1 Dehnkörperproben mit unterschiedlicher Beanspruchung im einaxialen Zugversuch**

Basis für die Untersuchungen in den nachfolgenden Abschnitten sind die Ergebnisse von den einaxialen Zugversuchen an Dehnkörperproben in Abschnitt 4.1 und den Einflussuntersuchungen zum Tränkungsmaterial in Abschnitt 5.1. In den genannten Kapiteln konnte festgestellt werden, dass eine zweifache Trängung von Carbonrovings mit KSE 100 oder KSE 100 o. L. erforderlich ist, um ausreichende Zugfestigkeiten und Rissverteilungseigenschaften für eine Gebrauchstauglichkeit als Instandsetzungssystem zu erreichen. Entsprechend werden an Dehnkörperproben mit zweifachgetränkten Rovings einaxiale Zugversuche nach temperierter Wasserlagerung durchgeführt. Des Weiteren werden Dehnkörperproben unter Temperaturbeaufschlagung während der Prüfung untersucht. Ziel ist die Bewertung der erforschten Materialkombinationen hinsichtlich Umgebungseinflüssen. Damit können nachfolgend Aussagen in Bezug auf die Eignung in der Praxis getroffen werden. Um eine anwendungsorientierte Verarbeitung der technischen Textilien zu prüfen, werden eigens hergestellte Gelege in die Versuchsmatrix miteinbezogen.

#### **6.1.1 Dehnkörperproben nach beschleunigter Alterung durch temperierte Wasserlagerung**

Zur Alterungsbeständigkeit von Dehnkörperproben mit mineralischer Trängung waren keine Daten bekannt. Wie in Abschnitt 5.1.4 festgestellt, führt eine Alterung unter klimatischen und wassergelagerten Bedingungen zu keiner signifikanten Verringerung der Zugtragfähigkeit. Um den Einfluss einer fortschreitenden beschleunigten Alterung auf die mineralisch getränkten Rovings im Feinbeton zu untersuchen, wurden Dehnkörperproben in demineralisiertem temperiertem Wasser bei 50 °C gelagert. Die Einlagerungszeiten betragen 100, 1.000, 3.000 und 4.000 Stunden. Die einzelnen Prüfserien bestanden aus vier Dehnkörperproben mit KSE 100 x2 getränkten Rovings, von denen eine Referenzprobe zu Beginn des Einlagerungszeitraums geprüft wurde.

Die Betrachtung zur beschleunigten Alterung durch temperierte Wasserlagerung basiert auf der Arrhenius-Gleichung, nach der die Geschwindigkeitskonstante einer Reaktion in Abhängigkeit zur vorliegenden Temperatur bestimmt werden kann. In Anlehnung an Arrhenius stellten LITHERLAND et al. verschiedene Dauerhaftigkeitsmodelle von (AR-) Glasrovings im alkalischen Milieu auf [Lit81, Pur01, Or104, Sch09]. Der Hauptbestandteil von technischen Gläsern, wie AR-Glas, ist Siliciumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) und damit vergleichbar mit der KSE-Trängungsschicht der Carbonrovings.

Auf Basis der analytischen Untersuchungen in Abschnitt 5.2.1 ist davon auszugehen, dass die Trängung nicht mehr vollständig als reine  $\text{SiO}_2$ -Schicht vorliegt und eine beschleunigte Alterung nicht zu einer Verringerung der Tragfähigkeit führt. Daher beabsichtigte die Untersuchung zur beschleunigten Alterung im Rahmen dieser Arbeit keine Entwicklung eines Dauerhaftigkeitsmodells am getränkten Roving. Vielmehr wurde überprüft, welche Auswirkungen eine beschleunigte Reaktion von KSE und Feinbetonmatrix auf die Zugtragfähigkeit und die Rissbildung von Dehnkörperproben hat.

Bild 6-1 a) zeigt die Spannungs-Dehnungslinien der einzelnen Referenzmessungen der Prüfserien zur beschleunigten Alterung sowie die Referenzprüfserie KSE 100 x2 als Mittelwertkurve. Der Kurvenverlauf der vier Einzelreferenzen (Ref., KSE 100x2-h-w) verläuft annähernd gleich zur Referenzprüfserie KSE 100 x2. Die Bruchspannung der Referenzprobe KSE 100 x2-100h-w weist mit  $\sigma_{DKP,Ref,KSE100x2-100h-w} = 1.044 \text{ N/mm}^2$  einen geringeren Wert gegenüber den anderen Referenzproben auf. Die Referenzproben zu den Prüfserien 1.000 h, 3.000 h und 4.000 h zeigen annähernd gleiche Bruchspannungen von  $\sigma_{DKP,Ref,KSE100x2-1000/3000/4000h-w} \sim 1.300 \text{ N/mm}^2$  auf, die gegenüber der Prüfserie KSE 100 x2 circa  $200 \text{ N/mm}^2$  geringer ausfallen (siehe Bild 6-1 a)). Insgesamt zeigen alle vier Einzelreferenzen geringere Textilzugspannungen gegenüber dem Mittelwert der Referenzprüfserie KSE 100 x2 auf. Entsprechend der Ergebnisse zur Streubreite von KSE 100 x2 Prüfserien aus Abschnitt 5.1 ist festzustellen, dass die Ergebnisse der Einzelreferenzproben im erwartbaren Bereich liegen.

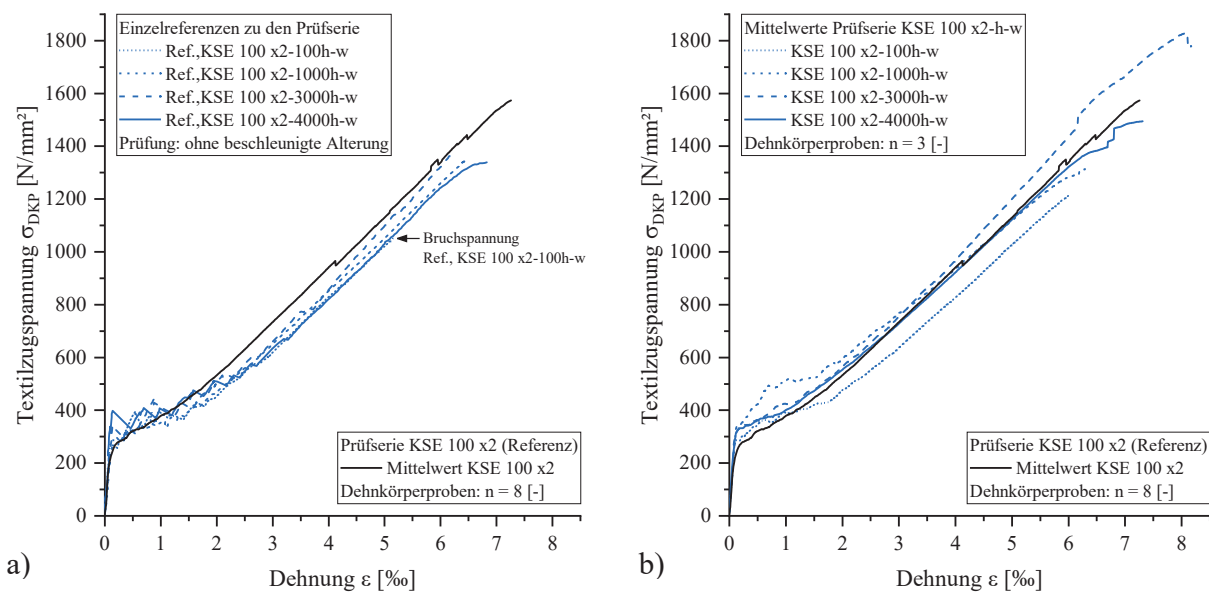


Bild 6-1: Spannungs-Dehnungsbeziehung, a) Einzelreferenzen zu den wassergelagerten Proben und Referenzprüfserien KSE 100 x2, b) Mittelwertkurven nach Wasserlagerung bei 50 °C

Die Spannungs-Dehnungslinien der beschleunigt gealterten Proben in Bild 6-1 b) weisen weiterhin typische Kurvenverläufe auf, die im Rissverhalten etwas steifer ausfallen als bei den Einzelreferenzproben. Die Festigkeitssteigerung des Feinbetons spielt für die Erstrisslast über die gewählten Einlagerungszeiten eine untergeordnete Rolle, wie Bild 6-1 b) zeigt.

Nach einer Einlagerungszeit von 100 Stunden weisen die Proben gegenüber der Einzelreferenz eine um  $200 \text{ N/mm}^2$  gesteigerte Bruchspannung auf. Die 1.000 Stunden eingelagerten Proben zeigen keine signifikante Steigerung der Zugfestigkeit. Die Prüfserie KSE 100 x2-4000h-w führt zu Bruchspannungen, die im Bereich der Referenzprüfserie KSE 100 x2 liegen. Bei KSE 100 x2-3000h-w fällt die Bruchspannung mit  $\sigma_{DKP} = 1782 \pm 91 \text{ N/mm}^2$  höher aus als bei der Referenzprüfserie KSE 100 x2 (siehe Bild 6-1 b)).



Insgesamt weist keine der Prüfserien einen Zugfestigkeitsverlust auf. Bei den Prüfserien 100, 1.000 und 4.000 Stunden ist eine moderate Steigerung der Bruchspannung nach Alterung festzustellen. Die Prüfserie mit 3.000-stündiger Einlagerung weist eine Zugfestigkeitssteigerung von circa 450 N/mm<sup>2</sup> auf. Im Rahmen von herstellungsbedingten Streubreiten und der Messschwankungen ist festzustellen, dass durch eine beschleunigte Alterung eher eine Erhöhung der Zugfestigkeit zu erwarten ist. Es ist anzunehmen, dass durch eine temperierte Wasserlagerung die chemischen Prozesse der CSH-Phasenbildung zwischen der KSE-Tränkungsschicht und der Feinbetonmatrix voranschreiten und beschleunigt werden.

Die Ergebnisse der Rissauswertung zeigen ein verbessertes Verbundverhalten, da eine Steigerung der Rissanzahl und eine Verringerung der Rissbreiten festzustellen ist. Dies konnte bereits bei den wasser- und klimatisch gelagerten Proben unter Raumkonditionen (siehe Abschnitt 5.1.4) beobachtet werden. In Bild 6-2 sind die entsprechenden mittleren Rissbreiten und maximalen Rissbreiten als linearisierte Graphen dargestellt. Gegenüber der Referenzprüfserie weisen die Prüfserien mit längeren Einlagerungszeiten von 1.000, 3.000 und 4.000 Stunden verringerte Rissbreiten auf. Alle Graphen zur mittleren Rissbreite der beschleunigt gealterten Proben in Bild 6-2 a) unterschreiten die kritische Rissbreite von 0,10 mm. Auch bei den maximalen Rissbreiten zeigt sich die positive Wirkung der Alterung. Eine Halbierung der maximalen Rissbreite bei steigender Textilzugspannung zeigt die Prüfserie KSE 100 x2-3000h-w in Bezug zur Referenzprüfserie KSE 100 x2 in Bild 6-2 b).

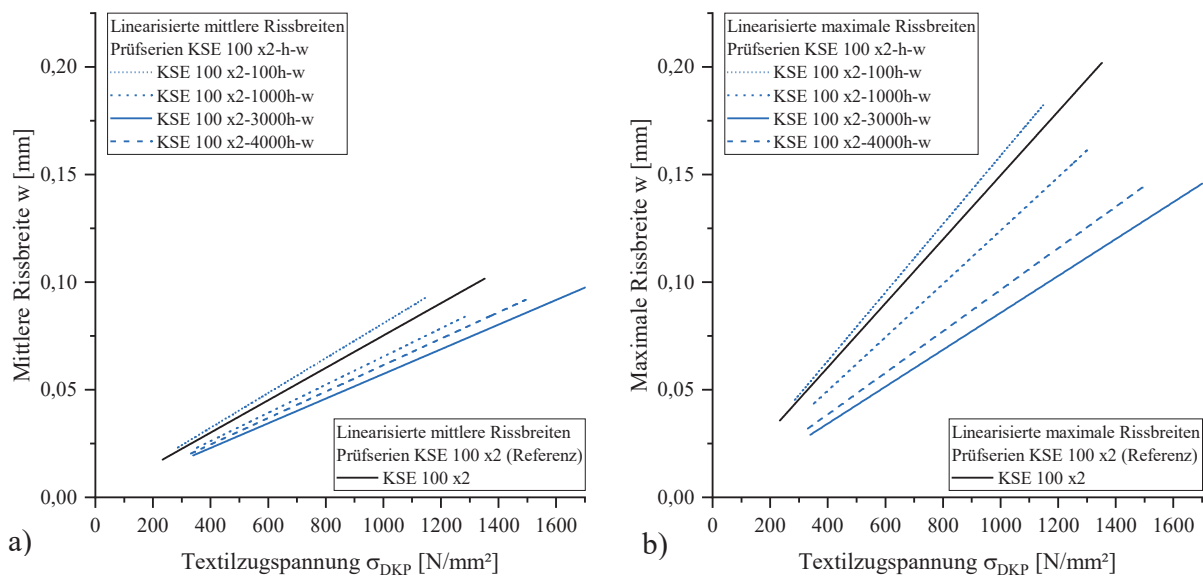


Bild 6-2: Linearer Verlauf der Rissbreiten-Spannungsbeziehung der Prüfserien nach beschleunigter Alterung bei 50 °C Wasserlagerung mit unterschiedlich getränkten Rovings, a) Mittlere Rissbreiten, b) Maximale Rissbreiten

Im Vergleich zur Referenzprüfserie KSE 100 x2 weisen die Prüfserien KSE 100 x2-3000h-w und KSE 100 x2-4000h-w Reduzierungen der mittleren und maximalen Rissbreiten von 20 % bzw. 25 % bei einer Zuglast von 15 kN bzw. 1.000 N/mm<sup>2</sup> Zugspannung auf. Entsprechend größer ist die Rissanzahl von im Mittel zusätzlichen fünf Rissen im Messbereich, die eine Reduzierung des

mittleren Rissabstands von 17 mm auf 13 mm begünstigt. Die Ergebnisse zur Bruchlast, zu mittleren und maximalen Rissbreiten bei einer Zuglast von 15 kN und bei maximaler Zuglast sowie die Rissanzahl der Prüfserien zur beschleunigten Alterung sind in Tabelle 6-1 dargestellt.

Tabelle 6-1: Prüfserie IV – Dehnkörperproben beschleunigt gealtert – Bruchlast, Rissbreiten und Rissanzahl

Prüfserie	Bruchlast $F_u$ [kN]	Mittlere Rissbreite bei 15 kN [mm]	Max. Rissbreite bei 15 kN [mm]	Mittlere Rissbreite bei $F_u$ [mm]	Max. Rissbreite bei $F_u$ [mm]	Rissan- zahl <sup>1)</sup> [-]	Anzahl Proben [-]
KSE 100 x2	20,8 ± 2,2	0,074 ± 0,024	0,146	0,102 ± 0,033	0,202	16,8 ± 2,6	8
KSE 100 x2- 100h-w	17,5 ± 2,0	0,083 ± 0,030	0,163	0,099 ± 0,035	0,191	17,6 ± 2,5	3
KSE 100 x2- 1000h-w	20,0 ± 0,2	0,067 ± 0,030	0,125	0,095 ± 0,034	0,168	18,0 ± 1,7	3
KSE 100 x2- 3000h-w	27,2 ± 1,7	0,056 ± 0,013	0,080	0,107 ± 0,034	0,223	22,0 ± 2,0	3
KSE 100 x2- 4000h-w	21,7 ± 1,1	0,060 ± 0,018	0,096	0,104 ± 0,064	0,232	21,3 ± 2,5	3

<sup>1)</sup> Bezug auf 300 mm freie Weglänge, äußerste Randrisse nicht erfasst

### 6.1.2 Dehnkörperproben unter Temperatureinfluss

Bild 6-3 a) zeigt die Spannungs-Dehnungsbeziehungen der Prüfserie KSE 100 x2-T160 und der Referenzprüfserie KSE 100 x2. Die Mittelwertkurve der mit 160 °C temperierten Dehnkörperproben unterliegt gegenüber der Referenzkurve einer parallelen Verschiebung infolge einer um den Faktor 1,5 höheren Erstrisslast. Ursächlich kann der negative thermische Längenänderungskoeffizient von Kohlenstoff sein. Infolge der Temperierung erfahren die Dehnkörperproben eine Vorspannung durch die Carbonrovings entgegengesetzt zur Zugbelastungsrichtung. Der thermische Längenänderungskoeffizient von Carbonfasern ist temperaturabhängig und variiert in Quer- und Längsrichtung [Pra08]. Allgemein wird ein Wert von  $-0,1 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$  für Carbonfasern angegeben [Jes10]. PRANDERE und SAUDER geben für die thermische Längenänderung von Carbonfasern in Längsrichtung Werte von  $-1,6$  bis  $-2,1 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$  an [Pra08].

Die linearisierten Rissbreiten in Bild 6-3 b) zeigen eine Verringerung der mittleren Rissbreiten der temperierten Proben (blau) gegenüber der Referenzprüfserie KSE 100 x2 (schwarz). Die linearisierte maximale Rissbreite der temperierten Probekörper ist maßgeblich durch zwei große Einzelrisse einer Dehnkörperprobe beeinflusst und fällt entsprechend größer aus als bei den Referenzprobekörpern. Ein bereinigter Graph würde maximale Rissbreiten auf dem Niveau der Referenzprüfserie KSE 100 x2 aufweisen. Anhang 2 enthält die Grafik mit Einzelrissbreiten der Prüfserie zu temperierten Dehnkörperproben, aus denen die Ausreißer hervorgehen. Tabelle 6-2 zeigt die Ergebnisse zur Bruchlast, zu den mittleren und maximalen Rissbreiten und zur Rissanzahl der Prüfserien KSE 100 x2-T160 und KSE 100 x2.

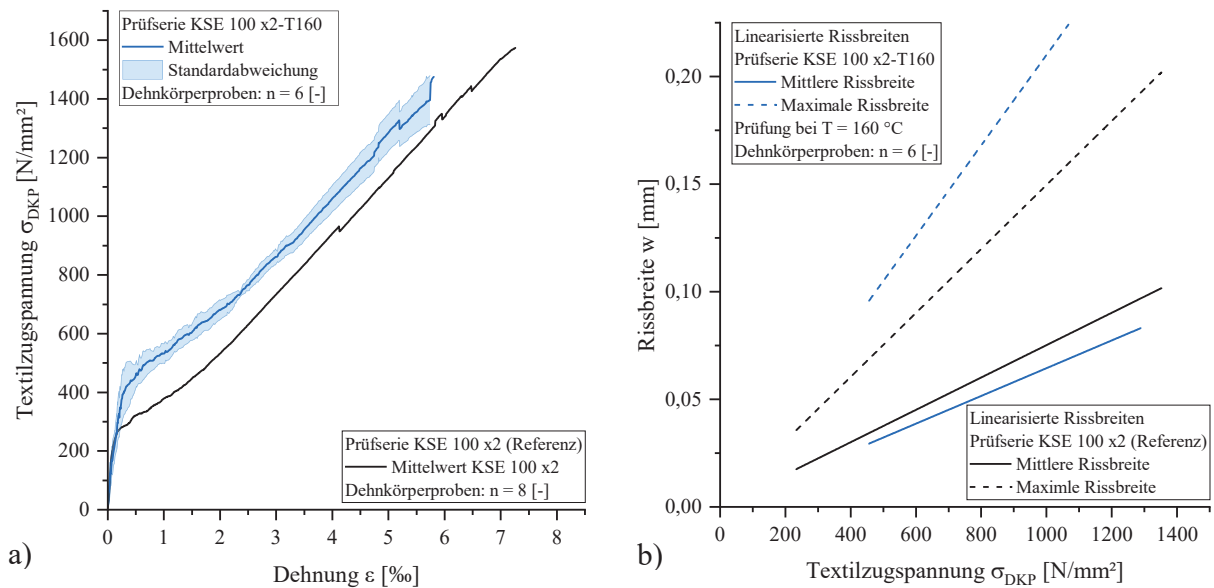


Bild 6-3: Dehnkörperproben unter Temperaturbeanspruchung (160 °C) mit KSE 100 x2 getränkten Rovings a) Spannungs-Dehnungsbeziehung, b) Rissbreiten-Spannungsbeziehung

Die Ergebnisse der einaxialen Zugversuche an temperierten Dehnkörperproben bei 160 °C zeigen keinen signifikanten Einfluss von Temperaturen bis 160 °C auf die Zugfestigkeit und die Rissbreiten. Es ist davon auszugehen, dass die Zugfestigkeit auch unter höherer Temperaturbeanspruchung nicht durch die KSE-Tränkung negativ beeinflusst wird, wie die Ergebnisse der TGA zeigen.

Tabelle 6-2: Prüfserie V – Dehnkörperproben temperiert auf 160 °C – Bruchlast, Rissbreiten und Rissanzahl

Prüfserie	Bruchlast $F_u$ [kN]	Mittlere	Max.	Mittlere	Max.	Rissan- zahl <sup>1)</sup> [-]	Anzahl Proben [-]
		Rissbreite bei 15 kN [mm]	Rissbreite bei 15 kN [mm]	Rissbreite bei $F_u$ [mm]	Rissbreite bei $F_u$ [mm]		
KSE 100 x2	20,8 ± 2,2	0,074 ± 0,024	0,146	0,102 ± 0,033	0,202	16,8 ± 2,6	8
KSE 100 x2 -T160	21,1 ± 1,4	0,068 ± 0,035	0,153	0,083 ± 0,045	0,271	16,5 ± 3,3	6

<sup>1)</sup> Bezug auf 300 mm freie Weglänge, äußerste Randrisse nicht erfasst

DAHLHOFF untersuchte den Einfluss unterschiedlicher Tränkungsmaterialien auf die Zugfestigkeit von carbonbewehrtem Beton unter erhöhten Temperaturen bis 1.000 °C [Dah22]. KSE getränkte Rovings wiesen unter 50-prozentiger statischer Belastung des Faserstrangs (Basis 1.550 N/mm<sup>2</sup>) Versagenstemperaturen um 600 °C auf. In zylindrischen Zugprobekörpern konnte DAHLHOFF Versagenstemperaturen von über 850 °C bei 75-prozentiger bzw. von über 900 °C bei 50-prozentiger statischer Belastung erreichen [Dah22]. Gegenüber EP getränkten Rovings liegt die Versagenstemperatur der KSE-Tränkungen im Zugprobekörper bei gleichem Reduktionsfaktor wesentlich höher. Die von DAHLHOFF getroffene Annahme, dass eine Tränkungszerstörung von KSE zu einem geringen Anstieg der Versagenstemperatur zwischen den Reduktionsstufen 0,75

und 0,5 [-] führt, können aufgrund der eigenen Untersuchungen (Abschnitt 5.2.2) nicht gestützt werden. Die in [Dah22] ermittelte Glasübergangstemperatur von 76 °C konnte in den eigenen Untersuchungen mittels TGA-DSC ebenfalls nicht bestätigt werden. Masseverluste des Tränkungs-materials im Temperaturbereich um 100 °C sind auf entweichendes Wasser zurückzuführen (siehe Abschnitt 5.2.2). Es wird davon ausgegangen, dass Zersetzungsprozesse der Carbonfasern ab Temperaturen von 650 °C sowie die Zersetzung der Schlichte zum Versagen beitragen [Kul11].

### 6.1.3 Dehnkörperproben mit Bewehrung aus Textilgelegen

Die Untersuchungen der Dehnkörperproben in den Kapiteln 4, 5 und den Abschnitten 6.1.1 und 6.1.2 wurden mit Rovings als Bewehrung durchgeführt. Für den Einsatz als Instandsetzungssystem sind textile Gelege verarbeitungstechnisch deutlich praktikabler. Entsprechende Textilgelege für die Zugversuche an Dehnkörperproben wurden aus SGL Sigrafil® C T50-4.4/255-E100 Rovings mit KSE 100 o. L. x2-Tränkung in Kettrichtung (0°-Richtung) sowie Tenax®-E STS40 F13 24k Rovings mit einfacher KSE 100 o. L.-Tränkung in Schussrichtung (90°-Richtung) hergestellt (Bild 6-4). Die Knotenpunkte wurden mit Klebstoff auf Polyvinylacetat-Basis verklebt. Die Maschenweite weist in 0°-Richtung einen Achsabstand von 18 mm und in 90°-Richtung von 15 mm auf. Je Dehnkörperprobe wurden zwei Lagen Gelege à vier Rovings in Kettrichtung verwendet.

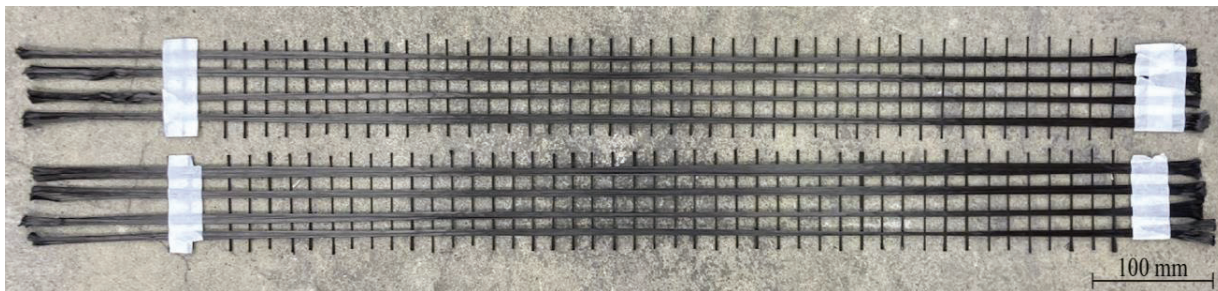


Bild 6-4: Gelege 18/15 mm mit 50k Kettrovings (0 °-Richtung) und 24k Schussrovings (90 °-Richtung)

Bild 6-5 a) zeigt die Spannungs-Dehnungslinien der Einzelmessungen sowie die Mittelwertkurve der Dehnkörperproben mit Textilgelegen. Die Textilzugspannung der Prüfserie mit Gelegen fällt mit  $\sigma_{DKP, KSE\ 100\ o.L.x2-Gelege} = 1.979 \pm 228\ N/mm^2$  gegenüber dem Mittelwert der Referenzprüfserie KSE 100 o. L. x2 (Rovings) um etwa 400 N/mm<sup>2</sup> höher aus. Die Proben weisen einen typischen Verlauf der Spannungs-Dehnungslinie auf und verzeichnen eine geringe Streuung. Entsprechend werden geringe mittlere und maximale Rissbreiten erreicht (siehe Bild 6-5 b)). Bei einer Zugspannung von 1.000 N/mm<sup>2</sup> liegen die mittleren Rissbreiten bei  $w_{mean} = 0,058 \pm 0,024\ mm$  und nur vereinzelte Risse liegen über 0,10 mm. Die Ergebnisse zur Bruchlast, zu Rissbreiten und zur Rissanzahl sind in Tabelle 6-3 aufgeführt.

Durch die 90°-Rovings wird eine gleichmäßigere Rissbildung von vorwiegend orthogonal zur Belastungsrichtung verlaufenden Rissen erreicht. Die zweilagige Bewehrung aus Textilgelegen fördert zudem die Bildung von diffusen Rissen in der sekundären Rissbildungsphase, wie Bild 6-6 zeigt.

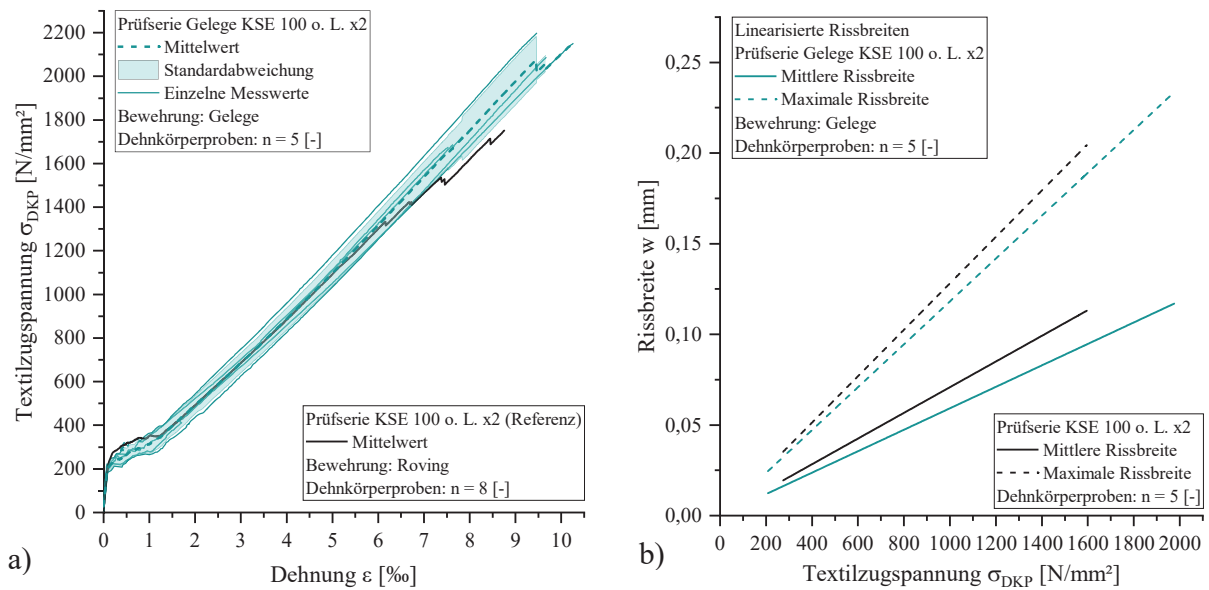


Bild 6-5: Dehnkörperproben mit KSE 100 o. L. x2 getränkten Gelegen a) Spannungs-Dehnungsbeziehung, b) Rissbreiten-Spannungsbeziehung

Die Dehnkörperproben der Prüfserie mit Textilgelege weisen in Bezug auf die relative Rissbreite nach [Mor20] in der Regel einen Verhältniswert  $\leq 1,0$  [-] auf, sodass mindestens an jedem Schussroving ein Riss auftritt. Einige Dehnkörperproben wiesen eine ausgeprägte sekundäre Rissbildung auf, sodass ein mittlerer Rissabstand von  $\omega_{\text{mean, KSE 100 o. L. x2-Gelege}} = 12,5$  mm resultiert. In Bezug auf die Maschenweite von 18 mm entspricht die relative Rissbreite einem Verhältniswert von 0,8 [-]. Begünstigt wird die sekundäre Rissbildung durch einen Versatz der Textilgelege, sodass die 90°-Rovings nicht exakt in einer Achse liegen.

Tabelle 6-3: Prüfserie VI – Dehnkörperproben mit Textilgelegen – Bruchlast, Rissbreiten und Rissanzahl

Prüfserie	Bruchlast $F_u$ [kN]	Mittlere Rissbreite bei 15 kN [mm]	Max. Rissbreite bei 15 kN [mm]	Mittlere Rissbreite bei $F_u$ [mm]	Max. Rissbreite bei $F_u$ [mm]	Rissan- zahl <sup>1)</sup> [-]	Anzahl Proben [-]
KSE 100 o. L. x2	24,5 $\pm 1,8$	0,072 $\pm 0,019$	0,133	0,107 $\pm 0,020$	0,140	19 $\pm$ 1,8	8
KSE 100 o. L. x2-Gelege	30,4 $\pm 3,5$	0,058 $\pm 0,024$	0,115	0,117 $\pm 0,049$	0,234	23 $\pm$ 5,2	5

<sup>1)</sup> Bezug auf 300 mm freie Weglänge, äußerste Randrisse nicht erfasst

Bild 6-6 zeigt den Rissbildungsprozess in Bezug auf die Spannungs-Dehnungslinie einer Dehnkörperprobe mit Textilgelege. Die vier dargestellten Dehnungen zeigen die Dehnkörperprobe zum Zeitpunkt des Erstrisses (1), im Verlauf der primären Rissbildungsphase (2), zum Ende der primären Rissbildung (3) und kurz vor dem Bruch das endgültige Rissbild (4). Im Laufe der sekundären Rissbildung entstehen bei der dargestellten Dehnkörperprobe zwischen zwei Schussrovings

jeweils ein weiterer Riss. Der Wert für die relative Rissbreite nach MORALES beträgt, bei der verwendeten Maschenweite der Gelege von 18 mm, für die in Bild 6-6 dargestellte Dehnkörperprobe 0,53 [-].

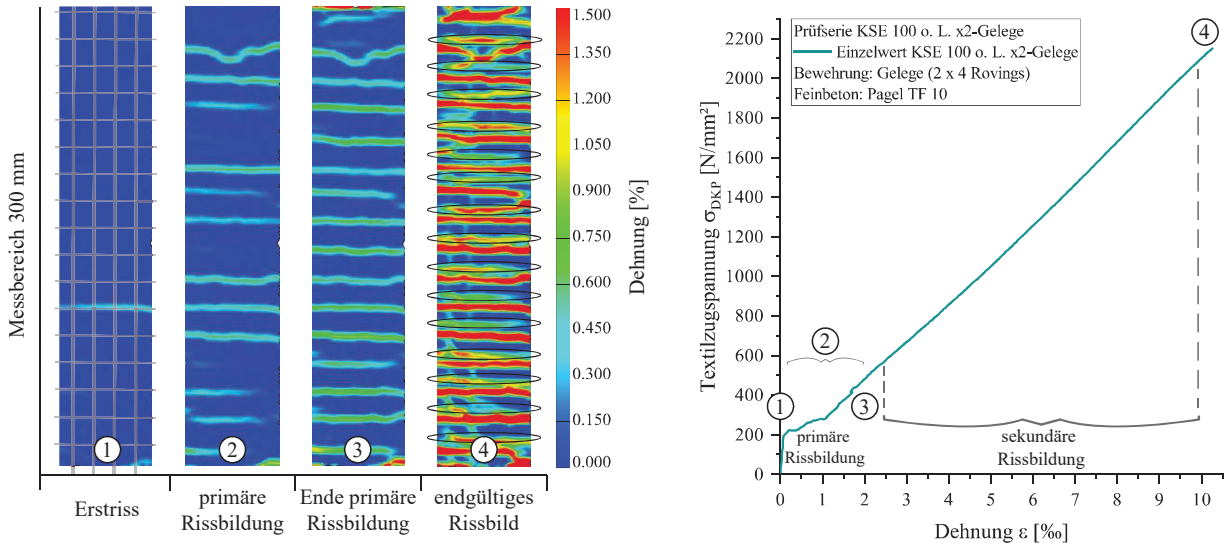


Bild 6-6: Entwicklung primärer und sekundärer (diffuser) Rissbildung einer Dehnkörperprobe mit KSE 100 o. L. x2 Gelege in Bezug zur Spannungs-Dehnungslinie

## 6.2 Bewertung der Rissüberbrückungsfähigkeit

Die Betrachtung der Rissüberbrückungsfähigkeit ist in den folgenden Abschnitten in Untersuchungen zur Rissheilung (Abschnitt 6.2.1) und in Untersuchungen an Rissüberbrückungsprobekörpern nach BAW-Merkblatt MITEX (Abschnitt 6.2.2) unterteilt. Die Rissheilungsversuche gliedern sich in drucklose Wasserlagerung und Druckwasserbeanspruchung an gerissenen Dehnkörperproben (siehe Abschnitt 3.4.2). Die Rissheilung der Proben in druckloser Wasserlagerung erfolgte optisch und durch Wägung. Die Probekörper unter Druckwasserbeanspruchung wurden optisch bewertet. Eine Wägung während der Untersuchung war aufgrund des Prüfaufbaus nicht möglich. Die Rissüberbrückungsfähigkeit erfolgte an zwei Rissüberbrückungsprobekörpern einer Verbundkörperprobe in Anlehnung an die Systemprüfung nach BAW-Merkblatt MITEX (siehe Abschnitt 3.4.3).

### 6.2.1 Rissheilung gerissener Dehnkörperproben

#### Drucklose Wasserlagerung

Bild 6-7 zeigt die Entwicklung der Rissheilung einer exemplarischen Probe mit Rissen  $w_{cr} \leq 0,10$  mm über einen Zeitraum von 24 Tagen. Direkt nach der Einlagerung beginnt das Wasser, insbesondere über die Risse, den Probekörper zu durchfeuchten. Die Durchfeuchtung erfolgt innerhalb weniger Stunden bis hin zu zwei Tagen. Die Wägungen der Proben weisen die größte Massenänderung infolge der Wasseraufnahme innerhalb der ersten zwei Stunden auf. Bei den meisten Proben ist das Maximum der Wasseraufnahme nach zwei Tagen erreicht. Entsprechend weist die Probe nach zwei Tagen Wasserlagerung auch optisch die stärkste Durchfeuchtung auf (siehe Bild 6-7 2d). Exemplarische Wägungsergebnisse sind in Tabelle 6-4 aufgeführt.

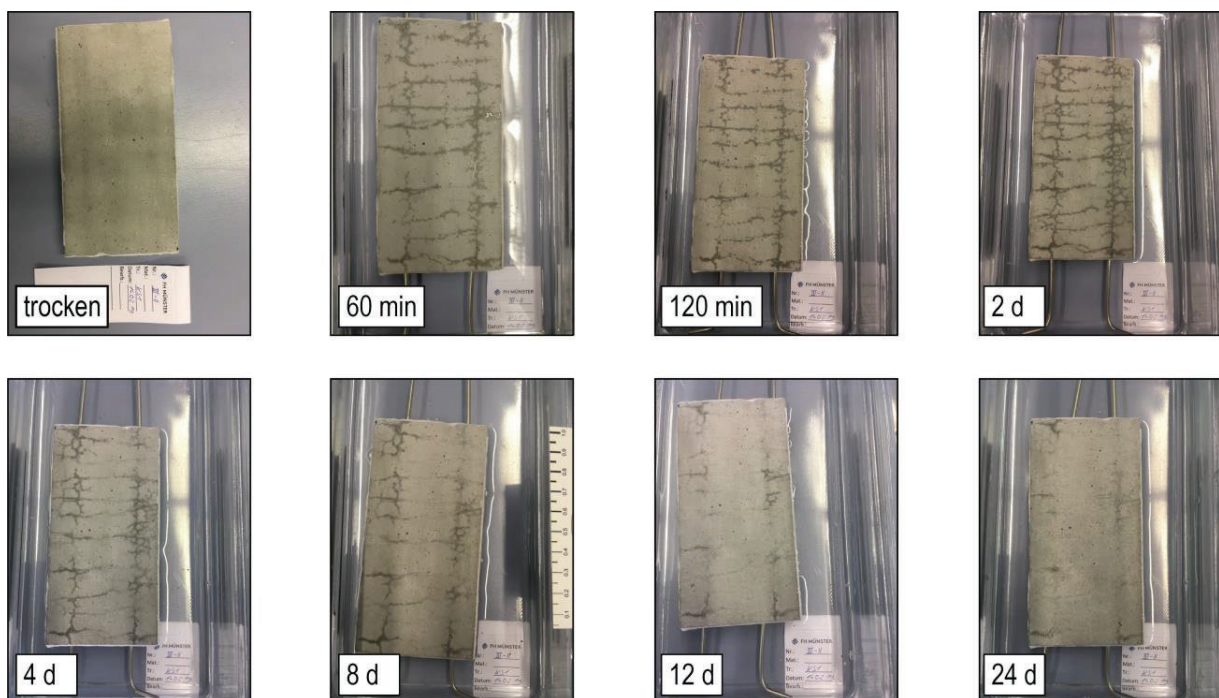


Bild 6-7: Rissheilung von mehrfachgerissenen Dehnkörperproben mit Rissen  $\leq 0,1$  mm im entlasteten Zustand

Die Massenänderung setzt sich aus der Wasseraufnahme über die Risse und der flächigen Wasseraufnahme über den Feinbeton zusammen. Eine flächige Durchfeuchtung der gesamten Proben konnte nicht festgestellt werden. Die Bildaufnahmen nach 4, 8, 12 und 24 Tagen zeigen die kontinuierliche Abtrocknung der Probenoberflächen bis zu vollständigen Rissheilungen. Aus den Wägungen der Proben mit Rissbreiten  $w_{cr} \leq 0,10$  mm geht eine Stagnation oder Abnahme des gesamten Probekörpergewichtes im Laufe der Rissheilung hervor.

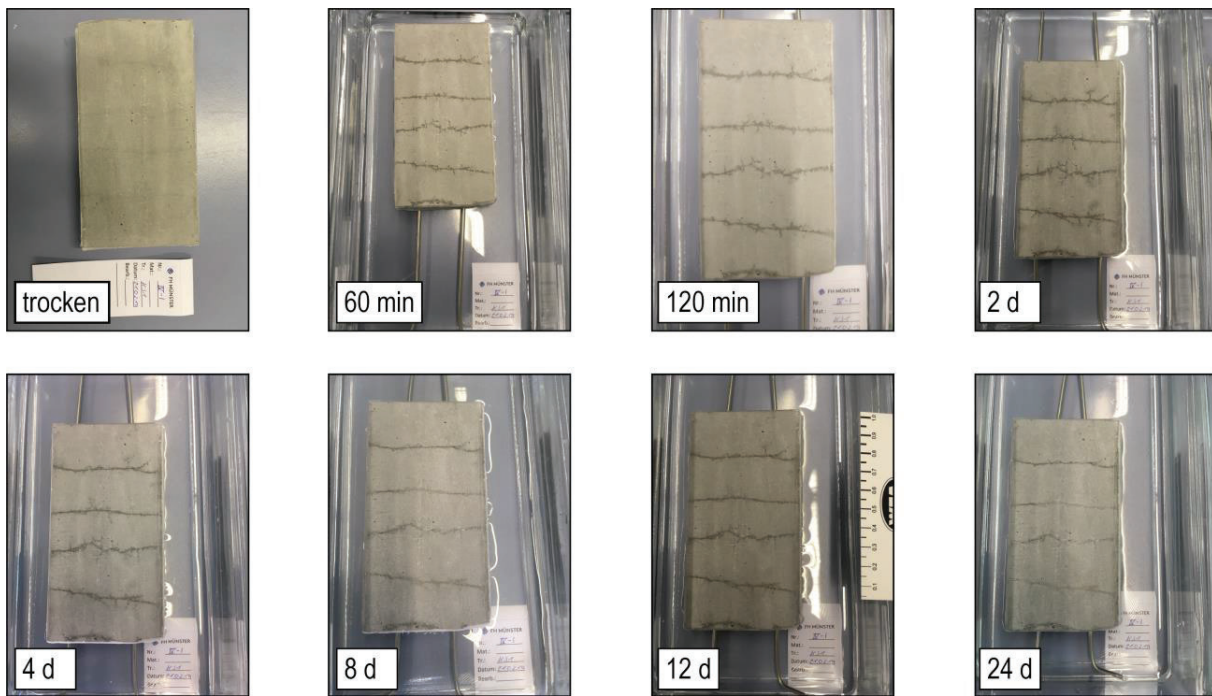


Bild 6-8: Rissheilung von mehrfachgerissenen Dehnkörperproben mit Rissen  $> 0,1$  mm im entlasteten Zustand

Probekörper mit Rissbreiten  $0,20 > w_{cr} > 0,10$  mm weisen weniger Risse auf, die infolge der Wassereinlagerung aber schneller durchfeuchten. Der Feuchtedurchschlag nach 60 Minuten zeigt nahezu vollständig durchfeuchtete Risse (Bild 6-8 60 min). Eine Rissheilung findet nur in Teilbereichen der Einzelrisse statt. Es ist eine fortlaufende Gewichtszunahme bzw. langsam eintretende Stagnation über die Prüfzeit von 24 Tagen zu beobachten (siehe Tabelle 6-4). Anzunehmen ist, dass eine fortlaufende Gewichtszunahme über eindringendes Wasser durch die Risse auch quer zur Prüfrichtung in den Probekörper erfolgt. Nach 24 Tagen weist der Probekörper weiterhin wasserführende Risse auf, nur Teilbereiche weisen Rissheilungen auf. Zudem wird weiter Wasser von Probekörperporen aufgenommen.

Die Untersuchungen mit druckloser Wasserbeanspruchung zeigen, dass eine Reduzierung der Masse nach anfänglicher Gewichtszunahme als Indiz für die Rissheilung herangezogen werden kann. Bei einer Stagnation des Probekörpergewichtes über die Versuchsdauer ist eine optische Überprüfung zwingend erforderlich, da bei beiden Prüfserien Probekörper mit stagnierender Masse zu beobachten sind. Bei Probekörpern mit Einzelrisse  $w_{cr} \leq 0,10$  mm (PK1) konnte trotzdem eine Rissheilung beobachtet werden. Bei den Probekörpern mit Einzelrisse  $w_{cr} \geq 0,10$  mm (PK2) ist eine Rissheilung nur in Teilbereichen festzustellen.



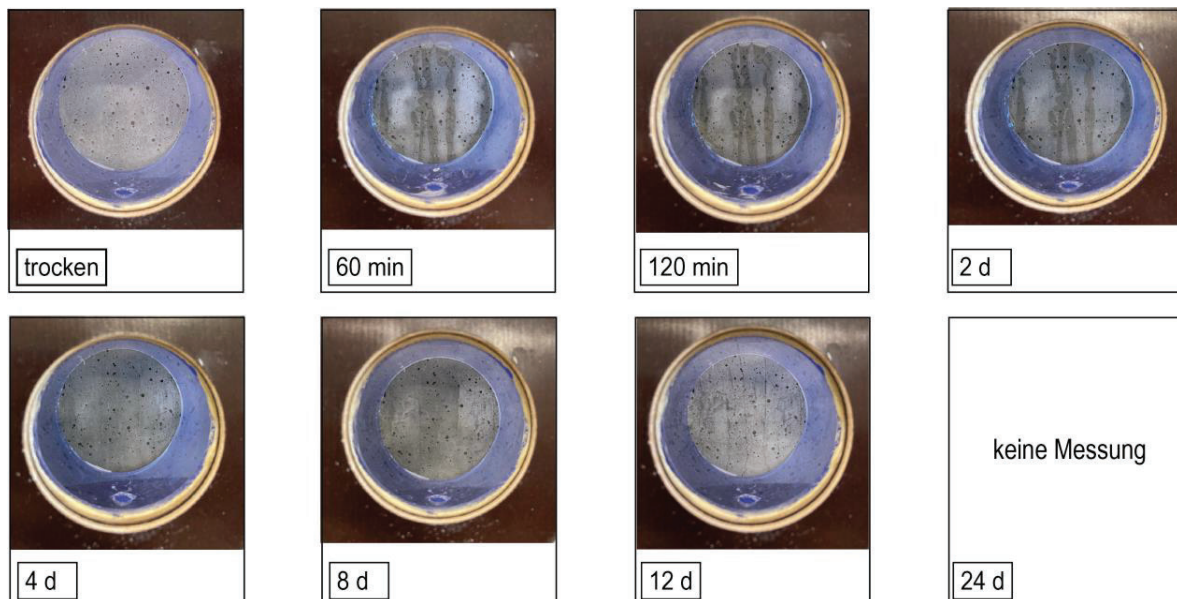
Tabelle 6-4: Massenänderung gerissener Dehnkörperproben unter druckloser Wasserbeanspruchung

Zeit (min/d)	PK 1-1	PK 1-2	PK 1-3	PK 1-4	PK 2-1	PK2-2	PK2-3	PK2-4
	$w_{cr}$ $\leq 0,1\text{mm}$	$w_{cr}$ $\leq 0,1\text{mm}$	$w_{cr}$ $\leq 0,1\text{mm}$	$w_{cr}$ $\leq 0,1\text{mm}$	$w_{cr}$ $\geq 0,1\text{mm}$	$w_{cr}$ $\geq 0,1\text{mm}$	$w_{cr}$ $\geq 0,1\text{mm}$	$w_{cr}$ $\geq 0,1\text{mm}$
	$\Delta_m$ (g)	$\Delta_m$ (g)	$\Delta_m$ (g)	$\Delta_m$ (g)	$\Delta_m$ (g)	$\Delta_m$ (g)	$\Delta_m$ (g)	$\Delta_m$ (g)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5 <sup>1)</sup>	1,20	1,44	1,30	1,50	2,27	1,70	1,89	2,32
20 <sup>1)</sup>	1,96	2,52	1,71	2,05	3,30	2,58	2,83	3,92
40 <sup>1)</sup>	2,42	3,04	2,08	2,16	3,90	2,72	3,25	5,26
60 <sup>1)</sup>	2,50	3,30	2,46	2,61	4,10	2,83	3,06	6,06
90 <sup>1)</sup>	2,84	3,79	2,61	3,02	4,51	2,97	3,46	6,91
120 <sup>1)</sup>	3,16	4,10	2,78	3,29	4,80	3,05	3,60	7,53
2 <sup>2)</sup>	4,63	6,60	4,49	4,01	7,55	4,25	4,96	11,70
4 <sup>2)</sup>	4,50	6,50	4,51	3,81	7,69	4,43	4,98	11,55
8 <sup>2)</sup>	4,47	6,14	4,42	3,67	7,68	4,51	4,95	11,78
12 <sup>2)</sup>	4,45	5,93	4,49	3,55	7,78	4,65	4,95	11,68
24 <sup>2)</sup>	4,40	5,70	4,52	3,35	7,84	4,67	4,98	12,02
$\Delta_m$	↓	↓	→	↓	↑	↑	→	↑

<sup>1)</sup> Minutenwerte, <sup>2)</sup> Tageswerte

### Druckwasserbeanspruchung

Bild 6-9 zeigt eine exemplarische mehrfachgerissene Probe mit Rissbreiten  $w_{cr} \leq 0,10$  mm unter Druckwasserbeanspruchung mit 0,5 bar. Der Wasserdurchschlag über die Risse ist bereits nach wenigen Minuten sichtbar.

Bild 6-9: Rissheilung von mehrfachgerissenen Dehnkörperproben mit Rissen  $w_{cr} < 0,10$  mm bei 0,5 bar [Len21a]

Nach zwei Tagen sind Rissheilungsprozesse anhand von weniger wasserführenden Rissen zu erkennen. Bereits nach vier Tagen weist die Probe ausgeheilte Risse auf (siehe Bild 6-9 4 d), da kein Wasserdurchtritt mehr zu erkennen ist. Nach acht Tagen zeigt sich eine teilweise flächige Durchfeuchtung der Probe in Form von dunkleren Schattierungen auf der Oberfläche. Nach zwölf Tagen ist die Probenoberfläche vollständig getrocknet. Anzunehmen ist, dass die teilweise flächige Durchfeuchtung nach Rissheilung durch eine Querverteilung des Wassers kurz hinter der Rissheilungsebene stattfindet, die sich durch eine fortschreitende Rissheilung reduziert bzw. weiter innerhalb des Probekörpers stattfindet, sodass ein Feuchtedurchschlag nicht mehr zu beobachten ist. Gegenüber der drucklosen Wasserlagerung von Probekörpern mit Rissbreiten  $w_{cr} \leq 0,10$  mm führt die Druckwasserbeanspruchung mit einem Wasserdruck bis 0,5 bar zu einer schnelleren Rissheilung.

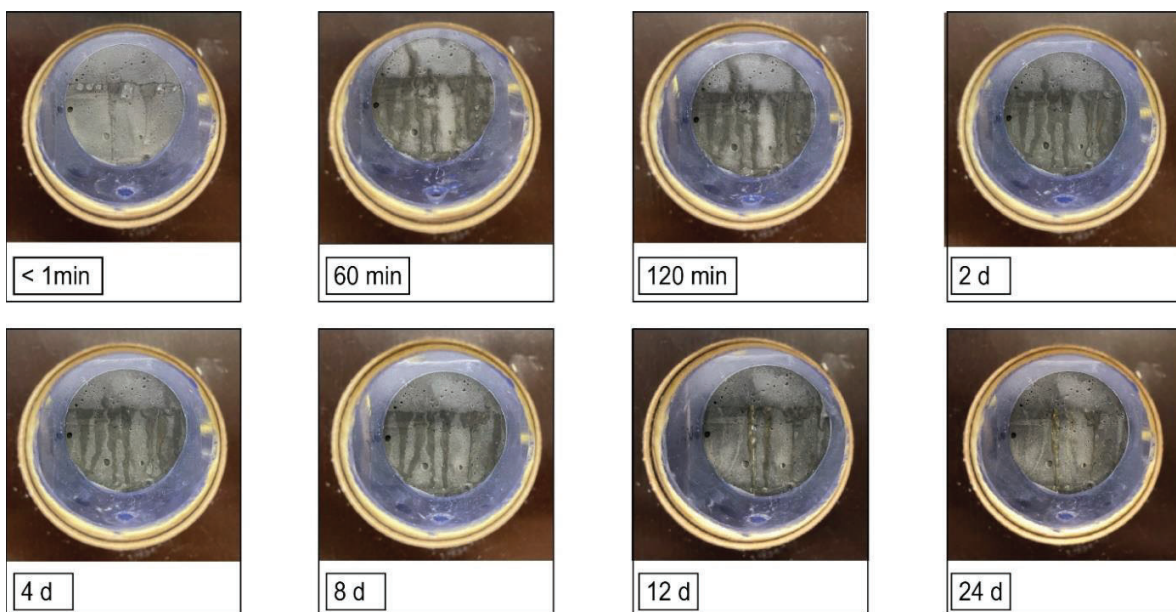


Bild 6-10: Rissheilung von mehrfachgerissenen Dehnkörperproben mit Rissen  $w_{cr} < 0,10$  mm bei 1,0 bar [Len21a]

Bild 6-10 zeigt eine exemplarische Probe mit einem Riss mit  $w_{cr} \leq 0,10$  mm unter Druckwasserbeanspruchung mit 1,0 bar. Die Wasserdurchdringung der Probe über den Riss erfolgt bereits innerhalb einer Minute. Eine vollständige Durchfeuchtung ist bereits nach 60 Minuten zu sehen. Infolge des höheren Drucks ist ein kontinuierlicher Wasserfluss durch die Probe zu beobachten, der zu Wassertropfen auf der Oberfläche führt. Erst zu den Untersuchungszeitpunkten zwischen zwei und acht Tagen ist eine Abnahme des Wasserflusses zu verzeichnen. Nach zwölf Tagen zeigt die Probe gelartige Ablagerungen auf der Oberfläche, die infolge verringerten Wasserflusses eintrocknen. Nach 24 Tagen zeigt die Probe keinen wasserführenden Riss mehr. Es bleiben Ablagerungen auf der Oberfläche sowie eine teilweise flächige Durchfeuchtung bestehen. Die Rissheilung unter einem Wasserdruck von 1,0 bar erfolgt gegenüber geringeren Drücken wesentlich langsamer. Ablagerungsprozesse und chemische Reaktionen werden durch den hohen Wasserfluss gestört.

Insgesamt ist festzustellen, dass in Bezug auf die gewählten Risskategorien (siehe Abschnitt 3.4.2) Risse der Kategorie II ( $0,05 \text{ mm} \leq w_{cr} \leq 0,10 \text{ mm}$ ) nahezu vollständig bis 1,0 bar ausheilen, wie die exemplarischen Probekörper in den Bildern 6-9 und 6-10 zeigen. Risse der Kategorie I mit  $w_{cr} < 0,05 \text{ mm}$  heilten in allen Druckstufen bis 1,0 bar aus. Bei Rissen der Kategorie III ( $w_{cr} \geq 0,10 \text{ mm}$ ) waren Prüfungen mit der verwendeten Druckwasseranlage bei 0,5 bar nur bedingt und bei 1,0 bar aufgrund des hohen Wasserflusses nicht möglich.

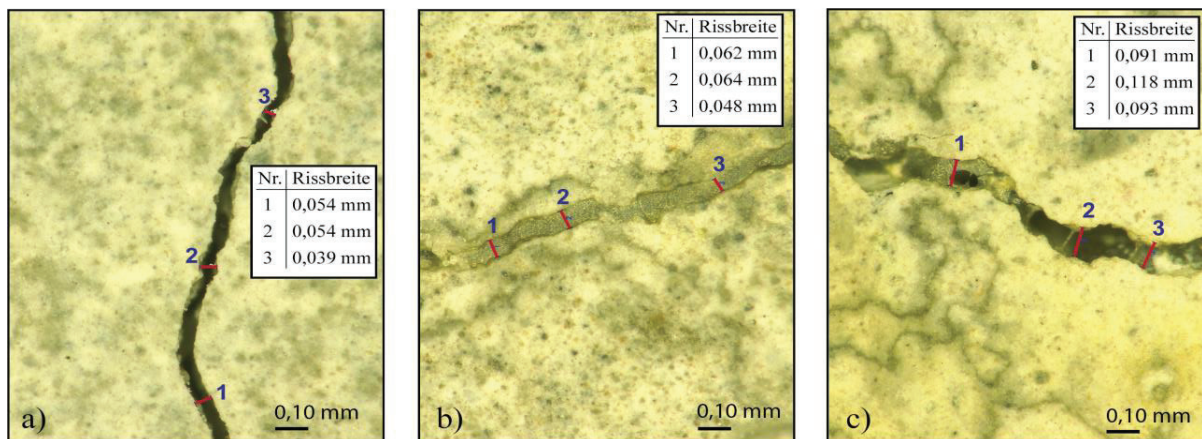


Bild 6-11: Mikroskopieaufnahmen von Dehnkörperproben mit a) Riss vor Heilungsversuch, b) geheiltem Riss und c) teilweise geheiltem Riss (Wasserdruck 0,5 bar) [Len21b]

Bild 6-11 zeigt Mikroskopieaufnahmen von drei Rissen. Der Riss in Bild 6.11 a) zeigt einen Riss vor der Druckwasserbeanspruchung, b) und c) zeigen zwei Risse nach den Rissheilungsversuchen mit 0,5 bar Wasserdruck. Die Darstellung der Vermessung des Risses zur Ermittlung der Risskategorien in a) zeigt scharfe Bruchkanten. Der Riss in b) mit einer maximalen Breite von  $w_{cr} = 0,064 \text{ mm}$  ist nach der Druckwasserbeanspruchung mit 0,5 bar vollständig ausgeheilt. Agglomerate wie z. B. Calciumcarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) haben den Riss ausgefüllt. Bild 6-10 c) zeigt einen Riss, der in Teilbereichen eine Breite von 0,10 mm überschreitet, entsprechend liegt eine unvollständige Rissheilung vor. Ein Zuwachsen durch Bildung von Calciumcarbonat sowie die Ablagerungen von Partikeln im Rissrandbereich können nur teilweise erfolgen. Die Rissufer in b) und c) sind gegenüber der Probe in a) abgerundeter.

Die Untersuchungen zur Rissheilung zeigen die Rissheilungsfähigkeit von filigranen Textilbetonquerschnitten ( $d = 15 \text{ mm}$ ), wie auch in [Mor20] für 20 bis 30 mm dicke Proben festgestellt wurde. Unterschiedliche Druckstufen zeigten, dass bei moderaten Wasserdrücken eine beschleunigte Rissheilung gegenüber drucklos gelagerten Proben zu verzeichnen ist. Mit Erhöhung des Wasserdrucks bedarf es einer längeren Ausheilzeit, entsprechend verhält es sich mit größeren Rissbreiten, da die Durchflussgeschwindigkeit des Wassers infolge des Wasserdrucks die Rissheilungsprozesse stört. Eine Kombination von größeren Rissbreiten und hohem Wasserdruck führt zu keiner oder nur unvollständiger Rissheilung.

## 6.2.2 Zugversuche an Rissüberbrückungsprobekörpern nach BAW-Merkblatt

Im Rahmen der Versuche zur Rissüberbrückungsfähigkeit wurden zwei Rissüberbrückungsprobekörper (RÜPK) geprüft. Abmessungen und Herstellungsrandbedingungen sind in Abschnitt 3.4.3 aufgeführt. Die RÜPK wurden in Anlehnung an die Systemprüfung nach BAW-Merkblatt MITEX entsprechend der Rissüberbrückungsklassen 2 (RÜK 2) hergestellt. Die Rissaufweitung im Versuch erfolgte entsprechend RÜK 3 auf 0,60 mm (RÜPK-I) und bis zum Versagen (RÜPK-II).

Bild 6-12 zeigt in a) die Einzelrissbreiten der Textilbetonschicht in Bezug auf die Rissaufweitung des eingebrachten Sollrisses im Verbundprobekörper sowie das Verhältnis von Zugkraft zur Sollrissaufweitung. Über den Messbereich von 20 cm sind elf messbare Risse aufgetreten, wie die Visualisierung der Dehnung mittels Bildkorrelation in Bild 6-12 b) zeigt. Die Einzelrissbreiten sind jeweils an der Stelle der größten Dehnung gemessen (siehe Abschnitt 3.3.2). Der Mittelwert der Rissaufweitung, ermittelt aus den beiden induktiven Wegaufnehmern, beträgt  $w_{GK,WA} = 0,605$  mm. Die entsprechende photogrammetrische Messung auf dem linken Wegaufnehmer (links und rechts) weist eine Rissaufweitung von  $w_{GK,Aramis} = 0,602$  mm auf. Dies weist auf eine zentrische Zugbelastung ohne Kippen der Probe hin. Es sind daher keine größeren Rissbreiten auf der gegenüberliegenden Probekörperseite zu erwarten, sodass die gemessenen Risse repräsentativ für den gesamten Probekörper sind.

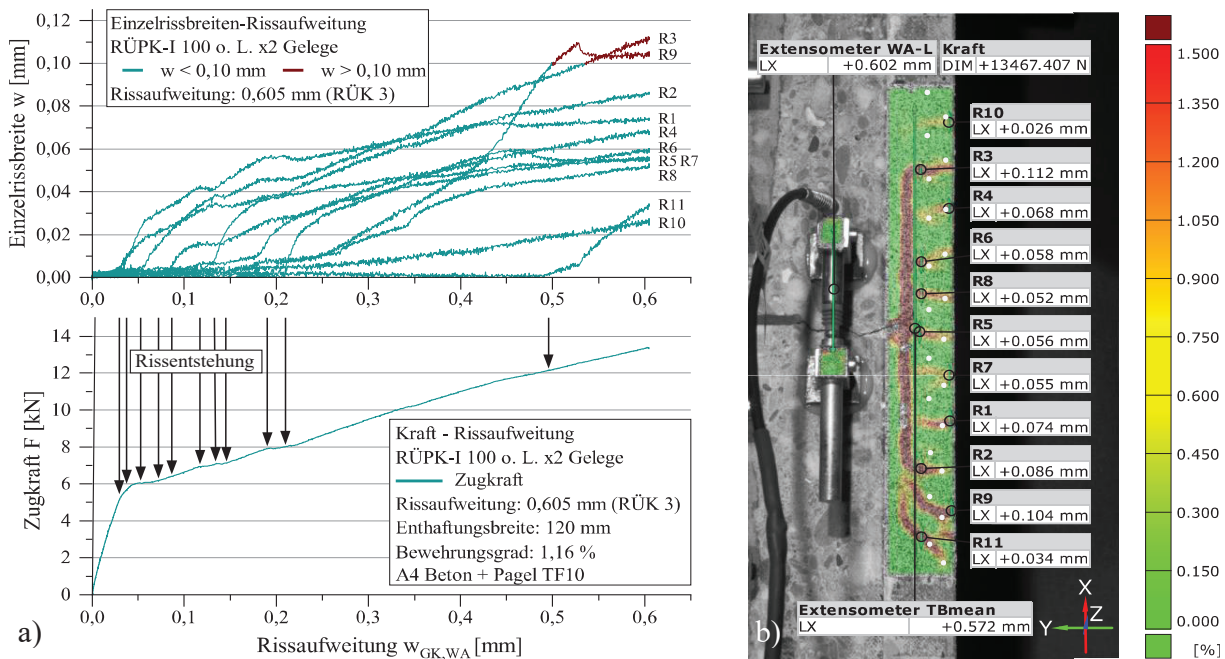


Bild 6-12: Rissüberbrückungsprobekörper I mit KSE 100 o. L. x2 Gelegen – Rissaufweitung 0,6 mm

Das Extensometer (TBmean) mittig in der Messfläche der Textilbetonschicht weist über die Messlänge von 200 mm eine Längenänderung von 0,572 mm auf. Die gemessene Rissaufweitung verteilt sich somit zu 95 % über den Messbereich.

Die Rissnummerierung entspricht der Reihenfolge der Rissentstehung. Das Kriterium für die Rissentstehung ist eine Rissbreite von  $w_{cr} = 0,01$  mm. Der erste Riss (R1) liegt in der freien Länge

des 120 mm langen Enthftungsbereichs. Die Risse R2 und R3 markieren das jeweilige Ende des Enthftungsmaterials. Von den elf gemessenen Rissen liegen drei auerhalb der Enthftungsbreite. Diese Risse entsprechen auch den letzten drei Rissen in der Entstehungsreihenfolge. Alle Einzelrisse liegen im Einflussbereich der Schussrovings der aueren Bewehrungslage in einem ungefähren Abstand von 18 mm. Die weien Punkte in Bild 6-12 b) zeigen die Lage der Schussrovings, jeweils links davon liegen die Ketrovings. Schwankungen in der Textilherstellung sowie die Spritzbetonapplikation fuhren zu den Abweichungen. Der Versatz der Bewehrungslagen fuhrt zu Rissverzweigungen (R7, R9 und R11 in Bild 6-12 b)), vergleiche auch [Mec11, Mor20].

Neun von elf Rissen weisen zum Ende der Rissaufweitung Rissbreiten von  $w_{cr} < 0,10$  mm auf. Die Risse R3 und R9 uberschreiten oberhalb einer Rissaufweitung von  $w_{GK,WA} = 0,500$  mm die Einzelrissbreite von  $w_{cr} = 0,10$  mm (rote Linien in Bild 6-11 a)). Riss R9 liegt auerhalb des Enthftungsbereichs. Die Rissbreite  $w_{cr} = 0,104$  mm liegt geringfugig uber der geforderten Rissbreite von  $w_{cr} \leq 0,10$  mm. R3 markiert das obere Ende des Enthftungsbereichs und weist eine maximale Rissbreite von  $w_{cr,max} = 0,112$  mm auf. Nach BAW-Merkblatt sind die Rissbreiten jeweils in drei Ebenen zu messen. Weist einer dieser Einzelwerte eine Rissbreite  $> 0,10$  mm auf, mussen die zwei weiteren Messstellen Rissbreiten  $< 0,10$  mm aufweisen. Die angegebene Rissbreite von R3 ist die maximale Rissbreite, uber die Risslange verringert sich der Wert auf 0,05 mm. Entsprechend werden die zulassigen Rissbreiten des Rissuberbrückungsprobekörper RÜPK-I erfult. Somit sind die Anforderungen an die Rissbreiten entsprechend der Rissaufweitungsstufen fur die Rissuberbrückungsklassen 2 und 3 nach BAW-Merkblatt MITEX erfult [BAW19a]. Die Rissbreitenmessung an der maximalen Stelle zeigt, dass bei funf von elf Rissen das Maximum an der rechten Seite zur Probekörperoberfläche liegt (siehe Bild 6-12 b)). Es ist zu diskutieren, ob eine Rissmessung nur in dieser Ebene ausreichend ist, da eine Rissheilung vorwiegend an der Probekörperoberfläche erfolgt.

Die Zugkraft-Rissweitenkurve in Bild 6-12 a) weist nach dem Erstriss einen nahezu linearen Verlauf bis zum Versuchsabbruch auf. Der Rissbildungsbereich weist bei den einzelnen Rissentsethungen (schwarze Pfeile) kaum Lastabfalle auf. Bei einer Last von 13.467 N ist die geforderte Rissaufweitung von 0,6 mm fur die Rissuberbrückungsklasse 3 erreicht. Der Verbundprobekörper ist zu diesem Zeitpunkt noch tragfähig. Die maximal eingeleitete Last entspricht beim Bewehrungsgehalt von 23,04 mm<sup>2</sup> (zwolf Rovings à 1,92 mm<sup>2</sup>) einer Textilzugspannung von  $\sigma_{RÜPK} = 584$  N/mm<sup>2</sup>. In Bezug auf die in Kapitel 4 gesetzte untere Grenze von 1.000 N/mm<sup>2</sup> Zugspannung im Dehnkörper zeigt sich, dass der Rissuberbrückungsprobekörper RÜPK-I lediglich 60 % der angenommenen Spannungen ausgesetzt ist. Entsprechend kann die getroffene Annahme fur den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit als ausreichend sicher betrachtet werden.

Der Rissuberbrückungsprobekörper RÜPK-II weist im Bereich der Textilbetonschicht auf einer Seite des Probekörpers eine etwa 15 cm lange Fehlstelle auf, die zu 2/3 in der Ebene des unteren Ketrovings und zu 1/3 in der Ebene der oberen Bewehrung verläuft. Die Fehlstelle ist auf Spritzschatten durch die Spritzbetonapplikation zurückzufuhren. Bild 6-13 zeigt einen Ausschnitt des RÜPK-II mit der in zwei Ebenen verlaufenden Fehlstelle.



Bild 6-13: Rissüberbrückungsprobekörper II mit Fehlstelle im Textilbeton (rote Ellipse)

Bild 6-14 zeigt die Einzelrissbreiten der Textilbetonschicht in Bezug auf die Rissaufweitung im Verbundprobekörper und das Verhältnis von Zugkraft zur Rissaufweitung in a) sowie die Dehnungsdarstellung in b) des RÜPK-II bei einer Rissaufweitung von 0,884 mm. Der Probekörper ist bei einer Bruchlast von 19.262 N im Grundkörper am Übergang zur Verklebung der oberen Stahlplatte gebrochen.

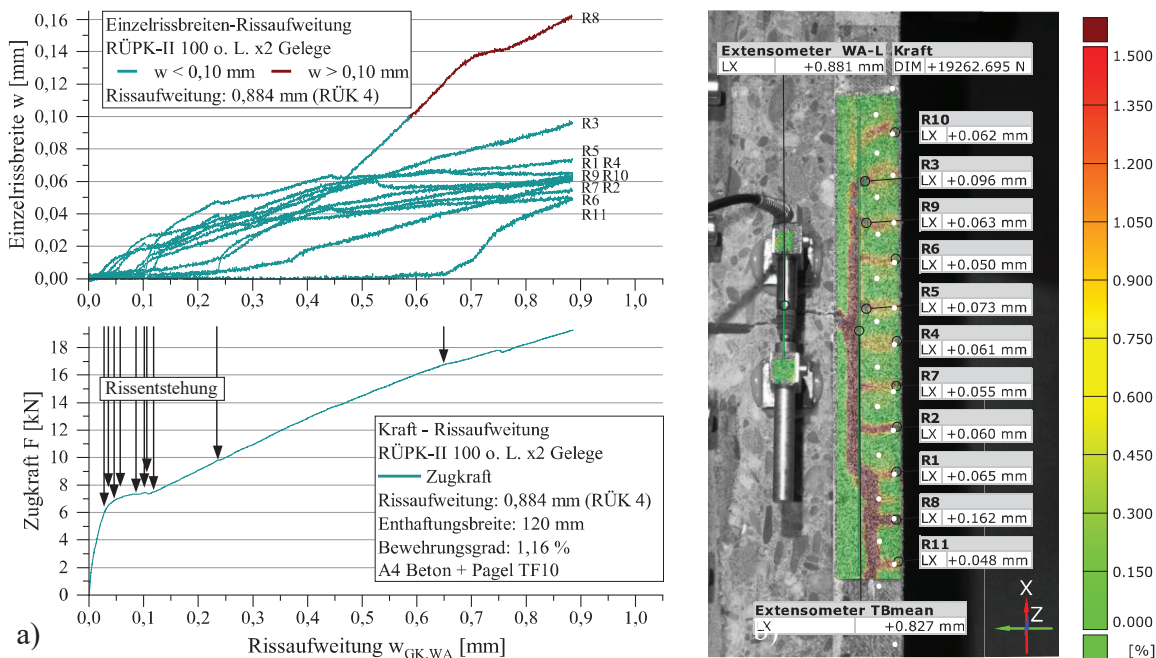


Bild 6-14: Rissüberbrückungsprobekörper II mit KSE 100 o. L. x2 Gelegen – Rissaufweitung 0,9 mm

Die mittlere Rissaufweitung  $w_{GK,WA} = 0,884$  mm der Wegaufnehmer entspricht der gemessenen Rissaufweitung  $w_{GK,Aramis} = 0,881$  mm auf dem linken Wegaufnehmer, sodass auch beim RÜPK-II von einer zentrischen Zugbelastung ohne nennenswertes Kippen der Probe ausgegangen werden kann. Die repräsentative Messung der Längenänderung mittig in der Textilbetonschicht über das Extensometer TBmean (siehe Bild 6-14 b)) weist mit 0,827 mm eine geringe Abweichung zu den gemessenen Längenänderungen der Wegaufnehmer auf. Es ist davon auszugehen, dass durch die Fehlstelle weitere Dehnungen außerhalb des Messbereichs stattfinden. Infolge einer Rissbildung mit schnell aufeinanderfolgenden Rissbildungen ergibt sich in der Kraft-Rissaufweitungskurve ein Dehnplateau nach dem Erstriss (Bild 6-14a)).

Der RÜPK-II weist wie RÜPK-I elf Risse im Messbereich auf, von denen acht Risse im Bereich des Enthäftungsmaterials aufgetreten sind. Der Einfluss der Fehlstelle (siehe Bild 6-12) ist in Bild 6-14 b) im unteren Bereich anhand der vertikalen Dehnung im Bereich von R1, R8 und R11 zu sehen. In diesem Bereich liegt der einzige Riss (R8) mit einer Breite von  $w_{cr} = 0,162$  mm über der erforderlichen Rissbreite  $< 0,10$  mm (siehe Bild 6-14 a) roter Linienverlauf). Die Rissbreite von  $0,10$  mm weist Riss R8 erst ab der Sollrissaufweitung von  $0,60$  mm auf. Entsprechend sind die Anforderungen nach BAW-Merkblatt für die Rissüberbrückungsklassen 2 und 3 auch für den RÜPK-II erfüllt [BAW19a]. Unter Berücksichtigung des Einflusses der Fehlstelle auf die Rissbildung, insbesondere R8, kann davon ausgegangen werden, dass auch die RÜK 4 zu erreichen ist. Eine fehlerfreie Textilbetonschicht sowie ein ausreichend tragfähiger Altbeton im Grundkörper sind erforderlich.

Zu beachten ist, dass nach dem BAW-Merkblatt für die gewählten Randbedingungen, einer Maschenweite von  $15/18$  mm und einer Breite des RÜPK von  $90$  mm, aufgrund von sechs Rovings je Bewehrungslage keine Prüfung in RÜK 4 vorgesehen ist [BAW19a]. Die Berechnung der Breite des Enthäftungsmaterials ergibt sich nach BAW-Merkblatt aus Gleichung (6-1):

$$120 \text{ mm} \leq l_E = \left( \frac{w_{min,lab}}{0,1} \right) * \gamma * MaW \leq 200 \text{ mm} \quad (6-1)$$

mit:

$l_E$	Enthäftungsbreite, in mm
$w_{min,lab}$	Festgelegte Rissaufweitungen der RÜK in der Systemprüfung, in mm
$\gamma$	Sicherheitsbeiwert 1,5 [-]
MaW	Maschenweite, in mm

Die hergestellten Rissüberbrückungsprobekörper würden für die Rissüberbrückungsklasse 4 rechnerisch eine unzulässige Enthäftungsbreite von  $l_E = 243$  mm benötigen. Um eine Prüfung der RÜK 4 entsprechend der Prüfbedingungen des BAW-Merkblatts durchzuführen, bedürfte es z. B. einen Rovingabstand der Kettrovings von  $14$  mm bei einer Probekörperbreite von  $84$  mm, woraus eine Enthäftungsbreite von  $189$  mm resultieren würde. Die verwendete Enthäftungsbreite von  $120$  mm für RÜPK-II entspricht somit einer ungünstigen Situation für die Rissbildung und Rissbreitenbeschränkung bei einer Rissaufweitung von  $w_{min,lab} = 0,9$  mm (RÜK 4).

Die Prüfung der Haftzugfestigkeit nach [BAW19b] weist für die RÜPK vor der Rissaufweitung einen Mittelwert von  $MW f_{HZ,ref} = 1,5$  MPa und einen minimalen Einzelwert von  $EW f_{HZ,ref} = 1,3$  MPa sowie nach der Rissaufweitung von  $MW f_{HZ,test} = 1,6$  MPa und  $EW f_{HZ,test} = 1,4$  MPa auf. Die Anforderung an einen Betonerersatz S-A3 sind erfüllt, S-A4 wird nicht erreicht. Bei allen Prüfungen erfolgte der Bruch im Altbeton. Die Haftzugfestigkeit zwischen Spritzbeton und Enthäftungsmaterial beträgt weniger als  $EW f_{HZ,test,EH} = 0,05$  MPa.

### 6.3 Zusammenfassung der weitergehenden Untersuchungsergebnisse

Aus den in Kapitel 6 beschriebenen Untersuchungen sowohl zur beschleunigten Alterung (Abschnitt 6.1.1) als auch zum Temperatureinfluss (Abschnitt 6.1.2) geht hervor, dass keiner der Einflüsse zu einer Schädigung der Probekörper, die sich in einer Verringerung der Zugfestigkeit oder Verminderung der Rissbildung darstellen würden, führt. Vielmehr deuten die Ergebnisse zur beschleunigten Alterung von Dehnkörperproben auf eine Verbundsteigerung zwischen getränktem Roving und der Feinbetonmatrix hin, da mit fortschreitender Alterung feinere Rissbilder sowie höhere Zugfestigkeiten erreicht werden können. Die Ergebnisse zur Alterung wassergelagerter und klimatisch gelagerter Proben (Abschnitt 5.1.4) konnten bestätigt werden. Entsprechend der analytischen Untersuchungen zur Wirkungsweise der Tränkung im Verbundprobekörper ist festzustellen, dass die Reaktion des amorphen  $\text{SiO}_2$  (Kieselgel) mit der Feinbetonmatrix fortschreitet und mehr Filamente des Rovings am Lastabtrag beteiligt sind.

Die Temperaturbeanspruchung während des einaxialen Zugversuchs führt nicht zu Tragfähigkeitsverlusten. Damit ist nachgewiesen, dass keine Schädigung infolge der Temperatureinwirkung von  $160\text{ }^\circ\text{C}$  stattfindet. Die thermogravimetrischen Analysen bestätigen diese Ergebnisse (siehe Abschnitt 5.2.2). Der negative Längenänderungskoeffizient der Carbonfasern scheint eine Vorspannung entgegen der Lastrichtung zu bewirken, welches aus der höheren Steifigkeit der Spannungs-Dehnungsbeziehung abgeleitet werden kann.

Die Untersuchungen zu Textilgelegen mit KSE 100 o. L. x2-Tränkung in den Dehnkörperproben zeigen eine Verringerung in der Streubreite der Ergebnisse, da die Rovings durch bessere Lagesicherheit gleichmäßiger belastet werden. Gleichzeitig ist eine signifikante Steigerung der Zugfestigkeit ( $\sigma_{\text{DKP,KSE 100 o.L.x2-Gelege}} = 1.979 \pm 228\text{ N/mm}^2$ ) zu verzeichnen, die oberhalb der im Faserstrangzugversuch ermittelten Rovingzugfestigkeit ( $\sigma_{\text{tex,KSE100o.L.x2}} = 1.858 \pm 34\text{ N/mm}^2$ ) liegt. Der relative Ausnutzungsgrad der mineralisch getränkten Gelege liegt im Verbundkörper damit über 100 %. Auch die Rissbreiten der mit Gelegen bewehrten Dehnkörperproben fallen im Vergleich zur Prüfserie mit gleich getränkten einzelnen Rovings geringer aus.

Die Rissheilungsuntersuchungen zeigen, dass wasserführende Risse  $< 0,10\text{ mm}$  auch in filigranen Probekörperquerschnitten ( $d = 15\text{ mm}$ ) verschlossen werden können. Moderate Wasserdrücke bis  $0,5\text{ bar}$ , also einer äquivalenten Wassersäule von fünf Metern, führen bei Rissen  $< 0,10\text{ mm}$  zur Rissheilung innerhalb weniger Tage. Die Rissheilung erfolgt schneller als bei druckloser Wasserlagerung. Wasserdrücke bis  $1,0\text{ bar}$  zeigen die Grenze der Rissheilungsfähigkeit bei Rissen um  $0,1\text{ mm}$  auf. Es kann festgehalten werden, dass die Rissheilungsfähigkeit von Textilbeton abhängig von der Rissbreite und dem anstehenden Wasserdruck ist. Weitere Einflussfaktoren sind der Probekörperquerschnitt und die verwendeten Materialien, vergleiche dazu auch [Mor20].

Untersuchungen der beiden Rissüberbrückungsprobekörper in Anlehnung an die Systemprüfung nach dem BAW-Merkblatt MITEX [BAW19a] zeigen, dass die Anforderungen an die Rissüberbrückungsklasse 2 für eine Rissaufweitung im Bauwerk  $\Delta w_{op} \leq 0,30\text{ mm}$  (Rissaufweitung in der Systemprüfung  $w_{min,lab} = 0,45\text{ mm}$ ) erfüllt werden kann. Auch die RÜK 3 ( $\Delta w_{op} \leq 0,45\text{ mm}$  und



$w_{min,lab} = 0,60$  mm) konnte erreicht werden. Anzumerken ist, dass die Enthäftungsbreite der RÜPK I und II nach BAW-Merkblatt MITEX für RÜK 2 ausgelegt war. Unter Berücksichtigung der Fehlstelle in der Textilbetonschicht des RÜPK II und dem vorzeitigen Versagen des Altbetongrundkörpers sowie der geringen Enthäftungsbreite (außerhalb des Rahmens der Systemprüfung) weisen die Ergebnisse darauf hin, dass auch die Rissüberbrückungsklasse 4 ( $\Delta w_{op} \leq 0,60$  mm und  $w_{min,lab} = 0,90$  mm) mit dem untersuchten mineralischen Instandsetzungssystem erreichbar ist.

## 7 Zusammenfassung, Schlussfolgerung und Ausblick

### 7.1 Zusammenfassung

Die bisherige Textilbetonforschung betrachtet vorwiegend Polymertränkungen von technischen Textilien. Dass mineralische Tränkungen für die Instandsetzung von Bauwerken von Relevanz sein können, zeigen vereinzelte Forschungsvorhaben, die Zementsuspensionen und silikatische Füllstoffe betrachteten. Diese mineralisch getränkten technischen Textilien weisen in Verbundprobekörpern eine höhere Temperaturbeständigkeit gegenüber konventionell, polymer getränkten Textilien auf. Des Weiteren wurden Zugfestigkeitssteigerungen und eine feinere Rissverteilung gegenüber unbehandelten Textilien beobachtet. Die benannten mineralischen Systeme weisen aber in der Regel einen hohen Prozessaufwand im Tränkungsverfahren auf. Rein silikatische Tränkungen sind in der bisherigen Forschung nur am Rande betrachtet worden.

Ziel der Arbeit war die Entwicklung eines flächigen Instandsetzungssystems aus Textilbeton mit mineralisch getränkten technischen Textilien. Der Schwerpunkt lag auf der Entwicklung einer mineralischen Tränkung in Kombination mit einem einfachen Tränkungsverfahren und der anschließenden Untersuchung und Bewertung der Materialeigenschaften am Textil und im Verbundprobekörper.

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgte die Tränkung der technischen Textilien händisch in einer eigens entwickelten Tränkungsanlage. Insgesamt sind über 2.500 m technische Textilien in Form von Endlosfasern getränkt worden. Ungefähr 25 % dieser Rovings unterlagen einer zweifachen Tränkung.

Getränkte und ungetränkte Rovings wurden in Faserstrangzugversuchen und in einaxialen Zugversuchen an Dehnkörperproben untersucht. Die Untersuchungen an verschiedenen technischen Textilien mit der Kieselsäureestertränkung KSE 100 in Abschnitt 4.1 zeigten, dass bei Basalt- und Carbonrovings eine Steigerung der Zugfestigkeit und der Rissanzahl verglichen mit ungetränkten Referenzrovings erreicht werden kann. Bei AR-Glas scheint es zu Schädigungsmechanismen infolge der Tränkung zu kommen. Rovings aus Carbon zeigten gegenüber Basalt zum einen ein höheres Potential der Zugfestigkeitssteigerung auf und zum anderen ein höheres Potential hinsichtlich des Rissverhaltens. Insbesondere für die Identifizierung eines geeigneten Tränkungsmaterials war eine hohe Zahl an Dehnkörperversuchen erforderlich, sodass im Rahmen dieser Arbeit insgesamt 331 Dehnkörperproben mit sechs verschiedenen Tränkungsmaterialien im einaxialen Zugversuch geprüft wurden. Zur Beschreibung der Wirkungsweise der Tränkung am Textil wurden mit den unterschiedlichen Tränkungsmaterialien insgesamt 165 Faserstrangzugversuche durchgeführt (Abschnitt 4.2).

An Dehnkörperproben mit zweifach getränkten Carbonrovings mit dem Tränkungsmaterial Kieselsäureester 100 (KSE 100 x2) wurden Einflussuntersuchungen in Form von klimatischer und wassergelagerter Alterung sowie beschleunigter Alterung in temperiertem Wasser bei 50 °C durchgeführt (Einlagerung bis zu 4.000 Stunden). Die Einflussuntersuchungen zeigten keine negativen Auswirkungen auf das Tragverhalten (Abschnitte 5.1.4 und 6.1.1).

Weiterhin wurde keine Verringerung der Zugfestigkeit in einaxialen Zugversuchen an temperierten Dehnkörperproben bei bis zu 160 °C festgestellt (Abschnitt 6.1.2). Die Betrachtung des Tränkungsmaterials mit kombinierter thermogravimetrischer Analyse und dynamischer Differenzkalorimetrie zeigte bis zu einer Temperatur von 1.050 °C keine Einflüsse, die die Materialeigenschaften negativ beeinflussen könnten (Abschnitt 5.2.2).

Ein Einfluss durch unterschiedliche Tränkungsmaterialien und die Tränkungshäufigkeit auf die Rovinggeometrie konnte festgestellt werden. Die Rovinggeometrie wiederum beeinflusst die Verbundeigenschaften. Um diesen Einfluss zu untersuchen, wurden mikroskopische Aufnahmen von 600 einzelnen Rovingquerschnitten erzeugt und ausgewertet (Abschnitt 5.1.1 bis 5.1.3). Es konnte ein Zusammenhang zwischen steigendem Rovingumfang und höheren Zugspannungen beziehungsweise geringeren mittleren Rissabständen ermittelt werden. Insbesondere der Kieselsäureester ohne Lösemittel wies bei zweifacher Tränkung (KSE 100 o. L. x2) nahezu vollständig durchtränkte Rovinggeometrien mit großer Verbundfläche auf (siehe Abschnitt 5.2.1).

Die analytischen Untersuchungen mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) und energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) verdeutlichten den Mechanismus einer verbundverbessernden Interaktion von Tränkungsmaterial und Feinbetonmatrix. Das amorphe Siliciumdioxid in der Rovingmatrix reagiert mit dem Calciumhydroxid des Zementleims und trägt zu einer verstärkten Bildung von Calciumsilicathydraten in der Verbundzone zwischen Fasermaterial und Feinbeton bei (Abschnitt 5.2.1).

Abschließende Untersuchungen zur Rissheilungs- und Rissüberbrückungsfähigkeit dienten der Überprüfung des Instandsetzungssystems hinsichtlich praxisnaher Randbedingungen. Die in Abschnitt 6.2.1 durchgeführten Rissheilungsversuche zeigten ein autogenes Rissheilungspotential von Rissen  $< 0,10$  mm bei Wasserdrücken von bis zu 1,0 bar innerhalb von 24 Tagen. Für die verschiedenen Druckwasserbeanspruchungen wurden insgesamt 27 Probekörper drucklos mit Wasser beaufschlagt und 36 Proben mit Druckwasserbeanspruchung. Rissbreite und Wasserdruck beeinflussen maßgeblich die Geschwindigkeit einer Rissheilung. Die Tastversuche an zwei Rissüberbrückungsprobekörpern in Anlehnung an die Systemprüfung nach BAW-Merkblatt MITEX zeigten, dass ein Instandsetzungssystem aus Textilbeton mit Textilgelegen aus zweifach getränkten Carbonrovings mit Kieselsäureester 100 ohne Lösemittel (KSE 100 o. L. x2) eine Rissbewegung im Grundkörper (Bestandsbauwerk) von bis zu 0,6 mm aufnehmen kann und in ausreichend viele Risse mit geringen Rissbreiten verteilt.

## 7.2 Schlussfolgerungen

Mit der vorliegenden Arbeit wurden erstmals umfangreiche Untersuchungen mit mineralischen Tränkungen auf Basis von Kieselsäureester an technischen Textilien durchgeführt. Bestimmte Kieselsäureester wurden durch eine Vielzahl von Dehnkörperversuchen als geeignete mineralische Tränkungsmaterialien identifiziert, da gegenüber ungetränkten Rovings Zugfestigkeitssteigerungen und ein verbessertes Rissverhalten zu verzeichnen waren. Auf Basis analytischer Untersuchungen der getränkten Rovings und den Ergebnissen der einaxialen Zugversuche wurde das Produkt KSE 100 mit dem Industriepartner zu einem optimierten Tränkungsmaterial Kieselsäureester 100 ohne Lösemittel (KSE 100 o. L.) weiterentwickelt. Auf den durchgeführten Laboruntersuchungen basierend lassen sich folgende Schlussfolgerungen für die Anwendung von Kieselsäureester für technische Textilien ziehen:

- Die Verwendung von Kieselsäureester auf technischen Textilien ermöglicht einen einfachen Tränkungsprozess mit einem einkomponentigen Tränkungsmaterial. Die Reaktion mit der Luftfeuchtigkeit erfordert keinen zusätzlichen technischen Prozessaufwand, und das einfache Aufrollen ausreagierter KSE-Rovings ohne signifikante Textilschädigungen ermöglicht eine erforderliche Zweifachtränkung zur Geometrieaufweitung.
- Carbonrovings erweisen sich gegenüber AR-Glas- und Basaltrovings als geeigneter für das entwickelte Tränkungsmaterial, da keine geschlossene Tränkungsschicht erreicht wird und somit alkaliempfindliche Materialien nicht ausreichend von der Beschichtung aus amorphem Siliciumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) geschützt sind. Entsprechend liegt im Verbundprobekörper keine alkaliresistente „Schutzschicht“ vor. Zusätzlich weisen mineralisch getränkte Carbonrovings größere Zugfestigkeitssteigerungen und ein besseres Rissverhalten auf.
- Ein chemischer Verbund der Carbonrovings und des Tränkungsmaterials erfolgt nicht, dennoch ist durch eine Zweifachtränkung mit modifiziertem Tränkungsmaterial eine umfassende Aktivierung vieler Einzelfilamente der technischen Textilien möglich. Eine Zusammensetzung aus monomeren und mehrkettigen Molekülstrukturen von Kieselsäureester 100 ohne Lösemittel umschließt die Rovingstruktur und einzelne Filamente optimal. Die hohe Löslichkeit des amorphen  $\text{SiO}_2$  im alkalischen Milieu des Zementleims führt zur verbundverbessernden Bildung von Calciumsilicathydrat-Phasen (CSH-Phasen) zwischen den Filamenten in der Rovingmatrix.
- Über die bekannten Erkenntnisse hinaus, dass nano- und mikrosilikatische Füllstoffe in der Rovingmatrix das Verbundverhalten zur Feinbetonmatrix verbessern können, zeigen die eigenen Untersuchungen, dass sowohl der Rovingquerschnitt, die Tränkungshäufigkeit und die Zusammensetzung der Kieselsäureestermoleküle einen Einfluss auf die Verbundeigenschaften haben.
- Alterungseinflüsse führen bei getränkten Carbonrovings mit Kieselsäureester zu einer Nachverfestigung durch eine fortschreitende CSH-Phasenbildung. Entsprechend ist keine Zugfestigkeitsverringernung infolge der Alterung in den Dehnkörperversuchen festzustellen. Vielmehr zeigen die Ergebnisse verbundverbessernde Prozesse auf.

- Die Temperaturbeständigkeit des mineralischen Tränkungsmaterials auf Kieselsäureesterbasis bis mindestens 1050 °C liegt über der für Carbonrovings kritischen Temperatur von 650 °C. Damit weist Kieselsäureester als Tränkungsmaterial keine Einschränkungen hinsichtlich erhöhter Temperaturen bzw. des Brandverhaltens auf.
- Die Weiterverarbeitung von zweifach getränkten Rovings zu Textilgelegen führt zu einer gleichmäßigeren Belastung der Einzelrovings und somit zu weiteren Zugfestigkeitssteigerungen und einer geringeren Streubreite. Entsprechend sind durch Prozessoptimierungen zur Herstellung von gleichmäßig getränkten Textilgelegen weitere Leistungssteigerungen zu den ermittelten Ergebnissen zu erwarten, da im Rahmen dieser Arbeit größtenteils mit Rovingbewehrungen gearbeitet wurde.
- Die Zugfestigkeit der mit Kieselsäureester getränkten Rovings im Faserstrangzugversuch sowie im Dehnkörperzugversuch fällt geringer aus als bei Acrylat- oder Epoxidharztränkungen. Bei der flächigen Instandsetzung von Stahlbetonbauwerken mit sich bewegenden wasserführenden Rissen ist die maximale Tragfähigkeit der Bewehrung jedoch nicht maßgebend. Die Ergebnisse aus den Dehnkörperuntersuchungen sowie die Versuche mit Rissüberbrückungsprobekörpern in Anlehnung an die Systemprüfung nach dem BAW-Merkblatt MITEX mit dem DURTEX-Prinzip bestätigen die Anwendbarkeit des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Instandsetzungssystems.

Als wesentlichstes Ergebnis kann festgehalten werden, dass ein Textilbetonsystem mit mineralischer Tränkung auf Basis von Kieselsäureester in Kombination mit technischen Textilien aus Carbonrovings entwickelt werden konnte, welches für die flächige Instandsetzung von Stahlbetonbauwerken mit sich bewegenden wasserführenden Rissen geeignet ist. Die ermittelten Materialeigenschaften deuten darüber hinaus darauf hin, dass durch Prozessoptimierungen auch weitere Einsatzgebiete für technische Textilien mit mineralischer Tränkung auf Basis von Kieselsäureester möglich sind.

### 7.3 Ausblick

Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Labormaßstab des Tränkungsprozesses und der Gelegherstellung ermöglicht eine detaillierte und umfassende Bewertung des Zugtragverhaltens des mineralischen Instandsetzungssystems. Durch einen maschinelleren Verarbeitungsprozess sind weitere Performancesteigerungen zu erwarten, die es neben weiteren Fragestellungen, die aufgekomen sind, zu untersuchen gilt.

Für folgende Aspekte besteht ein zusätzlicher Forschungsbedarf an der mineralischen Tränkung auf Basis von Kieselsäureester:

- Eine Prozessoptimierung im Tränkungsverfahren und der Weiterverarbeitung der getränkten Rovings. Denkbar ist auch eine Rovingverarbeitung in einer Art Pultrusionsverfahren, bei dem im zweiten Tränkungsdurchlauf bereits einfach getränkte Direktrovings mit geringer Textilfeinheit zu assemblierten Rovings (Heavy Tow) zusammengeführt werden, um eine vollständige Durchtränkung und gleichbleibende Textilgeometrie zu erreichen.
- Anpassung bzw. Entwicklung eines Versuchsaufbaus mit geringem Prüfaufwand für den Faserstrangzugversuch von mineralisch getränkten Rovings, da diese weder für die bekannten Einspannvorrichtungen von weichen Textilien noch für die Klemmungen von harten Textilien geeignet sind.
- Betrachtungen anderer (mineralischer) Schichten von technischen Textilien, um auf chemischer Basis Optimierungen im Verbund zwischen Tränkungsmaterial und Roving bzw. Filamenten zu erreichen
- Weitere Variation der Molekülstrukturen des Tränkungsmaterials mit hoher Gelabscheidungsrate, bei der mehr monomere Molekülverbindungen die Filamente besser durchdringen und mehrkettige Molekülstrukturen die vollständige Umschließung weiterhin gewährleisten. Eine Anpassung mit einem Elastifizierer könnte Schwindrisse und Brüche infolge innerer Schwindspannungen in der Beschichtung verringern.
- Variation der Feinbetonzusammensetzung (Instandsetzungsmörtel mit geringerem E-Modul), um z. B. Anpassungen an den Betonuntergrund zu berücksichtigen
- Ausweitung auf statische und dynamische Versuche zum Temperatureinfluss, wie [Dal22] in ersten Untersuchungen tätigte
- Untersuchungen zum Alterungseinfluss unter Last (statisch und dynamisch) an technischen Textilien mit zweifacher Tränkung mit Kieselsäureester ohne Lösemittel

Unter der Voraussetzung von möglichen Leistungssteigerungen durch die Standardisierung des Herstellungsprozesses sollte die Probekörperdimensionierung variiert werden. Verringerungen des Bewehrungsgrads zu Ressourceneinsparungen sind zu untersuchen. Mit den standardisierten Materialkomponenten sind dann auch weitere Untersuchungen an Rissüberbrückungsprobekörpern nach dem BAW-Merkblatt MITEX durchzuführen, bei denen auch die Variationen des Enthaltungsbereichs in Bezug auf das verwendete Material und die Abmessungen zu berücksichtigen sind.



## 8 Literatur

- [Ari20] D'Arienzo, M.; Dirè, S.; Cobani, E.; Orsini, S.; Di Credico, B.; Antonini, C.; Callone, E.; Parrino, F.; Dalle Vacche, S.; Trusiano, G.; Bongiovanni, R.; Scotti, R.: SiO<sub>2</sub>/Ladder-Like Polysilsesquioxanes Nanocomposite Coatings: Playing with the Hybrid Interface for Tuning Thermal Properties and Wettability. In: *Coatings* 2020, 10, 913.
- [Ave71] Aveston, J. ; Cooper, G. A. ; Kelly, A.: Single and multiple fracture. National Physical Laboratory (Hg.): The properties of fibre composites. Conference proceedings. 1971. S. 15-26.
- [Ban04] Banholzer, B.: Bond behaviour of a multi-filament yarn embedded in a cementitious matrix. Dissertation. RWTH Aachen University. Aachen, 2004.
- [Ban22] Bankhead, P: <https://petebankhead.gitbooks.io/imagej-intro/content/chapters/thresholding/thresholding.html>. Abgerufen am 10.10.2022.
- [BAW19a] Bundesanstalt für Wasserbau: BAW-Merkblatt Flächige Instandsetzung von Wasserbauwerken mit textildbewehrten Mörtel- und Betonschichten (MITEX). Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien). 2019.
- [BAW19b] Bundesanstalt für Wasserbau: BAW Empfehlung Instandsetzungsprodukte – Hinweise für den Sachkundigen Planer zu bauwerksbezogenen Produktmerkmalen und Prüfverfahren (2019).
- [Bes22] Bessling, M.; Manko, L.; Orłowsky, J.: Quantification of the Transversal Fiber Strand Stiffness of Textiles Used in Textile-Reinforced Concrete via Shore Hardness. In *Buildings* 2022, 12, 2038.
- [Biel17] Bielak, J.; Hegger, J.; Chudoba, R.: Towards Standardization: Testing and Design of Carbon Concrete Composites. In (Hordijk, D. A.; Luković, M. ed.): *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet. Proceedings of the 2017 fib Symposium, Maastricht (2017)*, S. 313–320.
- [Bos07] Boos, M.: Steinfestiger – Die Steuerung von Gelabscheidungsraten und Eindringtiefen. In *Remmers – Info, Fassadenschutz und Baudenkmalpflege* 10/2007. Fa. Remmers Baustofftechnik. [www.remmers.de](http://www.remmers.de). Abgerufen am 09.09.2022.
- [Bra16] Brameshuber, W.: Manufacturing methods for textile-reinforced concrete. In (Triantafyllou, T. ed.): *Textile Fibre Composites in Civil Engineering*. Woodhead Publishing (2016), S. 45–59.
- [Bra20] Braun, F.: Zur Ermittlung des Langzeitverhaltens hydrophobierter Natursteinoberflächen unter dem Einfluss natürlicher Verwitterung. Dissertation. TU Dortmund. Dortmund 2021.



- [BRE04] Building Research Establishment Ltd, Thematic network on performance based rehabilitation of reinforced concrete structures. [http://www.cordis.europa.eu/project/rcn/64069\\_en.html](http://www.cordis.europa.eu/project/rcn/64069_en.html), 2004. Abgerufen am 21.12.2022
- [Bro02] Brockmann, J.; Raupach, M.: Durability Investigations on Textile Reinforced Concrete. Brisbane: CSIRO, 2002. - In: Durability of Materials and Components, 9th International Conference, Brisbane, Australia, 17-20 March 2002, Paper No. 111, 9 Seiten
- [Bru07] Bruckermann, O.: Zur Modellierung des Zugtragverhaltens von textilbewehrtem Beton. Dissertation. RWTH Aachen University. Aachen, 2007.
- [Büt12a] Büttner, T.: Zur Dauerhaftigkeit polymergetränkter AR-Glas Bewehrungen in Textilbeton. Dissertation. RWTH Aachen University. Aachen, 2012.
- [Büt12b] Büttner, T.; Raupach, M.: Des Bauwerks neue Kleider. Funktionsprinzipien und Einsatzmöglichkeiten von Textilbetonschichten zum Schutz von Wasserbauwerken. In Bauen im Bestand: B + B 35(6) (2012), S. 70–75.
- [C322a] C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite e. V. <https://www.bauen-neu-denken.de/en/homepage/>. Abgerufen am 29.05.2022.
- [C322b] C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite e. V., CUBE Carbonbetonhaus, <https://www.bauen-neu-denken.de/kategorie/cube/>. Abgerufen am 31.05.2022
- [Cha10] Bernard Champagnon, Valérie Martinez, Christine Martinet, Rozenn Le Parc, Claire Levelut. Density and density fluctuations anomalies of SiO<sub>2</sub> glass: comparison and light scattering study.. Philosophical Magazine, 2007,87 (3-5), S. 691-695.
- [Che11] Cherif, C. (Hrsg.): Textile Werkstoffe für den Leichtbau: Techniken – Verfahren – Materialien – Eigenschaften. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Heidelberg, 2011.
- [Coh10] Cohen, Z.; Peled, A.: Controlled telescopic reinforcement system of fabric-cement composites – Durability concerns. In Cement and Concrete Research 40 (2010), S.1495-1506.
- [Cur01] Curbach, M.; Jesse, D.: Dehnkörper aus textilbewehrtem Beton – Phänomene, Deutung, Schlussfolgerungen. In (Hegger, J.ed.): Textilbeton: 1. Fachkolloquium der Sonderforschungsbereiche 528 und 532, Tagungsband, Aachen (2001), S. 125–136.
- [Cur07a] Curbach, M.; Graf, W.; Jesse, D.; Sickert, J.- U.; Weiland, S.: Segmentbrücke aus textilbewehrtem Beton – Konstruktion, Fertigung, numerische Berechnung. Beton- und Stahlbetonbau 102 (2007), S. 342–352. 2007.

- [Cur12] Curbach, M.; Ortlepp, R.: Sonderforschungsbereich 528 - Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung. Abschlussbericht. Dresden, 2012.
- [Cur16] Curbach, M.; Schütze, E.: Entwicklung von Bemessungs- und Sicherheitskonzepten sowie standardisierter Prüfkonzepete zur Materialcharakterisierung von Carbonbeton: Basisvorhaben B3 - Teilvorhaben C3-B3-I-a. Abschlussbericht. Dresden, 2016.
- [DAfStb NMB-RL] DAfStb NMB-RL: Entwurf 2021-06, Richtlinie Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung. Beuth Verlag GmbH, Berlin. Unveröffentlicht.
- [DAfStb WU-RL] DAfStb WU-RL: 2017-12, Richtlinie Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2017.
- [DIB14] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (AbZ) Z-31.10-190, Verfahren zur Rissbreitenreduzierung in Betonkonstruktionen mit oberflächennah eingelegten Carbontextilien, Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Berlin, August 2015.
- [DIB15] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (AbZ) Z-31.10-182, TUDALIT-Textilbeton, Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Berlin, Juni 2014.
- [DIB17] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (AbZ): solidian GmbH Sandwichwand (Z-71.3-39). Mai 2017.
- [DIB21] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (AbZ) Z-31.10-182, TUDALIT-Textilbeton, Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Berlin, Dezember 2021.
- [DIN196] DIN EN 196-1:2016-11: Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2016.
- [DIN206] DIN EN 206: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013+A2:2021. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2021.
- [DIN7500] DIN EN ISO 7500-1:2018-06: Metallische Werkstoffe – Kalibrierung und Überprüfung von statisch einachsigen Prüfmaschinen – Teil 1: Zug- und Druckprüfmaschinen – Kalibrierung und Überprüfung der Kraftmesseinrichtung. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2018.
- [DIN9163] DIN EN ISO 9163:2005-07: Textilglas - Rovings - Herstellung von Probekörpern und Bestimmung der Zugfestigkeit von imprägnierten Rovings. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2005.
- [DIN10618] DIN EN ISO 10618:2004-11: Kohlenstofffasern - Bestimmung des Zugverhaltens von harzprägnierten Garnen. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2004.

- [DIN12620] DIN EN 12620:2008-07: Gesteinskörnung für Beton. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2008.
- [DIN15148] DIN EN ISO 15148:2018-12: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2018.
- [DIN65382] DIN 65382:1988-12: Luft- und Raumfahrt; Verstärkungsfasern für Kunststoffe; Zugversuch an imprägnierten Garnprüfkörpern. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [Don16] Donnini, J.; Corinaldesi, V.; Nanni, A.: Mechanical properties of FRCM using carbon fabrics with different coating treatments. In *Composites Part B: Engineering* 88 (2016), S. 220–228.
- [Dvo16] Dvorkin, D.; Peled, A.: Effect of reinforcement with carbon fabrics impregnated with nanoparticles on the tensile behavior of cement-based composites. In *Cement and Concrete Research* 85 (2016), S. 28–38.
- [Edv99] Edvardsen, C.: Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete. In *ACI Materials Journal* 96 (4) (1999), S. 448–454.
- [Erh15] Erhard, E.; Weiland, S.; Lorenz, E.; Schladitz, F.; Beckmann, B.; Curbach, M.: Anwendungsbeispiele für Textilbetonverstärkungen. Instandsetzung und Verstärkung bestehender Tragwerke mit Textilbeton. In: *Beton- und Stahlbetonbau Spezial: Verstärken mit Textilbeton*. Ernst und Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG (2015), S. 74–82.
- [Ehr20] Ehrenstein, G.W.: Massenanalyse – Einfache Bestimmungsmethoden, Dichtebestimmung, Feuchtigkeitsbestimmung, Gehalt an Füll- und Verstärkungsstoffen, Bestimmung flüchtiger Bestandteile, Thermogravimetrie, Messunsicherheit. Carl Hanser Verlag München. 2020 München.
- [Fit98] Fitzer, E.; Manocha, L. M.: *Carbon Reinforcements and Carbon/Carbon Composites*. Springer Berlin Heidelberg. Heidelberg (1998).
- [GOM18] Gesellschaft für optische Messtechnik – GOM mbH: White Paper – Digitale Bildkorrelation (DIC), Januar 2018
- [GOM13] Gesellschaft für optische Messtechnik – GOM mbH: ARAMIS Benutzerhandbuch – Software. ARAMIS v6.3 und höher. 9-July-2013. Braunschweig, 2013.
- [Gor22] Gornig, M.; Michelsen, C.; Pagenhardt, L: Bauwirtschaft, 2022: Hohe Preisdynamik setzt sich fort – Geschäfte laufen trotz Corona-Krise gut. DIW-Wochenbericht 1+2/2022. Berlin ([https://www.diw.de/de/diw\\_01.c.833281.de/publikationen/wochenberichte/2022\\_01\\_1/bauwirtschaft\\_hohe\\_preisdynamik\\_setzt\\_sich\\_fort\\_geschaefte\\_laufen\\_trotz\\_corona-krise\\_gut.html](https://www.diw.de/de/diw_01.c.833281.de/publikationen/wochenberichte/2022_01_1/bauwirtschaft_hohe_preisdynamik_setzt_sich_fort_geschaefte_laufen_trotz_corona-krise_gut.html)). Abgerufen am 21.12.2022.

- [Gri90] Grimm, W. D.: Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland. Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Arbeitsheft 50, Lipp Verlag. München, 1990.
- [Han15] Hansl, M.; Feix, J.: Untersuchung der Rissbreiten in textilbewehrten Betonen. In *Beton- und Stahlbetonbau* 110 (2015), S. 410–418.
- [Heg03] Hegger, J.; Bruckermann, O.: Modelling of the Bond of Filaments and Rovings; German version. In (Curbach, M. ed.): *Textile reinforced structures: Proceedings of the 2nd Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS2)*, Dresden (2003), S. 375–386.
- [Heg04] Hegger, J.; Voss, S.: Textile reinforced concrete under biaxial loading. In (Di Prisco, M.; Felicetti, R.; Plizzari, G. A. ed.): *6th International RILEM Symposium on Fibre-Reinforced-Concretes (FRC) - BEFIB 2004*, Varenna (2004), S. 1463–1472.
- [Heg05] Hegger, J.; Niewels, J.: Textile Carbon Reinforcement for Base Slabs of Self-Consolidating Concrete. In (Russell, H. G. ed.): *Seventh International Symposium on the Utilization of High-Strength/High Performance Concrete*, Washington, D.C. (2005), S. 317–332.
- [Heg11] Hegger, J.; Kulas, C.; Raupach, M.; Büttner, T.: Tragverhalten und Dauerhaftigkeit einer schlanken Textilbetonbrücke – Eine 97 m lange Fußgängerbrücke mit einer Bewehrung aus AR-Glasfilamenten. *Beton- und Stahlbetonbau* 106, Heft 2, 2011, S. 72–80.
- [Heg12] Hegger, J.: Abschlussbericht des Sonderforschungsbereichs 532: Textilbewehrter Beton - Grundlagen für die Entwicklung einer neuartigen Technologie (2012).
- [Hei21] Von der Heid, A.: Zum Tragverhalten von Sandwichelementen aus Textilbeton mit schlaffer und vorgespannter Bewehrung. Dissertation. RWTH Aachen University. Aachen, 2021.
- [Hel16] Helbig, T.; Rempel, S.; Unterer, K.; Kulas, C.; Hegger, Josef: Fuß- und Radwegbrücke aus Carbonbeton in Albstadt-Ebingen. Die weltweit erste ausschließlich carbonfaserbewehrte Betonbrücke. In: *Beton- und Stahlbetonbau*. 111 (2016), Nr. 10, S. 676 – 685.
- [Her16] Herbrand, Martin; Claßen, Martin; Hegger, Josef (2016): Querkraftversuche an Spannbetonträgern mit carbontextilbewehrter Spritzmörtelverstärkung unter zyklischer Beanspruchung. In *Beton- und Stahlbetonbau* 111 (9), S. 576–587.
- [Hin17] Hinzen, M.: Prüfmethode zur Ermittlung des Zugtragverhaltens von textiler Bewehrung für Beton. In *Der Bauingenieur*, Jahrgang 92 (2017), Heft 06, S. 289 – 291.

- [Hit22] Hitex GmbH. <https://www.hitexbau.com/men%C3%BC/produkte/>. Produktdatenblätter. Abgerufen am 29.05.2022.
- [H&P15] Hegewald & Peschke MPT GmbH: Original-Betriebsanleitung für die Universalprüfmaschinen der Serie inspekt, Typen 100 bis 300 kN-1. Ausgabe 07/15. Nossen, 2015.
- [Ile78] Iler, K. R.: The Chemistry of Silica – Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties and Biochemistry. In John Wiley & Sons. Wilmington Delaware, 1978.
- [ISO3341] ISO 3341:2000-05: Textilglas - Garne - Bestimmung der Reißkraft und Bruchdehnung. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2000.
- [Jes04] Jesse, F.: Tragverhalten von Filamentgarnen in zementgebundener Matrix. Dissertation. Technische Universität Dresden. Dresden, 2004.
- [Jes10] Jesse, F.; Curbach, M.: Verstärken mit Textilbeton. In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. (Hrsg.): Beton-Kalender 2010: Brücken, Betonbau im Wasser. Berlin: Ernst & Sohn, S. 457–565.
- [Kul13] Kulas, C.: Zum Tragverhalten getränkter textiler Bewehrungselemente für Betonbauteile. Dissertation. RWTH Aachen University. Aachen, 2013.
- [Krü01] Krüger, M.; Reinhardt, H. W.; Fichtlscherer, M.: Verbundverhalten vorgespannter und nicht vorgespannter textiler Bewehrung im Beton. In Otto-Graf-Journal (2001), S. 33–50.
- [KSE100] Remmers GmbH: KSE 100. Technisches Merkblatt 0719 TM-1-14 03/17 EW\_AMy\_Jen. [https://media.remmers.com/celum/export/documents/Remmers\\_0719\\_KSE-100\\_Technisches-Merkblatt\\_de\\_DE\\_26395.pdf](https://media.remmers.com/celum/export/documents/Remmers_0719_KSE-100_Technisches-Merkblatt_de_DE_26395.pdf). Abgerufen am 02.08.2017.
- [KSE300] Remmers GmbH: KSE 300. Technisches Merkblatt 0720 TM-2-108 05/18 EW\_AMy\_Jen. [https://media.remmers.com/celum/export/documents/Remmers\\_0720\\_KSE-300\\_Technisches-Merkblatt\\_de\\_DE\\_26401.pdf](https://media.remmers.com/celum/export/documents/Remmers_0720_KSE-300_Technisches-Merkblatt_de_DE_26401.pdf). Abgerufen am 02.08.2017.
- [KSE500E] Remmers GmbH: KSE 500E. Technisches Merkblatt 0715 TM-1-17 03/17 EW\_AMy\_Jen. [https://media.remmers.com/celum/export/documents/Remmers\\_0715\\_KSE-500-E\\_Technisches-Merkblatt\\_de\\_DE\\_26355.pdf](https://media.remmers.com/celum/export/documents/Remmers_0715_KSE-500-E_Technisches-Merkblatt_de_DE_26355.pdf). Abgerufen am 02.08.2017.
- [KSE510] Remmers GmbH: KSE 510. Technisches Merkblatt 0625 TM-1-10 03/17 EW\_AMy\_Jen. [https://media.remmers.com/celum/export/documents/Remmers\\_0625\\_KSE-510\\_Technisches-Merkblatt\\_de\\_DE\\_26419.pdf](https://media.remmers.com/celum/export/documents/Remmers_0625_KSE-510_Technisches-Merkblatt_de_DE_26419.pdf). Abgerufen am 02.08.2017.

- [Len20] Lenting, M.; Orłowsky, J.: Einaxiale Zugversuche an textilbewehrten Betonen mit anorganisch getränkten Carbonfasern. In *Beton- und Stahlbetonbau* 115 (2020), S. 495–503.
- [Len21a] Lenting, M.; Orłowsky, J.: Instandsetzung von Stahlbetonbauwerken – Textilbewehrte Mörtel und Betonschichten mit mineralisch getränkter Bewehrung. In *Erhaltung von Bauwerken 7. Kolloquium, Esslingen* (2021), S. 463–471.
- [Len21b] Lenting, M.; Orłowsky, J.: Textilbewehrte Mörtel- und Betonschichten mit mineralisch getränkter Bewehrung – Möglichkeiten und Perspektiven. In *Trinkwasserspeicherung in der Praxis 6. Kolloquium, Esslingen* (2021), S. 171–178.
- [Lie12] Lieboldt, M.: Transport von Flüssigkeiten und Gasen in Textilbeton. Dissertation. Technische Universität Dresden. Dresden, 2012.
- [Lie20] Lieboldt F.: Photogrammetrische Verfahren zur Risserkennung und -analyse im bautechnischen Versuchswesen. Dissertation. Technische Universität Dresden, Dresden, 2020.
- [Lit81] Litherland, K.L. ; Oakley, D.R. ; Proctor, B.A.: The use of accelerated ageing procedures to predict the long term strength of GRC composites. In: *Cement and Concrete Research* (1981), S. 455–466
- [Lor14] Lorenz, E.: Endverankerung und Übergreifung textile Bewehrungen in Betonmatrices. Dissertation, Technische Universität Dresden (2014).
- [Lor15] Lorenz, E.; Schütze, E.; Weiland, S.: Textilbeton – Eigenschaften des Verbundwerkstoffs. In *Beton- und Stahlbetonbau* 110 (2015), S. 29–41.
- [Lu18] M. Lu, H. Xiao, M. Liu, X. Li, H. Li, L. Sun: Improved interfacial strength of SiO<sub>2</sub> coated carbon fiber in cement matrix, *Cement and Concrete Composites* (2018)
- [Mec11] Mechtcherine, V.; Lieboldt, M.: Permeation of water and gases through cracked textile reinforced concrete. In *Cement and Concrete Composites* 33 (2011), S. 725–734.
- [Mec20] Mechtcherine, V.; Michel, A.; Liebscher, M.; Schneider, K.; Großmann, C.: Mineral-impregnated carbon fibre composites as novel reinforcement for concrete construction - Material and automation perspectives. In *Automation in Construction* 110 (2020).
- [Mei91] Meichsner, H.; Wüsching, R.: Die Selbstdichtung von Rissen in Beton- und Stahlbetonbauteilen. In *Kurzberichte aus der Bauforschung* 33(8) (1991). Fraunhofer IRB Verlag. Stuttgart, 1991.
- [Mel22] Meltrock - Russischer Basalt GmbH: <https://de.meltrock.ru/artikel/die-vergleichseigenschaften-der-endlosen-basaltfaser-ebf-und-der-glasfaser/>. Abrufen am 27.09.17.

- [Mol05] Molter, M.: Zum Tragverhalten von textilbewehrtem Beton. Dissertation. RWTH Aachen University. Aachen, 2005.
- [Mor05] Morgan, P.: Carbon Fibers and Their Composites. CRC Press, Boca Raton. Florida, 2005.
- [Mor14] Morales Cruz, C.; Raupach, M.; Westendarp, A.; Bruder, S.: Untersuchungen an einer vier Jahre alten Schutzschicht aus textilbewehrtem Spritzbeton am Wehr Horkheim. Ergebnisse eines Forschungsprojekts. In Beton 64 (10) (2014), S. 390–392, 394-395.
- [Mor17] Morales Cruz, C.; Raupach, M.; Maintz, H.: Textilbewehrte Mörtelbandage für die dauerhafte Instandsetzung von Rissen im Dach des Aachener Doms. In Erhaltung von Bauwerken 5. Kolloquium, Esslingen (2017), S. 115–160.
- [Mor20] Morales Cruz, C.: Crack-distributing Carbon Textile Reinforced Concrete Protection Layers. Dissertation. RWTH Aachen University. Aachen, 2020.
- [Nad17] Nativ R., Peled A., Mechtcherine V., Hempel S., Schroefl C.: Micro- and nanoparticle mineral coating for enhanced properties of carbon multifilament yarn cement-based composites. In: Composites Part B 111 (2017) S. 179–189.
- [Nie17] Niederwald, M.: Zum Einfluss der viskoelastischen Eigenschaften des beschichteten Bewehrungsmaterials auf das Zugtragverhalten von carbonbewehrtem Beton. Dissertation. Universität der Bundeswehr München. München, 2017.
- [Ohn94] Ohno, S.; Hannant, D. J.: Modeling the Stress-Strain Response of Continuous Fiber Reinforced Cement Composites. ACI Materials Journal 91, Heft 3, 1994. S. 306-312.
- [Orl04] Orłowsky, J.: Zur Dauerhaftigkeit von AR-Glasbewehrung in Textilbeton. Dissertation. RWTH Aachen University. Aachen, 2004.
- [Orl07] Orłowsky, J.; Büttner, T.; Raupach, M.: Studie über Potentiale, Grenzen und offene Fragen beim Einsatz von Textilbetonen zur Instandsetzung von Wasserbauwerken. report no. F7052, Aachen, 2007.
- [Orl11] Orłowsky, J.; Raupach, M.; Westendarp, A.; Öztürk, T.: Textilbewehrte Spritzmörtel zur Instandsetzung von Wasserbauwerken. In Beton 61 (12) (2011), S. 486–490.
- [Orl21] Orłowsky, J.; Maurer, R.; Heeke, G.; Beßling, M.; Bettin, M.: Ressourcenschonende Lärmschutzelemente aus Textilbeton als Alternative für konventionelle Stahlbetonfertigteile. In Beton- und Stahlbetonbau 116 (2021), S. 947–957.
- [Pag22a] Datenblatt Pagel TF10 TUDALIT-Feinbeton. In: Homepage PAGEL Spezial-Beton GmbH & Co. KG. [https://www.pagel.com/all/pdf/de/tf10\\_de.pdf](https://www.pagel.com/all/pdf/de/tf10_de.pdf). Abgerufen am 29.05.2022

- [Pag22b] Datenblatt Pagel TW05/TW10/TW20/TW40 TUDALIT-Feinbeton. In: Homepage PAGEL Spezial-Beton GmbH & Co. KG. [https://www.pagel.com/all/pdf/de/tw\\_de.pdf](https://www.pagel.com/all/pdf/de/tw_de.pdf). Abgerufen am 29.05.2022
- [Pel15] Peled, A.; Mechtcherine, V.; Nicke, D.; Hempel, S.: Modifying carbon roving-cement matrix bond by inorganic coating. In (Reinhardt, H. W.; Parra-Montesinos, G. J.; Garrecht, H. ed.): HPFRCC-7. Proceedings of the 7th RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, Stuttgart (2015), S. 61–68.
- [Pra08] Pradere, C., Sauder, C., 2008. Transverse and longitudinal coefficient of thermal expansion of carbon fibers at high temperatures (300–2500 K). *Carbon* 46 (2008), 1874–1884.
- [Pre18] Preinsdorfer, P.: Zur Spaltrissbildung von textilbewehrtem Beton. Dissertation. TU Wien. Wien, 2019.
- [Pur00] Purnell, P.; Buchanan, A. J.; Short, N. R.; Page, C. L.; Majumdar, A. J.: Determination of bond strength in glass fibre reinforced cement using petrography and image analysis. *Journal of Materials Science* 35 (2000), S. 4653–4659
- [Pur01] Purnell, P.; Short, N.R.; Page, C.L.: Modelling Durability in GRC. London: Concrete Society, 2001. - In: Proceedings of the 12th International Congress of the International Glassfibre Reinforced Concrete Association, Dublin, 14-16 May 2001, S. 73-82
- [Rau02] Raupach, M.; Brockmann, J.: Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von textilbewehrtem Beton: Chemische und mechanische Beanspruchung von Textilien aus Glas. In: *Beton* 52 (2002), Nr. 2, S. 72-74,76,78-79
- [Rau06] Raupach, M.; Orłowsky, J.; Büttner, T.: Epoxy-impregnated textiles in concrete - Load bearing capacity and durability. In (Hegger, J.; Bramehuber, W. ed.): IC-TRC'2006 - 1st International RILEM Conference on Textile Reinforced Concrete, Aachen (2006), S. 77–88.
- [Rau08] Raupach, M.; Orłowsky, J.: Erhaltung von Betonbauwerken, 1. Aufl., Vieweg & Teubner Verlag Wiesbaden. Wiesbaden, 2008.
- [Rau11] Raupach, M.; Orłowsky, J.; Büttner, T.: Improvement of the durability of TRC with polymer: selection of materials and longterm modelling; german version. In (Curbach, M.; Ortlepp, R. ed.): *Textile Reinforced Structures: Proceedings of the 6th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS6)*, Dresden (2011), S. 227–244.
- [Rei08] Reisgen, U.; Raupach, M.: Stärkung des Verbunds durch eine polymere Phase. In (Hegger, J. ed.): *Sonderforschungsbereich SFB 532. Textilbewehrter Beton -*



- Grundlagen für die Entwicklung einer neuartigen Technologie. Research proposal (2nd halfyear 2008 - 1st half-year 2011). RWTH Aachen University. Aachen, 2008.
- [Rem17] Rempel, S.; Ricker, M.: Ermittlung der Materialkennwerte der Bewehrung für die Bemessung von textilbewehrten Bauteilen. In *Der Bauingenieur*, Jahrgang 92 (2017), Heft 06, S. 280 – 288.
- [Rem18a] Rempel, S.: Zur Zuverlässigkeit der Bemessung von biegebeanspruchten Betonbauteilen mit textiler Bewehrung. Dissertation. RWTH Aachen University. Aachen, 2018.
- [Rem18b] Rempel, S.; Erhard, E.; Schmidt, H.-G.; Will, N.: Die Sanierung des Mariendachdaches in Neviges mit carbonbewehrtem Spritzmörtel. In *Beton- und Stahlbetonbau* 113 (2018), S. 543–550.
- [Rip89] Ripphausen, B.: Untersuchungen zur Wasserdurchlässigkeit und Sanierung von Stahlbetonbauteilen mit Trennrissen. Dissertation. RWTH Aachen University. Aachen 1989.
- [Roo13] De Rooij, M. R.; Schlangen, E.; Joseph, C.: Introduction. In (de Rooij, M. et al. ed.): *Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials. State-of-the-Art-Report of RILEM Technical Committee 221-SHC*. Springer, Dordrecht (2013), S. 1–17.
- [RuG22] R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH. Technische Daten. <https://www.r-g.de/art/205110>, Abgerufen am 29.05.2022
- [Sch06] Schleser, M.; Walk-Laufer, B.; Raupach, M.; Dilthey, U.: Application of Polymers to Textile-Reinforced Concrete. In *Journal of Materials in Civil Engineering* 18 (2006), S. 670–676.
- [Sch08] Schleser, M.: Einsatz polymerimprägnierter, alkaliresistenter Glastextilien zur Bewehrung zementgebundener Matrices. Dissertation. RWTH Aachen University. Aachen, 2008.
- [Sch09] Scheffler, C.: Zur Beurteilung von AR-Glasfasern in alkalischer Umgebung. Dissertation. TU Dresden. Dresden 2009.
- [Sch15a] Scheerer, S.; Schladitz, F.; Curbach, M. (2015): Textile Reinforced Concrete - From the Idea to a High Performance Material. In: *Proceedings of the 11th International Symposium on Ferrocement and 3rd ICTRC International Conference on Textile Reinforced Concrete*. Aachen, S. 15–33.
- [Sch17a] Schneider, K.; Butler, M.; Mechtcherine, V. (2017): Carbon Concrete Composites C3 – nachhaltige Bindemittel und Betone für die Zukunft. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 112, S. 784–794.

- [Sch17b] Schneider, K.; Lieboldt, M.; Liebscher, M.; Fröhlich, M.; Hempel, S.; Butler, M.; Schröfl, C.; Mechtcherine, V.: Mineral-Based Coating of Plasma-Treated Carbon Fibre Rovings for Carbon Concrete Composites with Enhanced Mechanical Performance. In *materials* 2017,10, 360.
- [Sch18a] Schütze, E.; Bielak, J.; Scheerer, S.; Hegger, J.; Curbach, M.: Einaxialer Zugversuch für Carbonbeton mit textiler Bewehrung. In *Beton- und Stahlbetonbau* 113 (2018), S. 33–47.
- [Sch18b] Schneider, K.; Michel, A.; Liebscher, M.; Mechtcherine, V.: Verbundverhalten mineralisch gebundener und polymergebundener Bewehrungsstrukturen aus Carbonfasern bei Temperaturen bis 500 °C. In *Beton- und Stahlbetonbau* 113 (2018), S. 886–894.
- [Sch21] Schumann, A.; Schladitz, F.; Schöffel, J.; May, S.; Curbach, M.: Ressourceneinsparung mit Carbonbeton – Am Beispiel der Verstärkung der Hyparschale in Magdeburg. In Hauke, B. [Hrsg.] *Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Klimaschutz, Konstruktive Lösungen für das Planen und Bauen – Aktueller Stand der Technik*, Ernst & Sohn, Berlin, 2021.
- [SFB528] SFB 528: Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung. <https://tudresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb/forschung/sfb528>, Abgerufen am 29.05.2022.
- [SFB532] SFB 532: Textilbewehrter Beton - Grundlagen für die Entwicklung einer neuartigen Technologie. <https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/5483592>. Abgerufen am 29.05.2022.
- [SGL17] SGL Carbon SE: Produktdatenblatt. SIGRAFIL® C T50-4.4/255-E100, 03/2017. Abgerufen am 18.04.2019.
- [SGL22] SGL Carbon SE: <https://www.sgllcarbon.com/carbonfasern-und-cfk/>. Abgerufen am 29.05.2022.
- [Sha14] Shams, A.; Horstmann, M.; Hegger, J.: Experimental investigations on Textile-Reinforced Concrete (TRC) sandwich sections. *Composite Structures*, Volume: 118, Pages: 643-653. December 2014.
- [Sne20] Snethlage, R., Pfanner, M.: *Leitfaden Steinkonservierung – Planung von Untersuchungen und Maßnahmen zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein*, 5. Auflage, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2020.
- [Sol22] Solidian GmbH. <https://solidian.com/de/products/>. Produktdatenblätter. Abgerufen am 29.05.2022.
- [Tei22] Teijin Carbon: Produktdatenblatt. <https://www.tejincarbon.com/de/produkte/tenaxrkohlenstofffaser/tenaxr-filamentgarn>. Abgerufen am 29.05.2022.

- [Ull19] Ullrich, K.: Photogrammetrie zur Messung von Rissbreiten in Textilbeton – Untersuchungen zur Messgenauigkeit und deren Einflussfaktoren. Bachelorarbeit. TU Dortmund University. Dortmund, 2019. (nicht veröffentlicht)
- [VDZ22] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ), Hrsg.: Ressourcen der Zukunft für Zement und Beton – Potenziale und Handlungsstrategien. Düsseldorf, 2022.
- [Vos08] Voss, S.: Ingenieurmodelle zum Tragverhalten von textilbewehrtem Beton. Dissertation. RWTH Aachen University. Aachen, 2008.
- [Wei09] Weiland, S.: Interaktion von Betonstahl und textiler Bewehrung bei der Biegeverstärkung mit textilbewehrtem Beton, Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Massivbau. Dissertation. Dresden, 2009.
- [Wei13] Weiland S., Schladitz F., Schütze E., Timmers R., Curbach M., (2013): Rissinstandsetzung eines Zuckersilos – Tudalit® (Textilbeton) zur Instandsetzung. In: Bautechnik 90, Heft 8, S. 498-504.
- [Wil21] Wilhelm, K.: Verbundverhalten von mineralisch und polymer gebundenen Carbonbewehrungen und Beton bei Raumtemperatur und erhöhten Temperaturen bis 500 °C. Dissertation. TU Dresden. Dresden, 2021.
- [Wil22] Will, N.: DAfStb-Richtlinie „Betonbauteile mit Nichtmetallischer Bewehrung“ – Von Forschung und Pilotprojekten zum Regelwerk. In Beiträge zum 61. Forschungskolloquium mit 9. Jahrestagung des DAfStb, S. 157-162. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Dresden, 2022.
- [Xu07] Xu, S.; Li, H.: Bond properties and experimental methods of textile reinforced concrete. In Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed. 22 (2007), S. 529–532.
- [Zha20] Zhao, J.; Liebscher, M.; Michel, A.; Schneider, S.; Foest, R.; Fröhlich, M.; Quade, A.; Mechtcherine V.: Plasma-generated silicon oxide coatings of carbon fibres for improved bonding to mineral-based impregnation materials and concrete matrices, Cement and Concrete Composites (2020)
- [ZTV-W LB 219] ZTV-W LB 219, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen - Wasserbau (ZTV-W) für die Instandsetzung der Betonbauteile von Wasserbauwerken (Leistungsbereich 219). Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Abteilung Wasserstraßen, Schifffahrt (2017).

## 9 Anhang

### Anhang 1

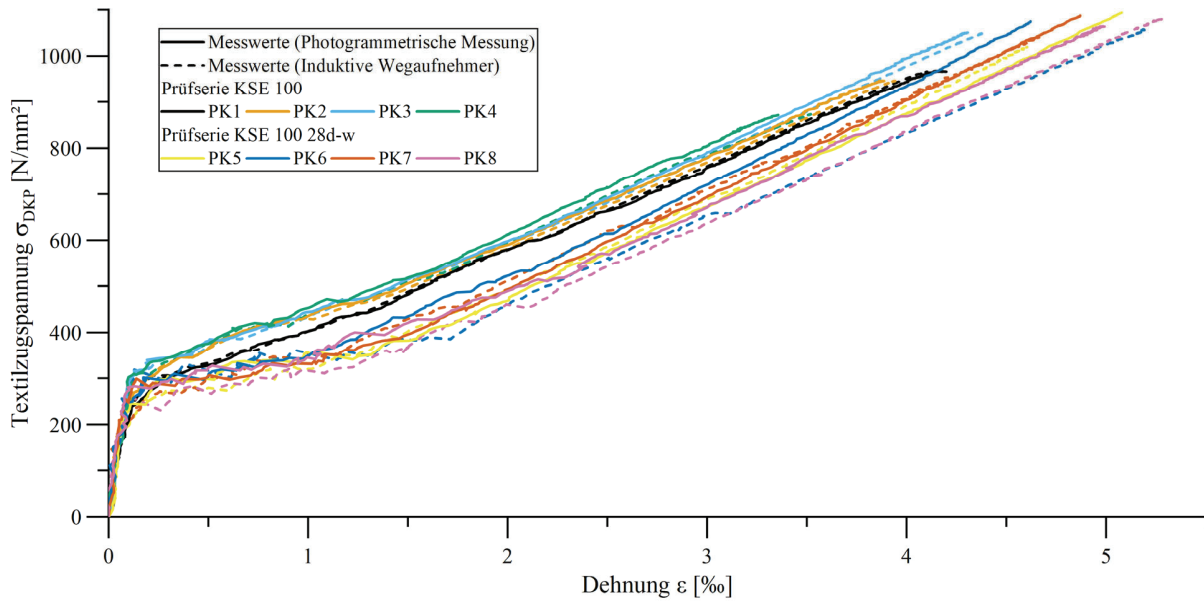


Bild A1-1: Spannungs-Dehnungslinien mit Dehnungsmessung über induktive Wegaufnehmer und photogrammetrische Messtechnik. 4 Einzelmesswerte je Prüfserie KSE 100 und KSE 100 28d-W

## Anhang 2

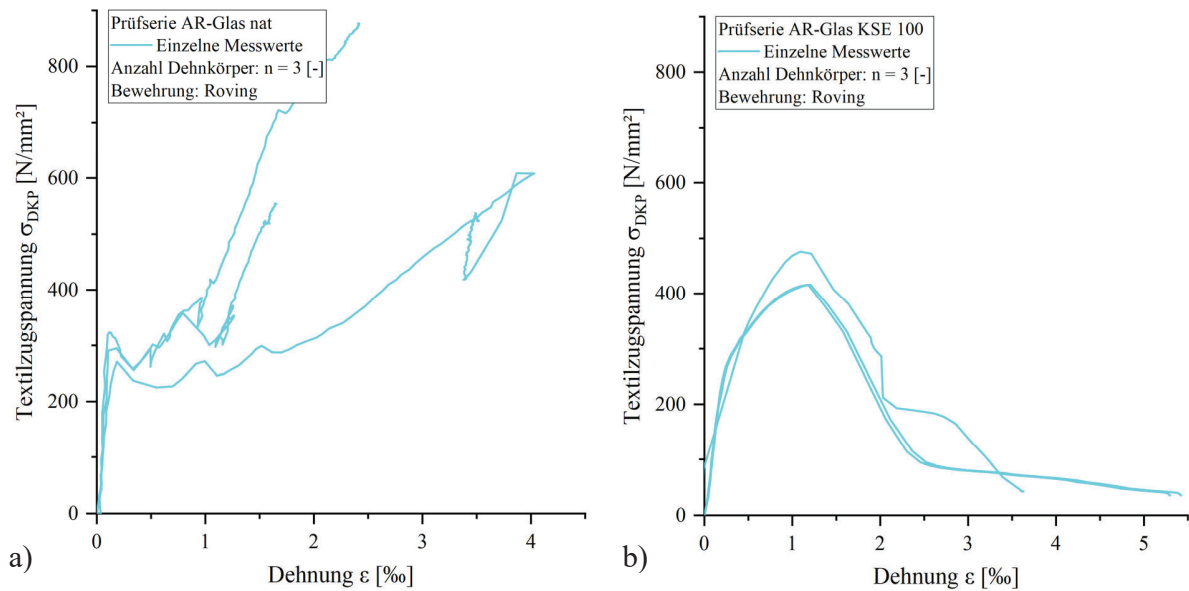


Bild A2-1: Einzelmesswerte Prüfserien mit AR-Glasrovings, a) Spannungs-Dehnungsbeziehung mit ungetränkten Rovings (AR-Glas nat), b) Spannungs-Dehnungsbeziehung mit KSE 100 getränkten Rovings (AR-Glas KSE100)

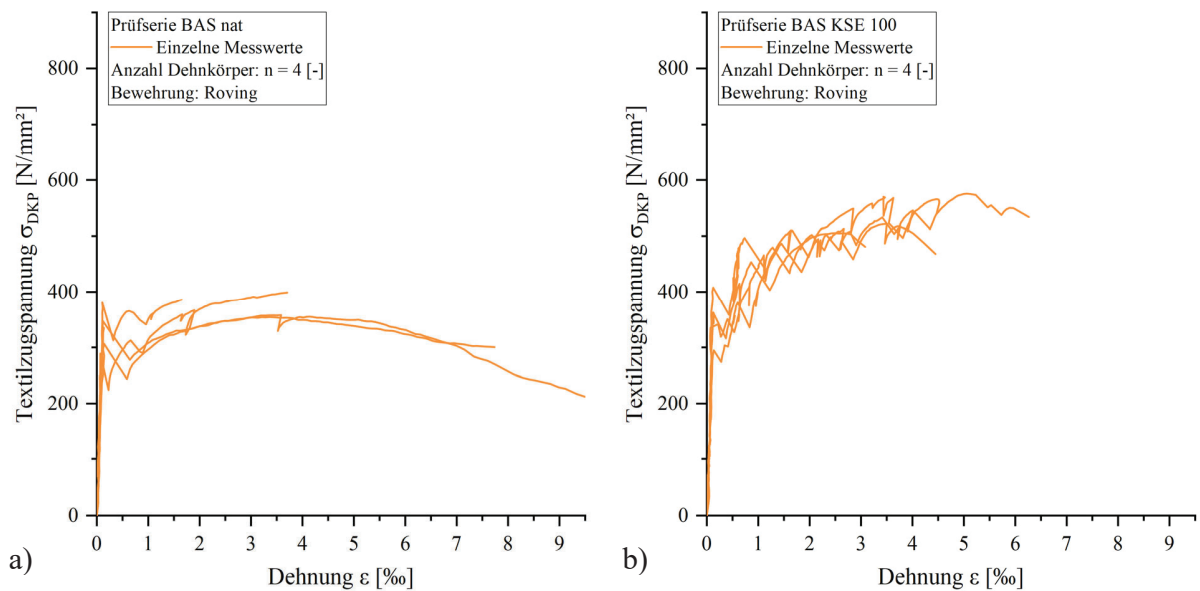


Bild A2-2: Einzelmesswerte Prüfserien mit Basaltrovings, a) Spannungs-Dehnungsbeziehung mit ungetränkten Rovings (BAS nat), b) Spannungs-Dehnungsbeziehung mit KSE 100 getränkten Rovings (BAS KSE100)

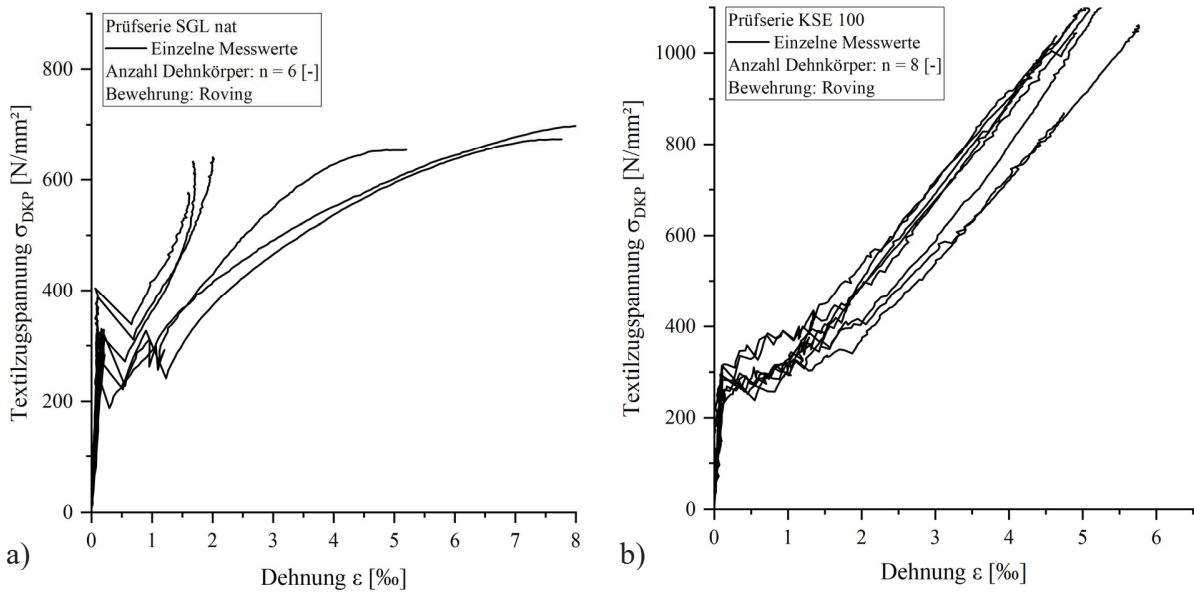


Bild A2-3: Einzelmesswerte Prüfserien mit Carbonrovings, a) Spannungs-Dehnungsbeziehung mit ungetränkten Rovings (SGL nat), b) Spannungs-Dehnungsbeziehung mit KSE 100 getränkten Rovings (KSE100)

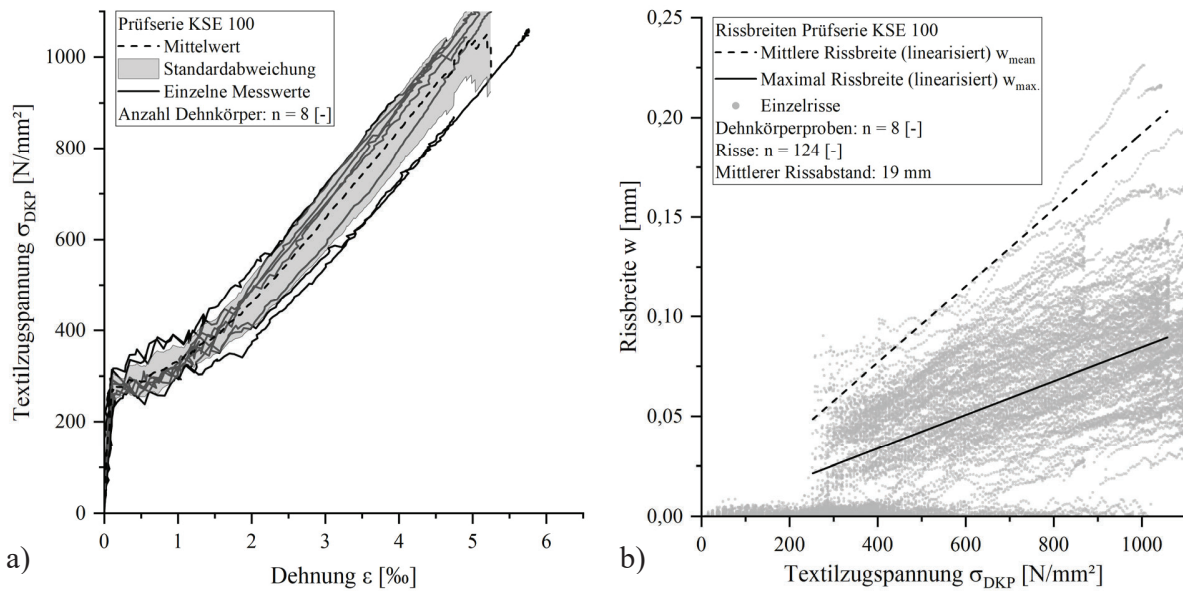


Bild A2-4: Einzelmesswerte Prüfserie KSE 100, a) Spannungs-Dehnungsbeziehung, b) Rissbreiten-Spannungsbeziehung

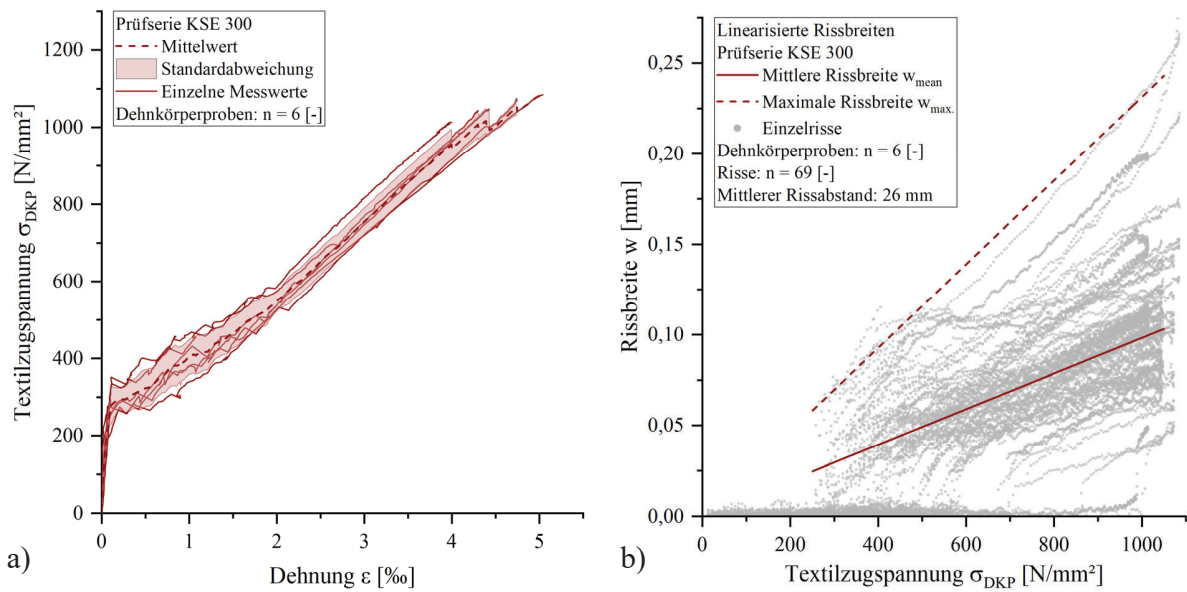


Bild A2-5: Einzelmesswerte Prüfserie KSE 300, a) Spannungs-Dehnungsbeziehung, b) Rissbreiten-Spannungsbeziehung

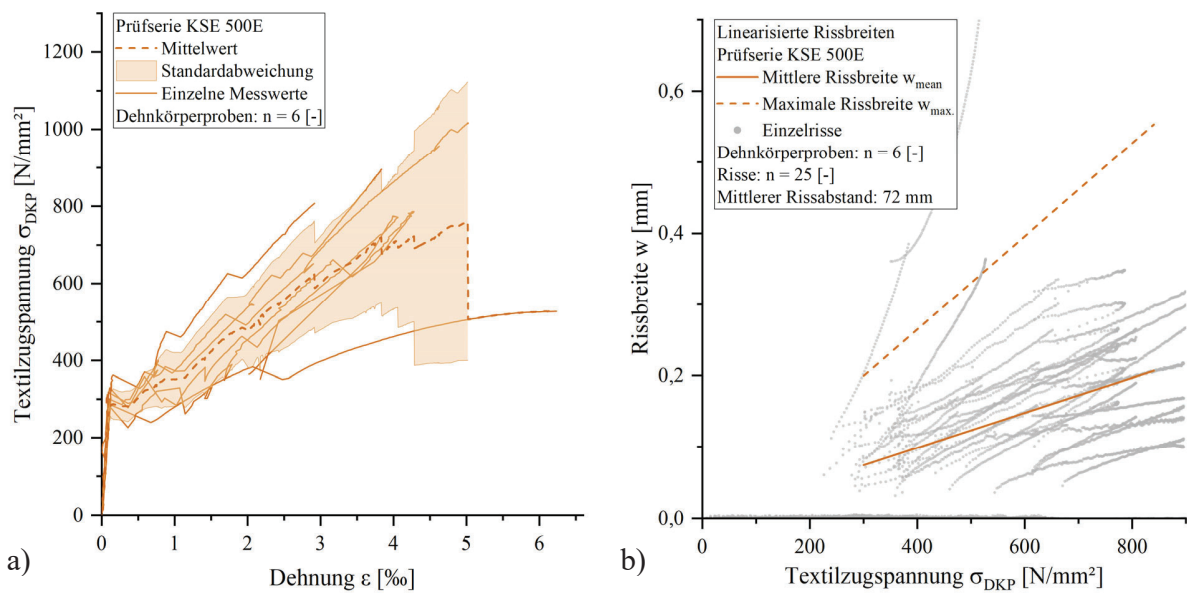


Bild A2-6: Einzelmesswerte Prüfserie KSE 500E, a) Spannungs-Dehnungsbeziehung, b) Rissbreiten-Spannungsbeziehung

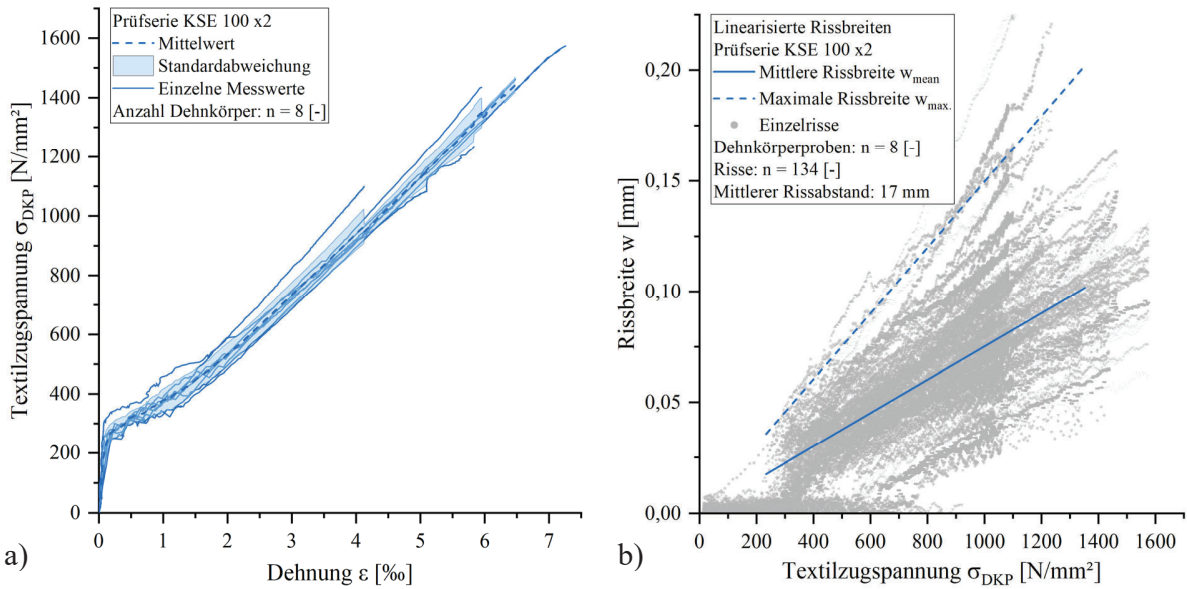


Bild A2-7: Einzelmesswerte Prüfsrie KSE 100 x2, a) Spannungs-Dehnungsbeziehung, b) Rissbreiten-Spannungsbeziehung

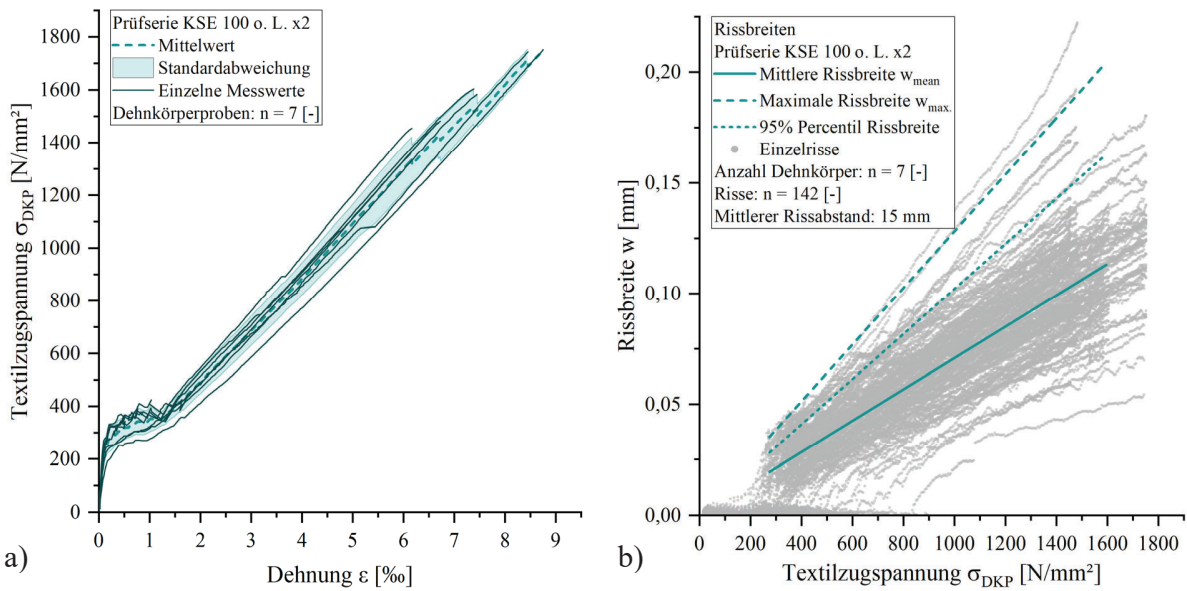


Bild A2-8: Einzelmesswerte Prüfsrie KSE 100 o. L. x2, a) Spannungs-Dehnungsbeziehung, b) Rissbreiten-Spannungsbeziehung



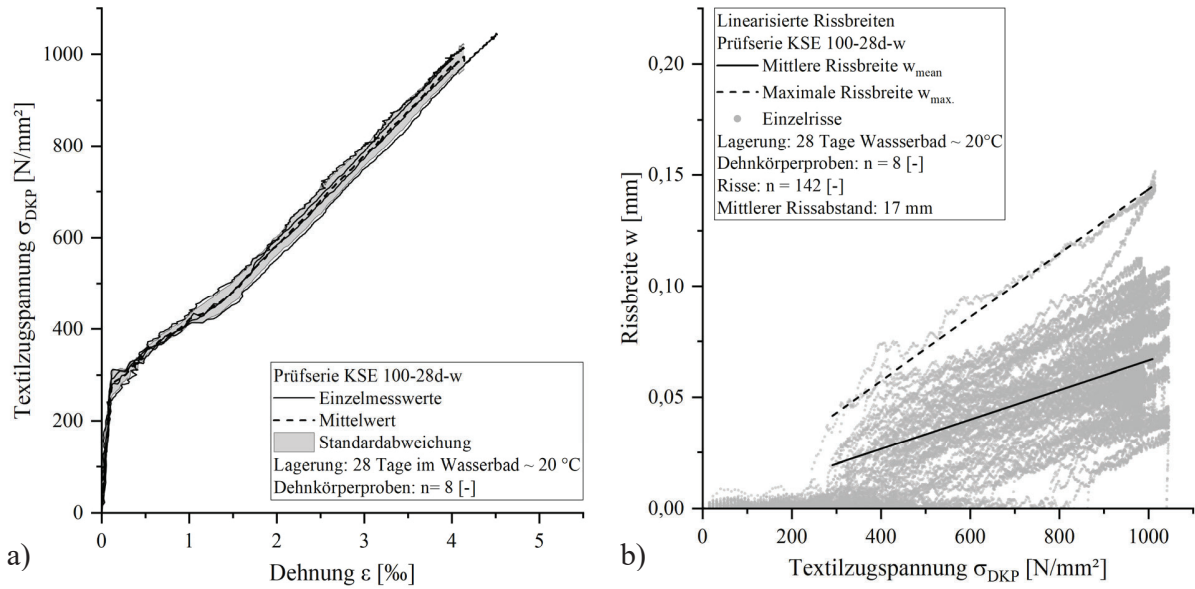


Bild A2-9: Einzelmesswerte Prüfsreihe KSE 100-28d-w, a) Spannungs-Dehnungsbeziehung, b) Rissbreiten-Spannungsbeziehung

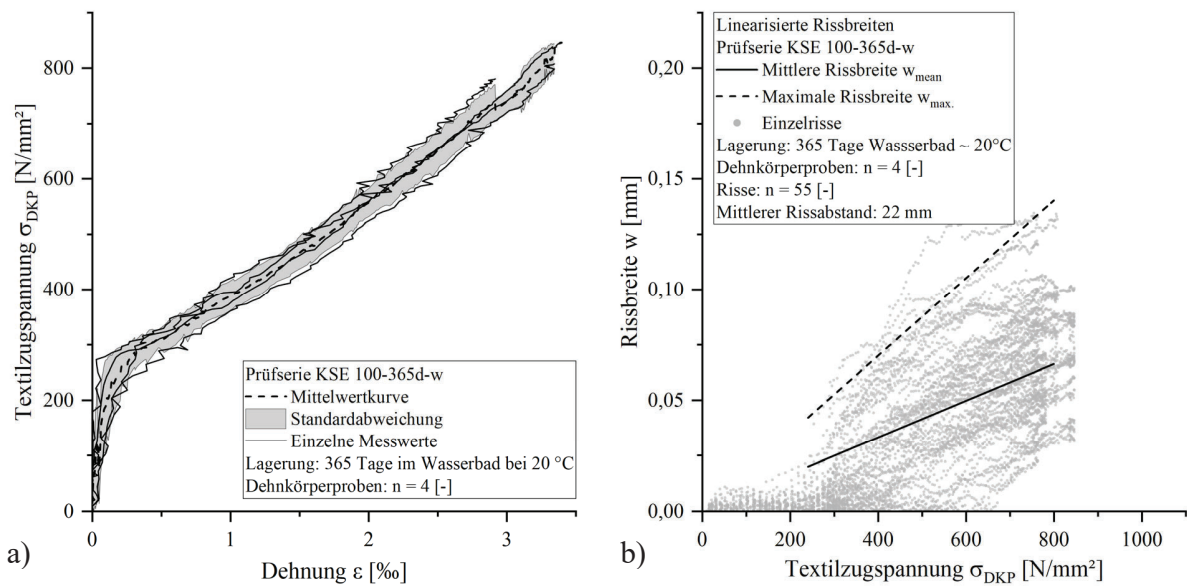


Bild A2-10: Einzelmesswerte Prüfsreihe KSE 100-365d-w, a) Spannungs-Dehnungsbeziehung, b) Rissbreiten-Spannungsbeziehung

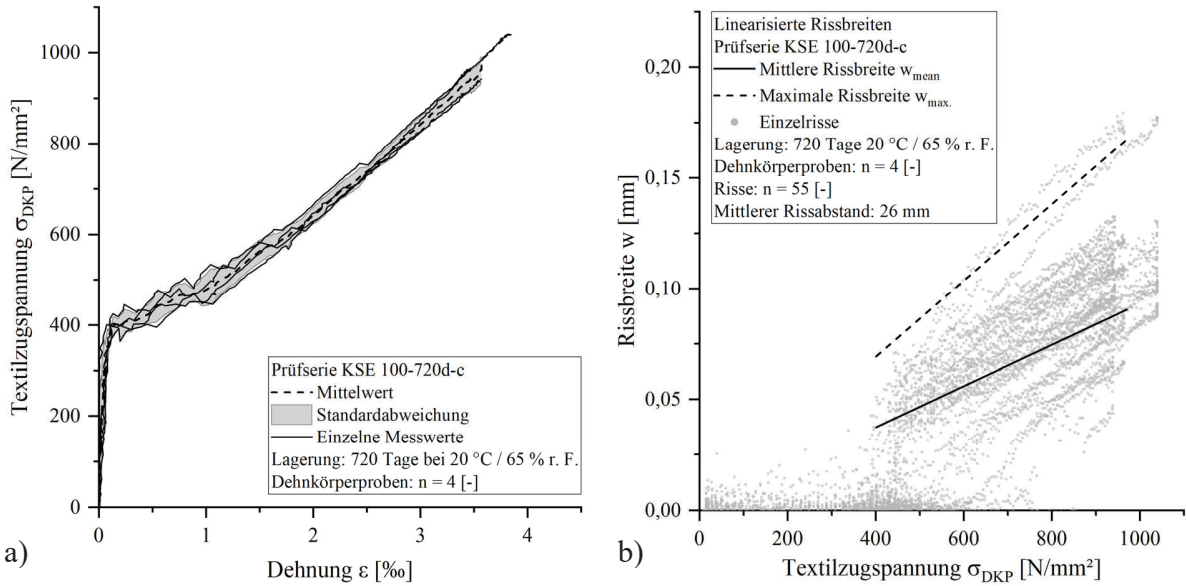


Bild A2-11: Einzelmesswerte Prüfsérie KSE 100-720d-c, a) Spannungs-Dehnungsbeziehung, b) Rissbreiten-Spannungsbeziehung

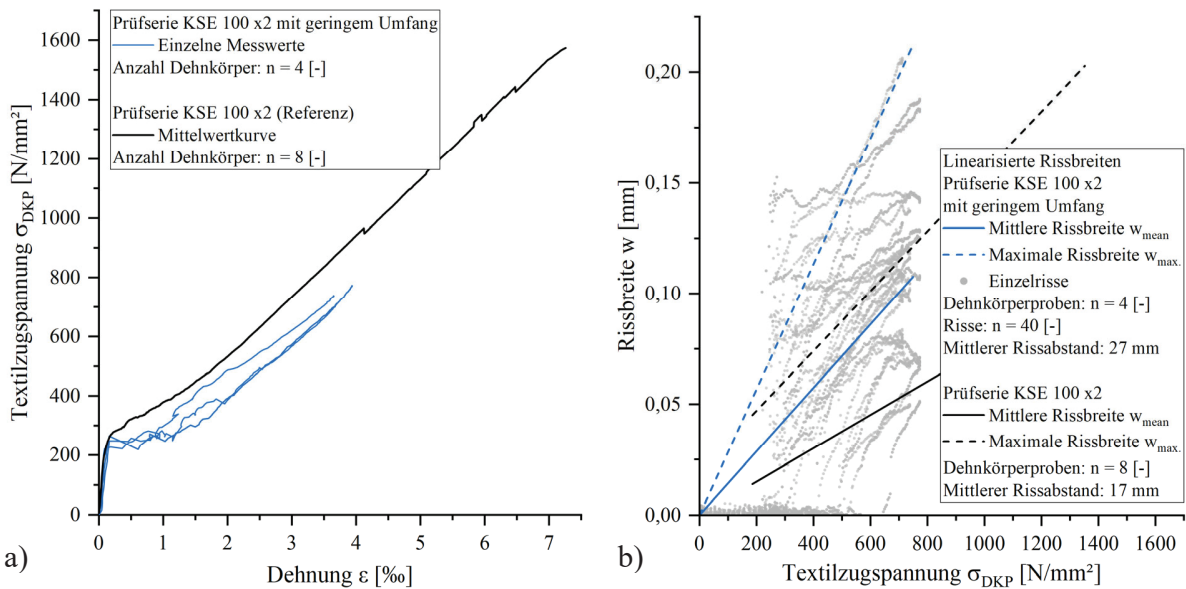


Bild A2-12: Einzelmesswerte Prüfsérie KSE 100 x2 mit geringem Rovingumfang, a) Spannungs-Dehnungsbeziehung, b) Rissbreiten-Spannungsbeziehung

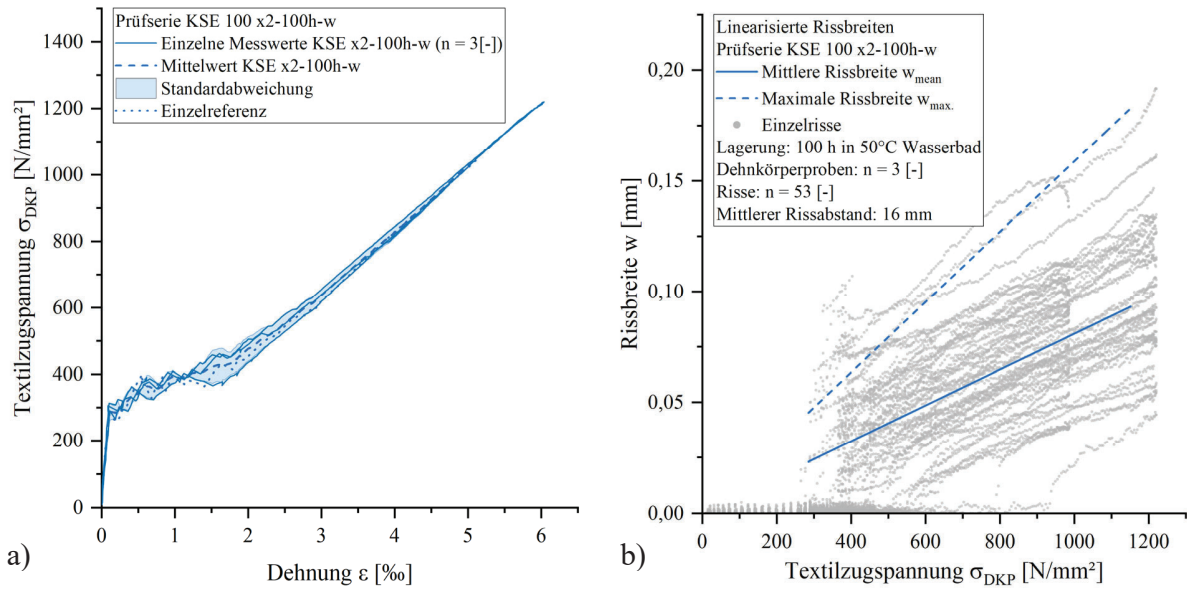


Bild A2-13: Einzelmesswerte Prüfsérie KSE 100 x2-100h-w, a) Spannungs-Dehnungsbeziehung, b) Rissbreiten-Spannungsbeziehung

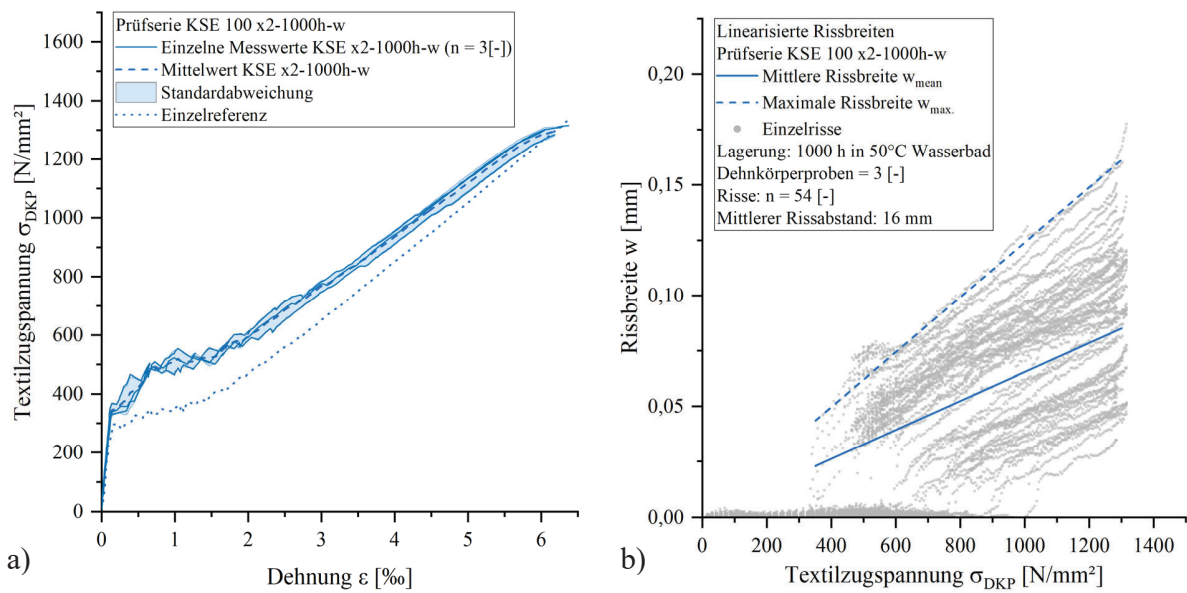


Bild A2-14: Einzelmesswerte Prüfsérie KSE 100 x2-1000h-w, a) Spannungs-Dehnungsbeziehung, b) Rissbreiten-Spannungsbeziehung

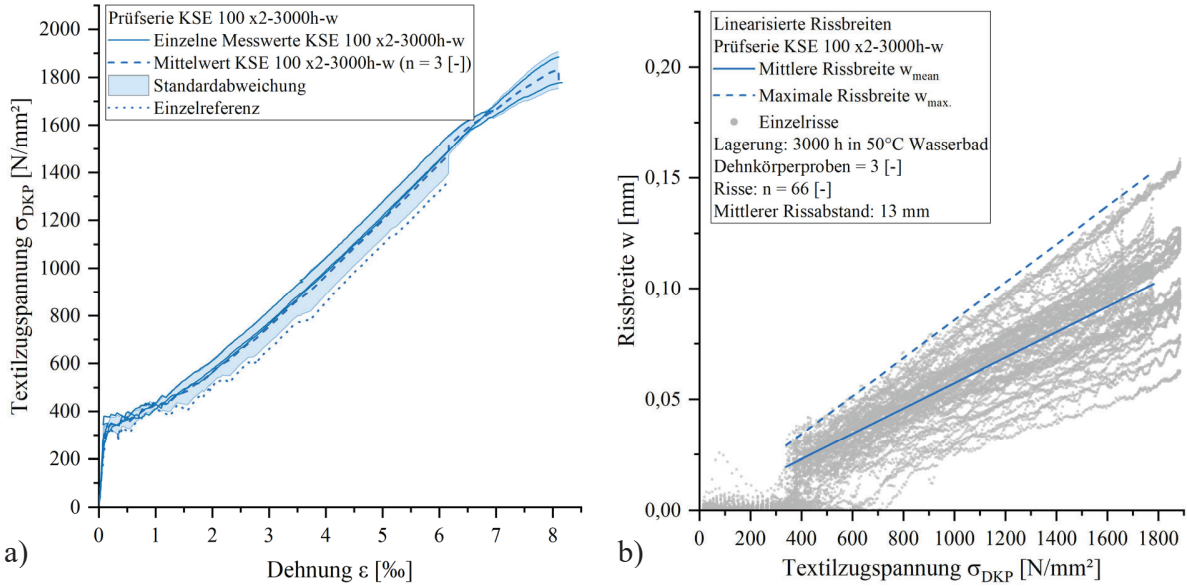


Bild A2-14: Einzelmesswerte Prüfserie KSE 100 x2-3000h-w, a) Spannungs-Dehnungsbeziehung, b) Rissbreiten-Spannungsbeziehung

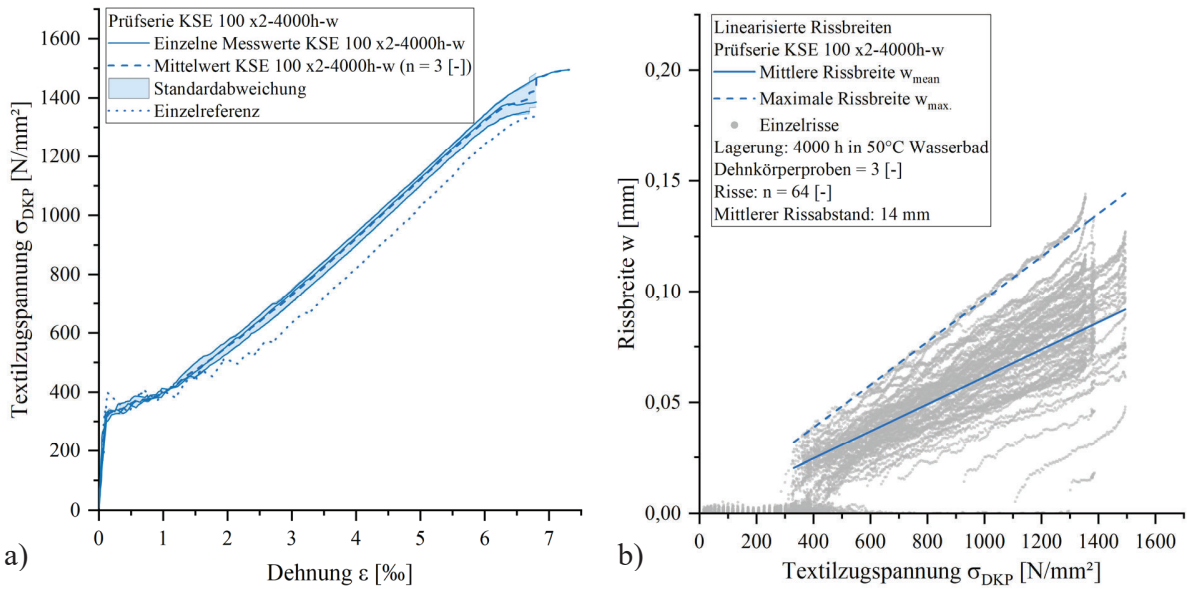


Bild A2-16: Einzelmesswerte Prüfserie KSE 100 x2-4000h-w, a) Spannungs-Dehnungsbeziehung, b) Rissbreiten-Spannungsbeziehung

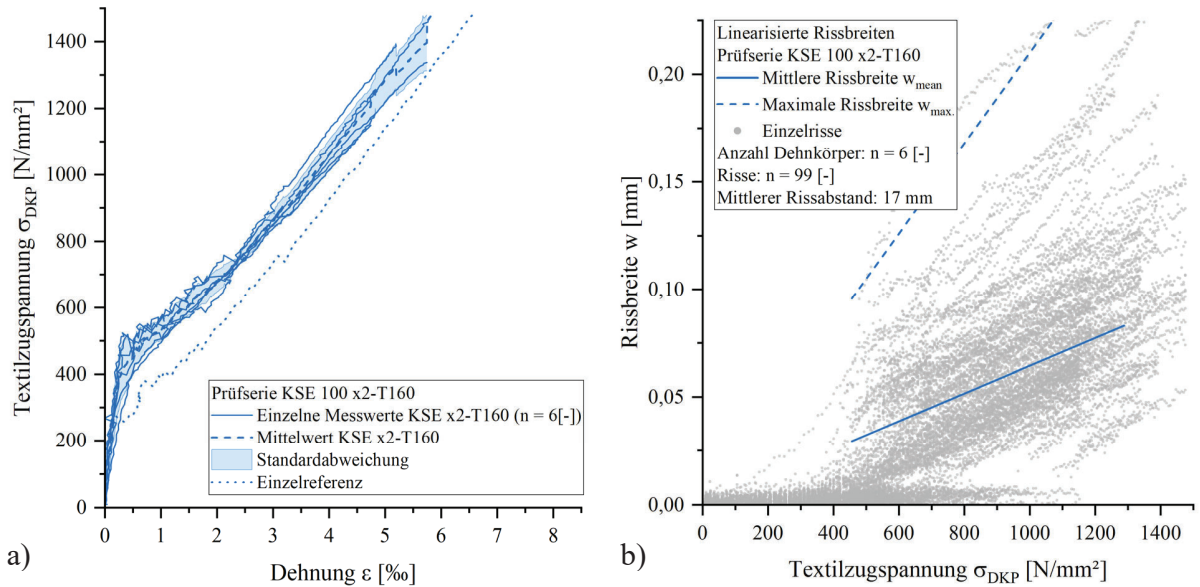


Bild A2-14: Einzelmesswerte Prüfserie KSE 100 x2-T160, a) Spannungs-Dehnungsbeziehung, b) Rissbreiten-Spannungsbeziehung

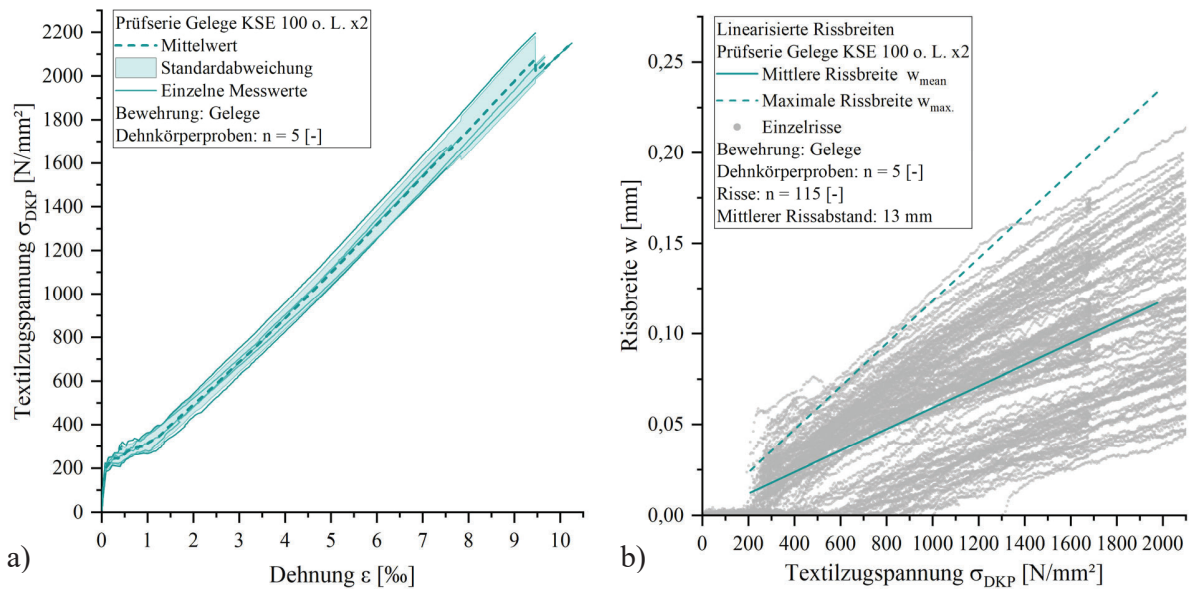


Bild A2-16: Einzelmesswerte Prüfserie Gelege KSE 100 o. L. x2, a) Spannungs-Dehnungsbeziehung, b) Rissbreiten-Spannungsbeziehung

**Anhang 3**

Bild A3-1: Bruchbild Faserstrangzugprobe – SGLnat (ungetränkt)



Bild A3-2: Bruchbild Faserstrangzugprobe – KSE 100



Bild A3-3: Bruchbild Faserstrangzugprobe – KSE 100 x2



Bild A3-4: Bruchbild Faserstrangzugprobe – KSE 300



Bild A3-5: Bruchbild Faserstrangzugprobe – KSE 500 E



Bild A3-6: Bruchbild Faserstrangzugprobe – KSE 100 o. L. x2





