Institut für Konstruktiven Ingenieurbau (IKI) der Hochschule Biberach (HBC)

Fraunhofer Institut für Holzforschung (WKI)

FABRINO GmbH & Co. KG

Untersuchung nachhaltiger Bewehrungen aus Naturfasern für Textilbetonbauteile (Laborphase)

Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt, gefördert unter dem Az 35830/01-25 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Marcus Ricker, Hochschule Biberach
Katrin Zecherle, Hochschule Biberach
Sebastian Kuhn, Hochschule Biberach
Jan Binde, Fraunhofer WKI
Christina Haxter, Fraunhofer WKI
Jana Winkelmann, Fraunhofer WKI
Leon Freitag, Fraunhofer WKI
Klaus Hörmann, FABRINO GmbH & Co. KG

Biberach, 28. März 2023

Bezugsquelle: Hochschule Biberach
Institutszentrum für Angewandte Forschung (IAF)
Karlstraße 11
88400 Biberach

Institut für Konstruktiven Ingenieurbau (IKI) der Hochschule Biberach (HBC)

Fraunhofer Institut für Holzforschung (WKI)

FABRINO GmbH & Co. KG

Untersuchung nachhaltiger Bewehrungen aus Naturfasern für Textilbetonbauteile (Laborphase)

Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt, gefördert unter dem Az 35830/01-25
von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Marcus Ricker, Hochschule Biberach
Katrin Zecherle, Hochschule Biberach
Sebastian Kuhn, Hochschule Biberach
Jan Binde, Fraunhofer WKI
Christina Haxter, Fraunhofer WKI
Jana Winkelmann, Fraunhofer WKI
Leon Freitag, Fraunhofer WKI
Klaus Hörmann, FABRINO GmbH & Co. KG

Biberach, 28. März 2023

06/02

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Az 35830/01-25	Referat 04	Fördersumme **199.535 €**

Antragstitel	**Untersuchung nachhaltiger Bewehrungen aus Naturfasern für Textilbetonbauteile (Laborphase)**
Stichworte	Massivbau, Faserverbundwerkstoff, Betonbau, nachwachsende Rohstoffe, CO_2-Bilanz

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
25 Monate	09.12.2020	31.12.2022	Laborphase
Zwischenberichte	Zwischenbericht 1 vom 03.08.2021	Zwischenbericht 2 vom 31.01.2022	Zwischenbericht 3 vom 31.07.2022

Bewilligungsempfänger	Hochschule Biberach, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau (IKI) Karlstraße 11 88400 Biberach an der Riß	Tel +49 7351 582-225 Fax +49 7351 582-119 Projektleitung Prof. Dr.-Ing. M. Ricker Bearbeiter Katrin Zecherle, M.Eng. Sebastian Kuhn, M.Eng.
Kooperationspartner	Fraunhofer Institut für Holzforschung (WKI), FABRINO GmbH & Co. KG	

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

In den letzten Jahren haben das wachsende ökologische, soziale und wirtschaftliche Bewusstsein und die Absicht, den CO2-Ausstoß zu verringern, die Bedeutung des nachhaltigen Wirtschaftens hervorgehoben und die Suche nach umweltverträglichen Materialien intensiviert. Das Ziel dieses Forschungsvorhabens war es deshalb, erstmals Textilien aus Naturfasern hinsichtlich ihrer Eignung als lastabtragende Bewehrung in Betonbauteilen systematisch zu analysieren und zu bewerten. Es sollte ein Bewehrungstextil entwickelt werden, dass die Zugfestigkeit eines Betonbauteils signifikant steigert, einen guten Verbund zur Betonmatrix erreicht und mit möglichst geringem Aufwand produziert werden kann. Die genannten Eigenschaften wurden anhand umfassender experimenteller Untersuchungen überprüft. Die neuartige Bewehrung soll bei ähnlichen mechanischen Eigenschaften wie Betonstahl oder Glasfasertextilien ressourcenschonender sowie einfach in eine effektive Kreislaufwirtschaft einzubinden sein und insbesondere über den gesamten Lebenszyklus einen geringen CO_2-Ausstoß aufweisen.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Zunächst war die Frage zu klären, wie die Flachsfasergarne beschaffen sein oder modifiziert werden müssen, um eine hohe Zugfestigkeit und einen guten Verbund zur Betonmatrix zu erreichen sowie zu einem Textil weiterverarbeitbar zu sein. Um die Verbundeigenschaften zu verbessern und eine Verrottung der Naturfasern im alkalischen Beton zu vermeiden, wurde ein Teil der aus den Flachsgarnen hergestellten Textilien mit einer biobasierten Tränkung versehen. Zur Untersuchung des Tragverhaltens wurden Dehnkörper- und 4-Punkt-Biegeversuche durchgeführt. Der Versuchsaufbau orientierte sich dabei an den Untersuchungen, die im Rahmen der beiden Sonderforschungsbereiche in Aachen und Dresden für Textilien aus Synthesefasern durchgeführt wurden. Die Versuchsaufbauten waren zunächst für die Textilien aus Naturfasern anzupassen. Mit Dehnkörperversuchen wurde überprüft, ob sich bei einer textilen Bewehrung aus Naturfasern ebenfalls verschiedene Phasen der Rissbildung (ungerissen, Erstrissbildung und abgeschlossenes Rissbild) beobachten lassen und ob das Rissbild durch eine Tränkung der Textilien positiv beeinflusst werden kann. Zusätzlich wurde der Effekt weiterer Einflussparameter auf das Zugtragverhalten untersucht. Zu nennen sind z.B. die Bindungsart des Textils, der Bewehrungsgehalt und die Orientierung des Textils (Kett- oder Schussrichtung). Außerdem wurde im Rahmen des Projekts eine vom WKI entwickelte, neuartige Fasertränkung untersucht, die ein späteres vollständiges Herauslösen der Fasern aus der Betonmatrix ermöglicht.
Im Hinblick auf eine praktische Anwendung wurde ein erstes Modell zur Beschreibung des Zugtragverhaltens des neuen nachhaltigen Textilbetons mit einer Bewehrung aus Naturfasern entwickelt. Um die grundsätzliche Anwendbarkeit des neuen Baustoffs zu zeigen, wurde eine kleinformatige Fassadenplatte als Demonstrator hergestellt. Weiterhin wurde im Rahmen eines Probeeinbaus ein Teil der notwendigen Randbewehrung eines Industriefußbodens als textile Bewehrung aus Naturfasern ausgeführt.

Ergebnisse und Diskussion

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde ein Gewebe aus Flachsfasern entwickelt, das als Bewehrung in Betonbauteilen verwendet werden kann. Die Drehergewebe wurden mit einer z.T. biobasierten Tränkung beschichtet, wodurch neben der Formstabilität zur Verbesserung der Handhabbarkeit des Gewebes auch die Zugfestigkeiten der Garne erhöht werden konnten. Ein Thema zukünftiger Arbeiten könnte die Herstellung von getränkten Naturfaserbewehrungen mit komplexeren Geometrien sein.

Es konnte die grundsätzliche Eignung der mit einer biobasierten Tränkung versehenen, nachwachsenden Flachsfasertextilien als Bewehrung gezeigt werden. Neben einer Laststeigerung gegenüber unbewehrten oder unterbewehrten Dehnkörpern konnten die für bewehrte Betonkörper typischen Rissbildungszustände beobachtet werden: ungerissener Querschnitt (Zustand I), Phase der Erstrissbildung (Zustand IIa) sowie Phase des abgeschlossenen Rissbildes (Zustand IIb). Die klare Abgrenzung der einzelnen Bereiche sowie das sichere Erreichen des Zustands IIb war bei kleinen Schussfadenabständen bzw. höheren geometrischen Bewehrungsgraden erkennbar. Im Zustand IIb war jedoch ein Steifigkeitsdefizit zu beobachten, was auf einen Abbau der Verbundspannungen infolge der Querkontraktion der auf Zug beanspruchten getränkten Garne zurückgeführt wurde. Die Rissbilder der Dehnkörper waren bei ausreichend großem Bewehrungsgrad fein verteilt. Weiterhin konnte ein erstes Modell zur Beschreibung des Zugtragverhaltens des neuen Textilbetons mit einer Bewehrung aus Naturfasern entwickelt werden. Die grundsätzliche Anwendbarkeit des neuen Baustoffs konnte durch den Bau einer kleinformatigen Fassadenplatte als Demonstrator und durch einen Probeeinbau in einem Industriefußboden als Randbewehrung gezeigt werden. Weiterhin konnte durch erste Untersuchungen belegt werden, dass der Einsatz einer neuartigen schaltbaren Beschichtung zur Verbesserung der Recyclingfähigkeit des Verbunds nach der Nutzungsphase zielführend erscheint. Um dies jedoch im Detail zu untersuchen, sind deutlich weitreichendere und umfangreichere Untersuchungen notwendig.

Weitere Fragestellungen sind beispielsweise die Entwicklung eines validen Modells zur Ermittlung des Biegewiderstands oder die Untersuchung des Querkrafttragverhalten. Für eine praktische Anwendung als Bewehrung ist es außerdem zwingend erforderlich, die Dauerhaftigkeit und die Dauerstandfestigkeit des neuartigen Verbundwerkstoffes näher zu untersuchen. Um die CO_2-Emissionen des neuen Verbundwerkstoffs weiter zu verringern, könnte der konventionelle Zement in der Betonmatrix durch ein klimafreundliches hydraulisches Bindemittel ersetzt werden.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Insgesamt wurden bisher zwei Artikel in Fachzeitschriften veröffentlicht: Ricker, M.; Zecherle, K.; Binde, J.; Haxter, C.; Winkelmann, J.: Zugtragverhalten von Betonbauteilen mit Textilbewehrung aus Naturfasern. In: BFT International 08-2022; Zecherle, K.; Ricker, M.; Binde, J.; Winkelmann, J.; Haxter, C.: Zugtragverhalten von Betonbauteilen mit getränkter Textilbewehrung aus Flachsfasern. Beton- und Stahlbetonbau 118 (2023), S. 25–35. Zwei weitere Artikel für englischsprachigen Fachzeitschriften sind zurzeit in Vorbereitung. Zudem veröffentlichte das Fraunhofer WKI am 15.03.2023 einen Presseartikel über das Forschungsprojekt mit dem Titel „Nachhaltige Naturfaserbewehrung für Textilbetonbauteile“. Das Projekt wurde auf verschiedenen nationalen und internationalen Konferenzen vorgestellt: 15. Forschungsforum der österreichischen Fachhochschulen, 20.-21.04.2022, Villach (AUT); 35. Hofer Vliesstofftage (Workshop „HighTex mit Fraunhofer“), 21.09.-22.09.2022, Hof; 36. Seminar Schalung & Rüstung der Akademie der Hochschule Biberach, 11.-12.10.2022, Biberach; 4th International Congress on Materials & Structural Stability CMSS23, 08.-10.03.2023, Rabat (MAR); *fib* Symposium, 05.-07.06.2023, Istanbul (TUR).

Fazit

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts konnten Textilien aus beschichteten Flachsfasern entwickelt werden und deren grundsätzliche Eignung als Bewehrung für Betonbauteile gezeigt werden. Neben einer Laststeigerung konnten die für bewehrte Betonkörper typischen Rissbildungszustände und ein fein verteiltes Rissbild beobachtet werden. Es ist zudem gelungen, ein erstes Modell zur Beschreibung des Zugtragverhaltens abzuleiten. Diese Untersuchungen, die als Demonstrator hergestellte Fassadenplatte sowie ein Probeeinbau als Randbewehrung eines Industriefußbodens belegen das hohe Potenzial der neu entwickelten Naturfasertextilien als nachwachsende Bewehrung für Betonbauteile. Durch den Einsatz textiler Faserbewehrung anstelle konventioneller Stahlbewehrung kann die konstruktiv erforderliche Betondeckung reduziert werden. Somit ergeben sich geringere erforderliche Bauteildicken und leichtere Bauteile, wodurch die CO_2-Emissionen verringert werden können. Der Einfluss der Ressourcenknappheit, der z.B. bei dem Einsatz von gängigen Chemiefasern (Glas und Carbon) eine große Rolle spielt, ist bei der Verwendung von Naturfasern vernachlässigbar. Zudem können Herstellkosten (geringerer Energieaufwand) eingespart und die damit einhergehende CO_2-Bilanz verbessert werden. Der CO_2-Fußabdruck kann noch weiter verringert werden, wenn die textile Bewehrung aus Flachsfasern mit einem klimafreundlicheren Beton kombiniert wird, bei dem der Zement durch ein hydraulisches Bindemittel ersetzt wird, bei dessen Herstellung weniger Energie benötigt und weniger Prozess-CO_2 emittiert wird. Sicherlich sind noch weitere Untersuchungen zum Tragverhalten und insbesondere zur Dauerhaftigkeit für eine zukünftige praktische Anwendung erforderlich.

I Inhaltsverzeichnis

I Inhaltsverzeichnis 7
II Abbildungsverzeichnis 9
III Tabellenverzeichnis 11
IV Formelzeichen-, Index- und Abkürzungsverzeichnis 11
V Zusammenfassung 12
VI Einleitung 13
1 Festlegung der zu untersuchenden Materialien – AP 1 15
1.1 Literaturrecherche 15
1.2 Definition der Anforderungen an die Materialien (Gewebe und Beton) 16
1.3 Festlegung der zu untersuchenden Einflussfaktoren 17
1.4 Festlegung der zu untersuchenden Tränkungen 17
1.5 Wahl einer geeigneten Betonrezeptur 18
1.6 Aufstellen einer Versuchsmatrix 20
2 Herstellung der Gewebe – AP 2 20
2.1 Garnzugversuche 20
2.2 Herstellung der verschiedenen Gewebe und Tränkung der ausgewählten Textilien 22
2.3 Untersuchung der mechanischen Eigenschaften der Textilien (Zugfestigkeit und E-Modul) 23
3 Experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten – AP 3 24
3.1 Planung der Zugversuche (Entwicklung des Versuchsstandes, Erstellung von Schal-, Bewehrungs- und Messtechnikplänen) 24
3.2 Aufbau des Zugversuchsstandes 27
3.3 Herstellen der Dehnkörper (inkl. Lagerung) 27
3.4 Durchführung der Zugversuche 28
3.5 Auswertung der Zugversuche 28
3.6 Diskussion und Rückspiegelung der Ergebnisse der Dehnkörperversuche und ggf. Anpassung der Gewebe 34
3.7 Planung der Biegeversuche (Entwicklung des Versuchsstandes, Erstellung von Schal-, Bewehrungs- und Messtechnikplänen) 34
3.8 Aufbau des Biegeversuchsstandes 35
3.9 Herstellen der Prüfkörper (inkl. Lagerung) 36
3.10 Durchführung der Biegeversuche 37
3.11 Auswertung der Biegeversuche und ggf. Anpassung der Gewebe 37
3.12 Diskussion und Rückspiegelung der Ergebnisse der Biegeversuche 41
3.13 Ergänzende Arbeiten zum AP 3: Ringversuche 41
3.14 Ergänzende Arbeiten zum AP 3: CT-Untersuchungen 43
4 Entwicklung erster Modelle zum Tragverhalten – AP 4 44
4.1 Entwicklung eines Bemessungsmodells auf Grundlage der bekannten Modelle für einaxiale Zugbeanspruchung 44

4.2 Vergleich der Rechenergebnisse mit Dehnkörperversuchen zur Evaluierung des Modells für die Zugtragfähigkeit ... 46
4.3 Eventuelle Anpassung der Bemessungsmodelle ... 48
5 Recycling – AP 5 ... 49
5.1 Herstellung des Textils und anschließende Beschichtung ... 49
5.2 Herstellung eines Betonprismas (inkl. Aushärtung) ... 50
5.3 Aktivierung des Triggers, Brechen des Prismas, Trennung der einzelnen Komponenten und abschließende Dokumentation ... 51
6 Bau des Demonstrators und Probeeinbau Randbewehrung – AP 6 ... 53
6.1 Definition der Anforderungen an das Fassadenelement und die Randbewehrung für den Industriefußboden ... 53
6.2 Herstellung der Gewebe mit den erforderlichen Abmessungen ... 53
6.3 Herstellung des Fassadenplatten-Demonstrators ... 54
6.4 Einbau der Randbewehrung aus Naturfasern ... 55
VII Fazit ... 57
VIII Eigene Veröffentlichungen ... 59
IX Literaturverzeichnis ... 59
Anhang A Versuchsmatrizen ... A-1
Anhang B Wahl einer geeigneten Betonrezeptur ... B-1
Anhang C Herstellung der Gewebe ... C-1
Anhang D Dehnkörperversuche ... D-1
D.1 Versuchsaufbau ... D-1
D.2 Unbewehrte Referenzdehnkörper ($A_t = 0\,mm^2$) ... D-1
D.3 Ergebnisübersicht ... D-3
D.4 Ergebnisse Bewehrte Dehnkörper ... D-6
Anhang E Biegeversuche ... E-1
E.1 Herstellung der Versuchskörper ... E-1
E.2 Unbewehrte Referenzplattenstreifen ($A_t = 0\,mm^2$) ... E-1
E.3 Ergebnisübersicht ... E-2
E.4 Ergebnisse Bewehrte Plattenstreifen ... E-3
Anhang F Optisches Messsystem zur Rissdetektion ... F-1
Anhang G CT-Scans ... G-3
Anhang H Kalibrierung erster Modelle ... H-1
Anhang I Demonstratorbau ... I-1
I.1 Fassadenplatte ... I-1
I.2 Industriefußboden ... I-3
Anhang J Technische Datenblätter ... J-1
J.1 SICOMIN GreenPoxy 56 ... J-1

II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ermittelte Höchstzugkraft und feinheitsbezogene Festigkeit der unbeschichteten Garne je untersuchter Feinheit....21
Abbildung 2: Ermittelte Höchstzugkraft und feinheitsbezogene Festigkeit der beschichteten Garne je untersuchter Feinheit....21
Abbildung 3: Ermittelte Höchstzugkraft und feinheitsbezogene Festigkeit der beschichteten Garne je untersuchter Feinheit, modifizierter Versuchsaufbau. 22
Abbildung 4: (a) Exemplarische Darstellung eines Drehergewebes (Dreher- (orangener Faden) und Stehfaden (gelber Faden) in Kettrichtung) und (b) Beschichtung der Gewebe. 23
Abbildung 5: Draufsicht und Ansicht der Dehnkörper in (cm). 25
Abbildung 6: Auf Lochbleche geklebtes, ungetränktes Textil. 26
Abbildung 7: Spannvorrichtung zum Straffen der textilen Bewehrung vor der Betonage. 26
Abbildung 8: Aufbau des Zugversuchsstands. 27
Abbildung 9: Kraft-Weg-Diagramme der Dehnkörper mit ungetränkten Textilien (8 mm Schussfadenabstand, 10 mm Kettfadenabstand, 1000 bis 1500 tex Feinheit der Schussfäden) mit 2 bzw. 3 Bewehrungslagen. 29
Abbildung 10: Kraft-Weg-Diagramme der Dehnkörper mit ungetränkten Textilien (15 mm Schussfadenabstand, 10 mm (a) bzw. 15 mm (b) Kettfadenabstand, 1500 tex Feinheit der Schussfäden) mit 3 Bewehrungslagen. 31
Abbildung 11: Kraft-Weg-Diagramme der Dehnkörper mit getränkten Textilien (8 mm Schussfadenabstand, 10 mm Kettfadenabstand, 1000 bis 1500 tex Feinheit der Schussfäden) mit 2 bzw. 3 Bewehrungslagen. 32
Abbildung 12: Kraft-Weg-Diagramme der Dehnkörper mit getränkten Textilien (15 mm Schussfadenabstand, 10 mm (a) bzw. 15 mm (b) Kettfadenabstand, 1500 tex Feinheit der Schussfäden) mit 3 Bewehrungslagen. 33
Abbildung 13: Draufsicht und Ansicht der Biegekörperschalung in (cm), M1:5. 35
Abbildung 14: Schematischer Versuchsaufbau der 4-Punkt-Biegeversuche. 36
Abbildung 15: Befestigung des horizontalen Wegaufnehmers an der Plattenunterseite. 36
Abbildung 16: Aufbau des 4-Punkt-Biegeversuchstands vor der Prüfung. 37
Abbildung 17: Moment-Verformungs-Diagramme von Biegeversuchen mit Erreichen des Zustandes IIb (abgeschlossenes Rissbild) bei einem Bewehrungsgrad von 21,43 mm² (a) und 25,71 mm² (b). 38
Abbildung 18: Spannungs-Dehnungs-Diagramme von Biegeversuchen mit gleichen Bewehrungsquerschnitten bei zweilagigem (a) und dreilagigem (b) Textilbewehrungseinbau. 38
Abbildung 19: Moment-Verformungs-Diagramme von Biegeversuchen mit gleichen Bewehrungsquerschnitten bei 1000 tex (a) und 1500 tex (b) Schussfadenfeinheit sowie die dazugehörigen Spannungs-Dehnungs-Diagramme mit 1000 tex (c) und 1500 tex (d) Schussfadenfeinheit. 39
Abbildung 20: Moment-Verformungs-Diagramme von Biegeversuchen mit gleichen Bewehrungsquerschnitten bei 10 mm (a) und 15 mm (b) Kettfadenabstand sowie die dazugehörigen Spannungs-Dehnungs-Diagramme mit 10 mm (c) und 15 mm (d) Kettfadenabstand. 40
Abbildung 21: Versuchsmatrix der Ring-Zugversuche (IAM, WKI und HBC). 42
Abbildung 22: CT-Scan senkrecht zur Belastungsrichtung; Gesamtansicht und vergrößerter Ausschnitt. 44
Abbildung 23: Qualitative Spannungs-Dehnungslinie eines Verbundwerkstoffes unter einaxialer Zugbeanspruchung nach dem ACK-Modell [48] (a), nach JESSE [11] (b), nach VOSS [14] (c) und nach KULAS [12] (d). 45
Abbildung 24: Vergleich der Modellberechnungen mit idealisierten Ergebnissen der Dehnkörperversuche mit getränkten Textilien (8 mm Schussfadenabstand, 10 mm Kettfadenabstand, 1200 und 1500 tex Feinheit der Schussfäden) mit 2 bzw. 3 Bewehrungslagen. 46
Abbildung 25: Angepasste Modellberechnungen für die Dehnkörperversuche mit getränkten Textilien (8 mm Schussfadenabstand, 10 mm Kettfadenabstand, 1200 und 1500 tex Feinheit der Schussfäden) mit 2 bzw. 3 Bewehrungslagen. 47
Abbildung 26: Schema: Prinzip der reversiblen Vernetzung, ©Fraunhofer WKI, Dr. Steven Eschig. 49
Abbildung 27: Normprismaform 40 x 40 x 160 mm³, © Fraunhofer WKI, Christian Reck. 50
Abbildung 28: Probekörper vor Erwärmen auf 120°C (a) und nach Erwärmen im Ofen für ca. 14 h (b), © Fraunhofer WKI, Steven Eschig. 51
Abbildung 29: Probekörper mit unbeschichtetem Gewebe nach thermischer und mechanischer Behandlung (a) und Probekörper mit beschichtetem Gewebe nach derselben Behandlung (b), © Fraunhofer WKI, Steven Eschig. 52
Abbildung 30: Betonmatrix nach Entfernen der unbeschichteten Zwirne (a) und der beschichteten Naturfaserzwirne (b), © Fraunhofer WKI, Steven Eschig. 52
Abbildung 31: Gegenüberstellung der Probekörper mit unbeschichtetem (oben) und beschichtetem (unten) Gewebe nach thermischer und mechanischer Behandlung, © Fraunhofer WKI, Christina Haxter. 53

Abbildung 32: Bewehrungsskizze der Fassadenplatte in Längsrichtung (Schussfaden parallel zu eingezeichneter Spannrichtung) (a); Textile Bewehrungslagen in Längsrichtung (b). 54
Abbildung 33: Erhärtete Fassadenplatte: Fehlstellen am Rand (a), Sichtseite der Platte (b). 55
Abbildung 34: Fixierungspunkt mit Flachsfasergarn (a) und vorbereitete beschichtete Textilbewehrung für den Randeinbau (b). 56
Abbildung 35: Eingelegte Textilbewehrung (a), Textilbewehrung vor dem Einbringen der letzten Betonlage (b). 56
Abbildung A-1: Versuchsmatrix Dehnkörperversuche. A-1
Abbildung A-2: Versuchsmatrix Biegeversuche. A-2
Abbildung C-1: Probenhalter für Garnzugversuche. C-1
Abbildung C-2: Beschichtung der Gewebe. C-1
Abbildung D-1: Kardangelenke für zwängungsfreie Lasteinleitung bei den Dehnkörperversuchen. D-1
Abbildung D-2: Kraft-Weg-Diagramme der unbewehrten Referenzdehnkörper (Teil 1). D-1
Abbildung D-3: Kraft-Weg-Diagramme der unbewehrten Referenzdehnkörper (Teil 2). D-2
Abbildung E-1: Plattenstreifen nach der Betonage. E-1
Abbildung E-2: Moment-Verformungs-Diagramm des unbewehrten Referenzplattenstreifens. E-1
Abbildung F-1: Rissdetektion über die gemessenen Beschleunigungen. Ungerissener Querschnitt mit ähnlicher Beschleunigung und Geschwindigkeit in den Messpunkten (a); Umkehrung der Beschleunigungsrichtung in den Messpunkten (b); Beschleunigung und Geschwindigkeit in unterschiedliche Richtungen mit erkennbarem Riss (c); Annäherung der Geschwindigkeiten in den Messpunkten (d); abgeschlossene Rissbildung, Beschleunigung und Geschwindigkeit wieder in ähnlicher Größenordnung und gleicher Richtung (e). F-2
Abbildung G-1: Gesamtansicht des untersuchten Prüfkörpers (a) und daraus herausgetrennte Probe für CT-Untersuchung mit definierten Achsen (b). G-3
Abbildung G-2: Gesamtansicht Scan senkrecht zur bewehrten Richtung (x-z-Ebene) (a) und Detailaufnahme (b). G-4
Abbildung G-3: Gesamtansicht Scan parallel zur bewehrten Richtung (y-z-Ebene) (a) und Detailaufnahme (b). G-5
Abbildung G-4: Gesamtansicht Scan parallel zur bewehrten Richtung (x-y-Ebene) (a) und Detailaufnahme (b). G-6
Abbildung H-1: Spannungs-Dehnungs-Diagramme der verschiedenen Ansätze bei Variation der Faktoren k_R und k_b (Teil 1). H-1
Abbildung H-2: Spannungs-Dehnungs-Diagramme der verschiedenen Ansätze bei Variation der Faktoren k_R und k_b (Teil 2). H-2
Abbildung H-3: Spannungs-Dehnungs-Diagramme der verschiedenen Ansätze bei Variation der Faktoren k_R und k_b (Teil 3). H-3
Abbildung I-1: Bewehrungsskizze der Fassadenplatte in Längsrichtung (Schussfaden parallel zu eingezeichneter Spannrichtung) (a) und Querrichtung (b); Textile Bewehrungslagen in Längsrichtung (c) und Querrichtung (d). I-1
Abbildung I-2: Betonage der Fassadenplatte: Vorbereiten der Bewehrung sowie der Einbauteile (a), lagenweises Einbringen des Betons und der Bewehrung (b), Verdichten des Betons nach der letzten Lage (c) und fertige Platte vor dem Aushärten (d). I-2
Abbildung I-3: Fixierungspunkt mit Flachsfasergarn (a) und vorbereitete beschichtete Textilbewehrung für den Randeinbau (b). I-3

III Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Festbetoneigenschaften der untersuchten Betone.....18
Tabelle 2: Beton C5: Rezeptur und Festbetoneigenschaften – Verwendung bei den Zugversuchen. 19
Tabelle 3: Beton C6: Rezeptur und Festbetoneigenschaften – Verwendung bei den Biegeversuchen. 19
Tabelle 4: Mechanische Eigenschaften der verwendeten Garne.....23
Tabelle B-1: Untersuchte Betonrezepturen. B-1
Tabelle D-1: Zusammenstellung aller Ergebnisse der Dehnkörperversuche. D-3
Tabelle E-1: Zusammenstellung aller Ergebnisse der Biegeversuche. E-2

IV Formelzeichen-, Index- und Abkürzungsverzeichnis

m	Meter
cm	Zentimeter
mm	Millimeter
km	Kilometer
tex	Feinheit
N	Newton
cN	Zentinewton
MPa	Megapascal (=N/mm²)
g	Gramm
kg	Kilogramm
min	Minute
AP	Arbeitspaket
AS	Arbeitsschritt
d	statische Nutzhöhe
l	Länge
b	Breite
h	Höhe
HBC	Hochschule Biberach
CO_2	Kohlenstoffdioxid
rel.	relativ
NF-Bewehrung	Naturfaserbewehrung
WKI	Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut
Roving	Strang parallel angeordneter Fasern
Feinheit	Maß für die theoretische Querschnittsfläche eines Garns oder Rovings

V Zusammenfassung

Naturfasern gewinnen aufgrund ihrer umweltfreundlichen, wirtschaftlichen und mechanischen Eigenschaften bei der Verwendung als Verstärkung in Verbundwerkstoffen zunehmend an Relevanz. In diesem Forschungsprojekt wurde – soweit den Autoren bekannt – erstmals die Verwendung von Flachsfasern als Bewehrung in Betonbauteilen systematisch untersucht.

Das Fraunhofer WKI stellte hierfür Drehergewebe aus Flachsfasergarnen her, welche zur Verbesserung des Verbunds und zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit in Epoxidharz getränkt wurden. Mit diesem Gewebe wurden insgesamt 136 Dehnkörper durch den Projektpartner FABRINO zur experimentellen Untersuchung des Zugtragverhaltens hergestellt, wobei der Bewehrungsgrad variiert wurde. Außerdem wurden 25 prismenförmige Probekörper, die ebenfalls unterschiedliche Querschnitte an Flachsfaserbewehrung enthielten, zur Analyse der Biegebeanspruchung hergestellt. Die durchgeführten Versuche zeigten, dass die mit Naturfasern bewehrten Betonbauteile einen ähnlichen Versagensmechanismus aufweisen wie Bauteile, die mit herkömmlichem Betonstahl bewehrt sind. Dieser Versagensmechanismus zeichnet sich durch ein fein verteiltes, reproduzierbares Rissbild aus, welches die guten Verbundeigenschaften und die Aktivierung der Naturfaserbewehrung belegen. Die beschriebenen Beobachtungen und die gewonnenen Erkenntnisse wurden durch einen Ringversuch und CT-Aufnahmen der Versuchskörper bestätigt. Somit zeigen die Versuche das große Potential der Flachsfasertextilien als Ersatz für herkömmliche metallische und nicht-metallische Bewehrungen auf, da eine Einsparung von Ressourcen und CO_2 bei der Herstellung von Massivbauteilen erreicht und damit ein aktiver Beitrag zum Umweltschutz geleistet werden kann.

Für eine erste Anwendung der Flachsfaserbewehrung im Rahmen dieses Forschungsprojekts war es notwendig, die erforderliche Querschnittsfläche der Betonstahlbewehrung in eine äquivalente Querschnittsfläche der Naturfaserbewehrung umzurechnen. Dafür wurden erste Modelle zur Abbildung der einaxialen Zugbeanspruchung auf Basis der durchgeführten Versuche entwickelt.

Des Weiteren wurde die Recyclingfähigkeit der Naturfasertextilien untersucht, die dazu mit einer neuartigen Tränkung behandelt wurden. Diese Tränkung zeichnet sich dadurch aus, dass bei Wärmeeinwirkung der Verbund zwischen den Werkstoffen aufgehoben wird und so eine einfache Trennung der einzelnen Werkstoffe am Ende der Nutzung möglich ist. Die durchgeführten Versuche zeigten, dass diese Tränkung großes Potential für eine Anwendung bei Naturfasertextilien bietet, die als Bewehrung in Beton verwendet werden.

Um mögliche Anwendungen für die textile Bewehrung aus Naturfasern zu demonstrieren, wurde eine Fassadenplatte hergestellt, welche nur mit Naturfasertextilien bewehrt wurde, und die im Randbereich eines Industriefußbodens erforderliche Bewehrung durch Flachsfasertextilien ersetzt.

Das Forschungsprojekt wurde unter der Leitung der Hochschule Biberach in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer WKI und dem Unternehmen FABRINO mit einer Förderung durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) unter dem Aktenzeichen Az 35830/01-25 durchgeführt. Der DBU sei an dieser Stelle für die Unterstützung im Namen aller Projektbeteiligten herzlich gedankt.

VI Einleitung

In den letzten Jahrzenten haben nicht-metallische Bewehrungen in Betonkonstruktionen stark an Relevanz gewonnen. Nicht-metallische Bewehrungen zeichnen sich durch eine nicht vorhandene bzw. stark reduzierte Korrodierbarkeit gegenüber einer Bewehrung aus Stahl aus, wodurch das notwendige Nennmaß der Betonüberdeckung reduziert werden kann (z.B. [1]). Aufgrund gleicher oder höherer Zugfestigkeit der nicht-metallischen Bewehrungen im Vergleich zu Stahl können so schlankere und leichtere Konstruktionen realisiert werden (z.B. [2],[3]). Dies führt zu einer Reduktion des Betoneinsatzes und damit zu Ressourcen- und CO_2-Einsparungen [4].

Unter den nicht-metallischen Bewehrungen sind Glas- und Kunststofffasern am wenigsten kostenintensiv, bieten im Vergleich zu Carbon allerdings eine geringere Verstärkungswirkung. Carbonfasern weisen herausragende Verstärkungseigenschaften auf, bestehen aber vorwiegend aus petrochemischen Rohstoffen und sind sehr energieintensiv in ihrer Herstellung. Daraus lässt sich schließen, dass die genannten Fasern – aufgrund Ihrer bei Zugbeanspruchung hohen Festigkeit und Steifigkeit – einerseits zu einer Reduktion der benötigten Betonmengen führen können, andererseits aber in ihrer Herstellung nicht nachhaltig sind. Zusätzlich weisen diese Fasern eine geringe Querfestigkeit auf, was die Trennung aus der Betonmatrix erschwert (z.B. [5],[6]).

In dem vorliegenden Forschungsprojekt wurden daher Textilien aus Flachsfasergarnen hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit in Beton untersucht. Diese Textilien aus Naturfasern können ebenfalls aufgrund ihrer geringen bzw. nicht vorhandenen Korrodierbarkeit mit einer kleineren Betonüberdeckung gegenüber herkömmlicher Stahlbewehrung eingebaut werden, wodurch Beton eingespart werden kann. Die Zugfestigkeiten dieser Naturfasertextilien liegen in der Größenordnung von Betonstahl. Der größte Vorteil von Naturfasern liegt in deren Herstellung. Durch den natürlichen Ursprung der Fasern beschränken sich die Umweltemissionen auf den Verarbeitungsprozess der Pflanze zum Garn bzw. Textil. Außerdem sind die Fasern leicht verfügbar und sind unbedenklich hinsichtlich des Arbeits- und Gesundheitsschutzes (z.B. [24],[25]). Da die Fasern bisher nicht auf ihre Anwendbarkeit als textile Bewehrung in Beton untersucht wurden, war ein Ziel dieses Forschungsprojekts, herauszufinden, wie die Garne bzw. die aus den Garnen hergestellten Textilien beschaffen sein müssen, um hohe Zugfestigkeiten sowie gute Verbundeigenschaften zu erzielen.

Im ersten Arbeitspaket galt es, die Grundlagen für die experimentellen Untersuchungen zu schaffen. Dafür wurden zunächst wissenschaftliche Beiträge gesichtet, die die Verwendung von Naturfasern in Beton behandeln. Auf Basis der so gewonnenen Informationen wurden Anforderungen an die Gewebe sowie den Beton für eine Anwendung als Verbundbaustoff definiert. Da zum Tragverhalten von Betonbauteilen mit einer textilen Bewehrung aus Naturfasern zu Beginn des Forschungsprojekts keine Kenntnisse vorlagen, wurden in einem weiteren Arbeitsschritt Einflussfaktoren definiert, die später variiert wurden, um weitere Erkenntnisse zum Tragverhalten des neuartigen Verbundbaustoffs zu sammeln. Die Einflussfaktoren wurden dabei auf die Ausbildung des Textils sowie die Verwendung unterschiedlicher Tränkungen eingegrenzt. Die Ergebnisse dieser Betrachtungen wurden schließlich in einer Versuchsmatrix für die späteren Bauteilversuche zusammengefasst.

Die Herstellung als Bewehrung geeigneter Gewebe war das Ziel des zweiten Arbeitspaketes. Vor der Produktion der Gewebe wurden die spezifischen Zugkräfte der Naturfasergarne ermittelt. Dies

erfolgte einerseits an unbeschichteten und andererseits an beschichteten Garnen. Daraufhin wurden die Gewebe als Drehergewebe unter Variation der Schussfadenfeinheit produziert. Ein Teil der Gewebe wurde anschließend mit der ausgewählten biobasierten Beschichtung behandelt. Abschließend wurde die Zugfestigkeit sowie der E-Modul der hergestellten Gewebe bestimmt.

Im dritten Arbeitspaket wurde das Tragverhalten der nachhaltigen Bewehrung aus Naturfasern experimentell untersucht. Neben der Planung der Versuche, der Herstellung der Versuchskörper und der Durchführung der Versuche galt vor allem der Auswertung und der Diskussion der Ergebnisse besondere Beachtung. Die experimentellen Untersuchungen umfassten einaxiale Zugversuche und 4-Punkt-Biegeversuche. Zusätzlich zu den im Antrag beschriebenen Arbeitsschritten wurde ein Ringversuch am Lehrstuhl und Institut für Allgemeine Mechanik (IAM) der RWTH Aachen und am WKI sowie CT-Untersuchungen an den Versuchskörpern am IAM durchgeführt.

Auf Grundlage der Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen konnten im vierten Arbeitspaket Modelle zur Beschreibung des Tragverhaltens für einaxiale Zugbeanspruchungen von naturfaserbewehrten Betonquerschnitten entwickelt werden. Die mit den Modellen ermittelten theoretischen Tragwiderstände wurden mit den Versuchsbruchlasten abgeglichen und die Modelle gegebenenfalls angepasst.

In Arbeitspaket 6 wurde der Einsatz der neuartigen schaltbaren Beschichtung des Fraunhofer WKI in Hinblick auf deren Recyclingfähigkeit untersucht. Die Untersuchungen begrenzten sich dabei darauf, ob diese Beschichtung grundsätzlich das Potenzial bietet, die Naturfasern rückstandslos aus der Betonmatrix zu lösen.

Im letzten Schritt sollte die Verwendung der Bewehrung aus Flachsfasern in zwei möglichen späteren Anwendungsfällen demonstriert werden. Dafür wurde einerseits eine Fassadenplatte unter ausschließlicher Verwendung des Naturfasergewebes als Bewehrung hergestellt. Außerdem erfolgte der Einbau der Naturfaserbewehrung im Randbereich eines Industriefußbodens. In diesem Fall ergänzte die Naturfaserbewehrung den mit fibrillierten Hochleistungskurzfasern verstärkten Beton.

1 Festlegung der zu untersuchenden Materialien – AP 1

1.1 Literaturrecherche

Die Literaturrecherche zum Thema Textilbeton mit Schwerpunkt auf nachhaltiger Bewehrung ergab, dass verglichen zum Zeitpunkt der Antragstellung keine weiteren Veröffentlichungen erschienen sind, die den Projektverlauf wesentlich verändern würden. Aus diesem Grund wurde die Literaturrecherche auf Textilbeton mit Bewehrungen aus synthetischen Fasern konzentriert, um anhand der dort beschriebenen Vorgehensweisen und Erkenntnisse Parallelen für das eigene Projekt abzuleiten. Anhand dieser sollten eventuelle Schwierigkeiten frühzeitig erkannt werden, um diesen rechtzeitig entgegenwirken zu können.

Vor allem Publikationen, die im Rahmen des C³-Projektes und der Sonderforschungsbereiche 528 [5] und 532 [6] veröffentlicht worden sind, wurden hinsichtlich der Themen Dehnkörperversuche (Betonmatrix, Modelle zum Verbundverhalten usw.), Biegeversuche an Plattenstreifen sowie Bemessungsmodelle und Demonstratoren ausgewertet (z.B. [7],[8],[9],[10],[11],[12],[13],[14],[15]). Die gewonnen Erkenntnisse sind in die nachfolgende Arbeitspakte und -schritte eingeflossen und werden an den entsprechenden Stellen erläutert.

Im Rahmen der fortlaufenden Literaturrecherche während des Projektes wurden darüber hinaus einige Veröffentlichungen gefunden, die sich ebenfalls mit naturfaserverstärkten zementären Systemen befassen. Es konnte bereits gezeigt werden, dass die mechanischen Eigenschaften der Naturfasern trotz ihrer im Vergleich zu synthetischen Fasern größeren Streuung für den Einsatz als Verstärkungsmaterial in verschiedenen Verbundwerkstoffen ausreichen (z.B. [16],[17],[18],[19],[20],[21]). Darüber hinaus scheint die Zunahme der Anwendung von neuartigen Bioverbundwerkstoffen ein Indikator für ihr Potenzial als nächste Generation von Strukturmaterialien zu sein [22],[23],[24],[26]. Die Verwendung als Kurzfasern zur Erhöhung der Zug- und Biegzugfestigkeiten von Bauteilen gehört aktuell zu den wichtigsten Einsatzformen von Naturfasern im Bauwesen [21]. Dies zeigen auch die vielfältigen Untersuchungen auf diesem Gebiet, die neben reinen Materialversuchen auch immer häufiger die Eignung in zementären Systemen untersuchen (z.B. [17],[18],[27],[28],[29]).

Das Tragverhalten von Garnen bzw. lamellen- oder stabförmiger Naturfaserbewehrungen wurde in den letzten Jahren ebenfalls untersucht. Beispielsweise konnte mit Auszugsversuchen (Pull-out-Versuchen) für in Natriumhydroxid- und Triethylvinylsilan getränkte Ölpalmfasern [30] und für Bambusbewehrung [31],[32] eine ausreichend hohe Verbundfestigkeit im Beton nachgewiesen werden. Weiterhin wurde im Forschungsfeld der anorganischen Naturfasern bereits das Biegeverhalten von Betonbauteilen, die mit Textilien aus Basaltfasern in Kombination mit AR-Glas-Kurzfasern bewehrt waren, von Zhang et al. [33] untersucht. Claramunt et al. [34] führten Untersuchungen zum Biegeverhalten unter Berücksichtigung der Alterung an bewehrten Fassadenelementen durch. Hier kamen Vliesstoffe aus Flachsfasern, deren Feuchtigkeitsbeständigkeit durch verschiedene Nass-Trocken-Behandlungen erhöht wurden, als Bewehrung zum Einsatz.

Darüber hinaus wurden Untersuchungen zum Verhalten von Naturfasern in einer Zementmatrix durchgeführt. Page et al. [35] zeigten beispielsweise, dass mit kürzeren Fasern und höherem Zementleimgehalt hochfließfähiger Beton hergestellt und die Zugfestigkeit des Betons erhöht werden

kann. Majstorović et al. [36] stellten fest, dass ein hoher Anteil Metakaolin als Ersatz für Portlandzement eine calciumhydroxidfreie Umgebung schafft, die zur Duktilität des zementbasierten Verbundmaterials beiträgt und die Degradation und Versprödung der Flachsfasern verhindert.

1.2 Definition der Anforderungen an die Materialien (Gewebe und Beton)

Als Anforderung an die Gewebe wurde für die ungetränkten Textilien eine hohe Formstabilität zum leichteren Einbau des Textils in den Dehnkörper festgelegt. Diese Formstabilität sollte durch gleichbleibende, kleine Abstände der Kettfäden (10 bzw. 15 mm), die nach aktuellem Wissensstand nur einen untergeordneten Einfluss auf die Zugfestigkeit des Gewebes in Richtung der Schussfäden haben, sichergestellt werden. Darüber hinaus war eine möglichst hohe Zugfestigkeit der Schussfäden erforderlich, um die erforderliche Anzahl der Bewehrungslagen in den sehr dünnen Stegen der Dehnkörper zu reduzieren. Diese Anforderung sollte über eine große Querschnittsfläche (Feinheit) der Schussfäden erfüllt werden. Da bei der Betonage die Betonmatrix das gesamte Gewebe umschließen sollte, wurden möglichst große Öffnungsweiten des Textils angestrebt. Um hier einen Kompromiss zwischen hohem Bewehrungsgrad und einer auf das Größtkorn abgestimmten Maschenweite zu erreichen, wurden für die Dehnkörperversuche zunächst nur mittlere bis größere Abstände der Schussfäden (8 bis 15 mm) untersucht, welche auch für einen praktischen Einsatz geeignet sind. Um die zuvor definierten Anforderungen erfüllen zu können, wurden als textile Strukturen Drehergewebe verwendet, welche in Abschnitt 2.2 genauer erläutert werden.

Die Anforderungen an die getränkten Textilien waren analog zu denen für ungetränkte Textilien. Jedoch konnte die Formstabilität durch die Tränkung deutlich verbessert werden. Zusätzlich wurde die Zugfestigkeit des Gewebes durch die Tränkung erhöht, da herstellungsbedingte einzelne Faserbrüche überbrückt werden können, indem die Kraft der gebrochenen Fasern durch die Tränkung an die benachbarten Fasern übertragen wird. Ein Verrotten der Textilien im alkalischen Milieu des Betons kann durch die Tränkung ebenfalls verhindert werden, daher war ein getränktes Textil zur Erzielung eines dauerhaften Verbundbaustoffs unabdingbar. Weiterhin sollten Textilien mit möglichst großen Öffnungsweiten in den Dehnkörper- und Biegeversuchen verwendet werden, sodass die Ergebnisse direkt auf eine spätere praktische Anwendung übertragen werden können.

Der verwendete Feinbeton sollte im Hinblick auf die Dehnkörperversuche mit den ungetränkten Textilien eine möglichst geringe Zugfestigkeit besitzen, damit der Betonquerschnitt deutlich vor dem Textil reißt, sodass dieses vollständig aktiviert werden kann, und sich im Idealfall ein fein verteiltes Rissbild einstellt. Die Rissnormalkraft des Betonquerschnitts sollte also deutlich kleiner als die durch das Textil maximal aufnehmbare Zugkraft sein. Weiterhin war eine möglichst fließfähige Konsistenz des Betons gewünscht, damit die Betonmatrix die komplette Oberfläche der Bewehrung umfließen konnte und sich auch in den Öffnungen der Gewebe verteilte. Aufgrund der dünnen Stegbreite der Dehnkörper war zudem eine geringe Schwindneigung erforderlich. Diese Eigenschaften sollen verhindern, dass die Probekörper bereits in der Schalung während des Abbindeprozesses so große Eigenspannungen entwickeln, dass schon im frühen Betonalter Risse entstehen. Ein weiterer Aspekt war das verwendete Größtkorn: Dieses sollte nicht zu groß sein, um eine einfache Betonierbarkeit und somit einen kraftschlüssigen Verbund zwischen Matrix und Gewebe sicherzustellen.

1.3 Festlegung der zu untersuchenden Einflussfaktoren

In den Dehnkörper- und Biegezugversuchen sollten unterschiedliche Einflussfaktoren variiert werden, sodass möglichst umfassende Erkenntnisse über das Tragverhalten der textilen Bewehrungen aus Flachsfasern gewonnen werden konnten.

Ein wichtiger Parameter stellte die Tränkung dar, weshalb Versuche mit ungetränkten und getränkten Geweben durchgeführt wurden. Bei den getränkten Textilien wurde ein (teilweise) biobasiertes Epoxidharz verwendet. Die Tränkung wird in Abschnitt 1.4 detaillierter beschrieben.

Weiterhin wurde die Öffnungsweite bzw. der Abstand der Schussfäden, welche auf Zug beansprucht werden, variiert. Um eine feine Abstufung dieser Abstände zwischen 8 mm und 15 mm zu erhalten, sind vier Öffnungsweiten untersucht worden. Die Öffnungsweite von 15 mm sollte außerdem Erkenntnisse für die späteren Probeeinbauten des Projektpartners FABRINO liefern, da davon ausgegangen wurde, dass diese Öffnungsweite den praktischen Anforderungen (Beton mit einem Größtkorn von 8 mm) am nächsten kommt. Die Abstände der Dreherfäden (Kettrichtung) sollte konstant bei 10 mm gehalten werden, um bei allen Textilen eine vergleichbare Querschnittsfläche in Kettrichtung sicherzustellen, sodass dieser Einflussparameter vernachlässigt werden konnte. Um dennoch eine Aussage über diesen Parameter treffen zu können, wurde bei der Öffnungsweite von 15 mm eine zusätzliche Versuchsreihe mit quadratischen Öffnungen (Abstand der Dreherfäden von 15 mm) durchgeführt.

Der Bewehrungsgrad sollte außerdem durch unterschiedliche Feinheiten der Schussfäden sowie eine unterschiedliche Anzahl an Bewehrungslagen variiert werden. Dadurch konnte sowohl der Einfluss von unterschiedlichen Schussfadenquerschnitten als auch die Eignung eines mehrlagigen Gewebes untersucht werden. Ein mehrlagiger Einbau war bei den Probeeinbauten des Projektpartners FABRINO ebenfalls erforderlich.

1.4 Festlegung der zu untersuchenden Tränkungen

Wie im Abschnitt 1.3 beschrieben, sollte der Einfluss der Tränkung auf das Tragverhalten genauer untersucht werden. Neben den ungetränkten Textilien wurden daher auch getränkte Textilien geprüft. Dabei wurden zwei unterschiedliche Tränkungen betrachtet. Zum einen sollte eine marktverfügbare teilweise biobasierte Tränkung (*SICOMIN Greenpoxy 56*) verwendet werden. Es wurde bewusst ein Epoxidharz mit einem hohen Anteil an natürlichen Harzen gewählt, um durch die Tränkung keine wesentlichen Nachteile hinsichtlich der CO_2-Bilanz zu erhalten. Das verwendete *SICOMIN Greenpoxy 56* enthält Kohlenwasserstoffe aus pflanzlichem Ursprung, sodass 56 % der molekularen Struktur aus nachwachsenden Rohstoffen stammen. Kombiniert wurde das Epoxidharz mit dem *SICOMIN Härter SD8822*, wodurch der Anteil an Kohlenwasserstoffen pflanzlichen Ursprungs in der fertigen Tränkung 43 % beträgt. Die mechanischen Eigenschaften der Tränkung können den Produktdatenblätter in Anhang J entnommen werden [38],[39].

Um darüber hinaus die Nachhaltigkeit weiter zu verbessern, wurde zusätzlich eine schaltbare Tränkung untersucht, die eine Rückführung der einzelnen Komponenten (Beton, Tränkung, Textil) in den Stoffkreislauf am Ende der Nutzungsdauer deutlich vereinfachen soll. Diese Tränkung wird aktuell am WKI entwickelt und sollte im Rahmen dieses Projektes eine erste Anwendung finden. Erste Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit der Tränkung (Alkali-Tests) zeigten eine vergleichbare

Tabelle 1: Festbetoneigenschaften der untersuchten Betone.

Eigenschaft	Einheit	C1 nach [12]	RB2 nach VIII	FA-1200-01 nach [13]
w/z-Wert	–	0,38	0,32	1,33
Biegezugfestigkeit	N/mm²	6,972	7,807	4,434
Zentr. Zugfestigkeit (berechnet)	N/mm²	3,691	4,133	2,348

Beständigkeit wie herkömmliche Epoxidtränkungen. Darüber hinaus besitzt diese Tränkung die Eigenschaft, dass die Adhäsion mithilfe eines Triggers wie beispielsweise einer Temperaturänderung oder eine Veränderung des pH-Wertes „ausgeschaltet" werden und das Textil somit relativ einfach von der Betonmatrix getrennt werden kann. Die Anwendung dieser neuartigen schaltbaren Tränkung wurde in AP 5 (Recycling, Abschnitt 5) untersucht.

1.5 Wahl einer geeigneten Betonrezeptur

Im Rahmen von Vorversuchen [40] zu den geplanten Dehnkörperversuchen ist bereits ein Beton, der im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 532 von VOSS [14] verwendet wurde, betrachtet worden. Aufgrund der in dieser Mischung verwendeten Flugasche, die zukünftig nur noch eingeschränkt verfügbar sein wird, wurde außerdem eine Betonrezeptur aus dem B2-Teilprojekt des C³-Projektes untersucht [41]. Da dieser Beton relativ hohe Zugfestigkeiten zwischen 6 MPa und 7 MPa aufwies, eine gewisse Neigung zur Rissbildung im frühen Betonalter zu beobachten war und auch die Betonkonsistenz die Verarbeitbarkeit erschwert hat, wurden im Rahmen dieses Arbeitspaketes erneut Versuche mit unterschiedlichen Betonmischungen durchgeführt.

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus Abschnitt 1.1 wurden der C1-Beton nach KULAS [12], das Rezepturbeispiel 2 (RB2) nach [5] sowie der Beton FA-1200-01 nach MOLTER [13] ausgewählt sowie mit teilweise angepasster Mischung hergestellt und geprüft. Es handelt sich dabei um sogenannte Feinbetone, die ein Größtkorndurchmesser kleiner als 5 mm aufweisen und somit formal nicht als Beton gemäß DIN EN 206 [37], sondern nach DIN EN 196-1 [42] als Mörtel zu klassifizieren sind. Die Rezepturen wurden aufgrund ihrer geringen Zugfestigkeiten ausgewählt. In einem weiteren Schritt wurde die bei den Mischungen FA-1200-01 [13] und RB2 [5] verwendete Flugasche durch andere Betonzusatzstoffe (z. B. Kalksteinmehl) ersetzt. Diese Änderung wurde aufgrund der zukünftig geringer werdenden Verfügbarkeit von Flugasche, die als Abfallprodukt bei der Kohleverstromung entsteht, vorgenommen. Die untersuchten Rezepturen sind im Anhang, Tabelle B-1 zusammengefasst dargestellt. Die Biegezugprüfungen an Prismen (40 mm × 40 mm × 160 mm) wurden nach DIN EN 196-1 [42] als Drei-Punkt-Biegezugversuche im Betonalter von 7 Tagen durchgeführt. Aus den Biegezugfestigkeiten sind die zentrischen Zugfestigkeiten nach *fib* Model Code 2010 [43] berechnet worden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt.

Da der Beton FA-1200-01 eine besonders geringe Zugfestigkeit bei gleichzeitig flüssiger Konsistenz aufwies, wurde dieser für die ersten Tastversuche, die zur Optimierung der Schalung sowie des Versuchstandes der Dehnkörperversuche durchgeführt wurden (vgl. Abschnitt 3.1), verwendet.

Außerdem wurden mit dem Beton RB2 aufgrund der guten Verarbeitbarkeit ebenfalls einige Tastversuche durchgeführt. Der Beton C1 hingegen ließ sich verglichen mit den beiden anderen Betonen schlechter verarbeiten, da er deutlich zähflüssiger war, und wurde daher nicht weiter betrachtet.

Die Tastversuche an den Dehnkörpern ergaben, dass die weiteren Versuchskörper für das AP 3 ebenfalls aus dem Beton FA-1200-01 [13] hergestellt werden sollten. Aufgrund des hohen w/z-Wertes der Mischung und der damit einhergehenden großen Schwindverformung im frühen Betonalter waren jedoch nochmals weitere Optimierungen erforderlich. Die letztendlich gefundene Betonrezeptur (C5) ist in Tabelle 2 dargestellt. Im Rahmen der Vorversuche sind die Festbetoneigenschaften dieses Betons nochmals umfassend geprüft worden (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Beton C5: Rezeptur und Festbetoneigenschaften – Verwendung bei den Zugversuchen.

Bestandteile	Einheit	Menge	Eigenschaft	Einheit	Beton C5
CEM I 32,5 N/LH	kg/m³	425	**w/z-Wert**	kg/m³	0,68
Sand 0/2	kg/m³	1039	**Druckfestigkeit**	N/mm²	46,82
Kalksteinmehl	kg/m³	708	**Biegezugfestigkeit**	N/mm²	6,50
Silikastaub	kg/m³	54	**Zentr. Zugfestigkeit (berechnet)**	N/mm²	2,88
Fließmittel	kg/m³	3,6			
Wasser	kg/m³	289			

Die Betonrezeptur C5 ist schließlich für die Dehnkörperversuche zur Untersuchung des Verbund- und einaxialen Zugtragverhaltens verwendet worden, da die mechanischen Eigenschaften des Festbetons die Anforderungen erfüllten und sich der Frischbeton sehr gut verarbeiten ließ. Aufgrund der zukünftig nur noch sehr eingeschränkten Verfügbarkeit des verwendeten Zements CEM I 32,5 N/LH sind im Rahmen der Vorversuche für die 4-Punkt-Biegeversuche weitere Betonrezepturen untersucht worden. Die vorhandene Mischung C5 diente dabei als Ausgangsbasis und es wurde lediglich der Parameter Zement variiert. Es konnte der Beton C6 entwickelt werden, der die Anforderungen erfüllte, die sich für die Biegeversuche an Plattenstreifen ergaben. Die Rezeptur sowie die Festbetoneigenschaften sind in Tabelle 3 dargestellt. Die Konsistenz des Frischbetons war verglichen mit der des für die Dehnkörper verwendeten Betons C5 etwas zähflüssiger, was aber in Anbetracht der im Vergleich zu den Dehnkörpern unterschiedlichen Geometrie und des unterschiedlichen Herstellungsverfahrens vorteilhaft war (vgl. Abschnitt 3.7).

Tabelle 3: Beton C6: Rezeptur und Festbetoneigenschaften – Verwendung bei den Biegeversuchen.

Bestandteile	Einheit	Menge	Eigenschaft	Einheit	Beton C6
CEM II / A-LL 32,5 R	kg/m³	425	**w/z-Wert**	kg/m³	0,68
Sand 0/2	kg/m³	1039	**Druckfestigkeit**	N/mm²	53,61
Kalksteinmehl	kg/m³	708	**Biegezugfestigkeit**	N/mm²	7,42
Silikastaub	kg/m³	54	**Zentr. Zugfestigkeit (berechnet)**	N/mm²	3,28
Fließmittel	kg/m³	3,6			
Wasser	kg/m³	289			

1.6 Aufstellen einer Versuchsmatrix

Aus den vorhergehenden Arbeitsschritten konnte die im Anhang Abbildung A-1 enthaltene Versuchsmatrix für die Dehnkörperversuche erstellt werden. Die Versuchsbezeichnung beschreibt dabei die einzelnen Parameter des jeweiligen Versuchskörpers (*Tränkungsart – Abstand Schussfaden [mm] / Abstand Kettfaden [mm] – Feinheit [tex] – Anzahl Bewehrungslagen – Versuchsnummer*). Die Versuchsmatrix für die Biegeversuche wurde aus den Dehnkörperversuchen abgeleitet (siehe Anhang, Abbildung A-2). Auch hier beschreibt die Versuchsbezeichnung die einzelnen Parameter (*Tränkungsart – Abstand Schussfaden [mm] / Abstand Kettfaden [mm] – Feinheit [tex] – Anzahl Bewehrungslagen – Versuchsnummer*). Da die Ergebnisse der Dehnkörperversuche klar belegten, dass das Verbund- und Zugtragverhalten der ungetränkten Textilien deutlich schlechter war (vgl. Abschnitt 3.5), wurden für die Biegeversuche an Plattenstreifen ausschließlich getränkte Textilien verwendet. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass die ungetränkten Textilien in der alkalischen Betonmatrix nicht dauerhaft und somit für eine spätere Anwendung in der Praxis nicht geeignet sind. Im Rahmen der Dehnkörperversuche waren die Erkenntnisse zum Tragverhalten der ungetränkten Textilien dennoch sehr wichtig, um vergleichende Aussagen über das Verbundverhalten treffen zu können. Wie auch bei den Dehnkörperversuchen wurden für die Biegeversuche unbewehrte Referenzplattenstreifen hergestellt und geprüft.

2 Herstellung der Gewebe – AP 2

2.1 Garnzugversuche

Die spezifischen Zugkräfte (cN/tex) der Naturfasern wurden am Fraunhofer WKI nach der Prüfnorm ASTM D 2256 [44] / DIN EN ISO 2062 [45] ermittelt. Dabei wurden die Flachsgarne mit einem Probenhalter für Reifencordeln Typ 8257 2,5 kN mit einer Einspannlänge von 250 ± 2 mm, einer Vorkraft von 0,5 cN/tex sowie einer Dehnungsgeschwindigkeit von 250 ± 10 mm/min geprüft. Eine Abbildung des Probenhalters ist im Anhang enthalten (Abbildung C-1). Die Garne wurden bei 23 ± 2°C und 50 ± 4% rel. F. nach Norm vorgelagert. Die Festigkeiten wurden an den projektrelevanten Flachsgarnen mit einer Feinheit von 1.000, 1.200 und 1.500 tex in Schussrichtung sowie 2 × 500 tex (ein Dreher- und ein Stehfaden je 500 tex) in Kettrichtung untersucht. Es wurden je Garn 10 oder 12 Versuche durchgeführt. Des Weiteren wurden neben den unbeschichteten auch beschichtete Garne geprüft. In Abbildung 1 sind die Ergebnisse der unbeschichteten Garne im Vergleich zu sehen.

Um die sehr viel steiferen beschichteten Garne für die hier verwendete Einspannvorrichtung adaptieren zu können, wurden die Garne im Vorfeld bereits in Form gebracht, indem die Garne nochmals erwärmt und in einer entsprechenden Vorrichtung an die Klemmengeometrie angepasst wurden. Leider kam es bei der Prüfung der beschichteten Garne an den Einspannstellen der Probekörper vermehrt zu Garnbrüchen, bzw. es traten bereits bei der Konditionierung der Garne Sollbruchstellen in den Einspannzonen auf. Die in 12 Versuchen (bzw. 4 Versuche für beschichtetes 1000tex-Garn) ermittelten Ergebnisse (Abbildung 2) können daher nicht als direkt verwertbar angesehen werden.

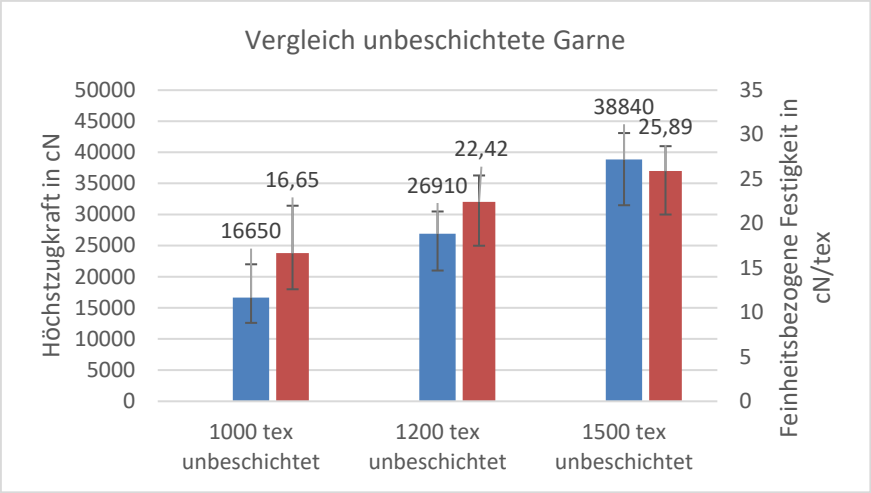


Abbildung 1: Ermittelte Höchstzugkraft und feinheitsbezogene Festigkeit der unbeschichteten Garne je untersuchter Feinheit.

Da besonders im Hinblick auf die Auswertung der Dehnkörper- und Biegeversuche sowie für die Entwicklung der ersten Modelle zum Tagverhalten (AP 4, Abschnitt 4) verwertbare Bruchfestigkeiten der beschichteten Textilien erforderlich waren, wurden modifizierte Garnzugversuche in Anlehnung an HINZEN [46] durchgeführt. Da die dafür verwendeten Einzelgarne aus den fertigen Textilien herausgelöst werden und somit dieselbe Vorschädigung wie diese aufweisen, kann direkt auf die Zugfestigkeit der textilen Bewehrung geschlossen werden. Um ein vorzeitiges Versagen der Garne im Bereich der Einspannstellen zu vermeiden, wurden die Garne mit Epoxidharzkleber in Stahlhülsen mit Innengewinde eingeklebt. Die Krafteinleitung erfolgte mittels einer in die Prüfmaschine eingeklemmten Gewindestange, welche in die Stahlhülse eingedreht wurde. Hinsichtlich Prüfgeschwindigkeiten und freier Probenlänge wurden die Hinweise aus [45] bzw. [46] verwendet. Die in jeweils 4 modifizierten Garnzugversuchen für getränkte Garne mit einer Feinheit von 1.200 und 1.500 tex ermittelten Festigkeiten werden in Abbildung 3 dargestellt und werden für die nachfolgenden Erläuterungen und Berechnungen verwendet.

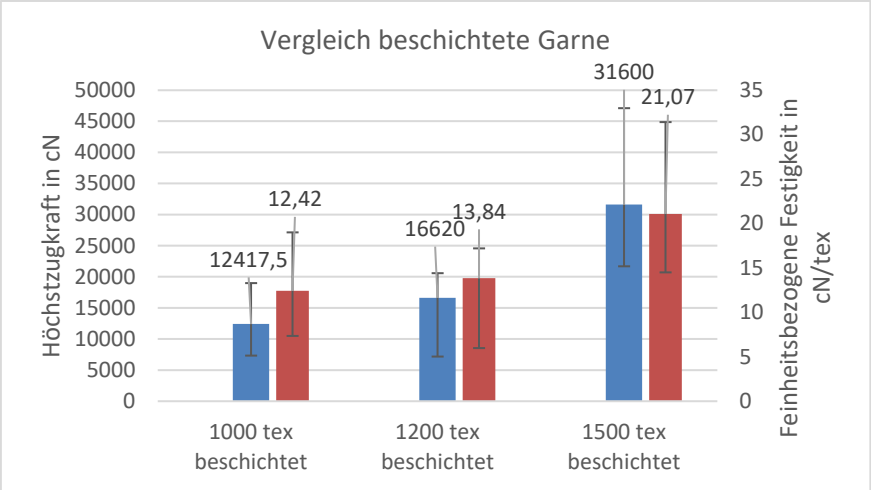


Abbildung 2: Ermittelte Höchstzugkraft und feinheitsbezogene Festigkeit der beschichteten Garne je untersuchter Feinheit.

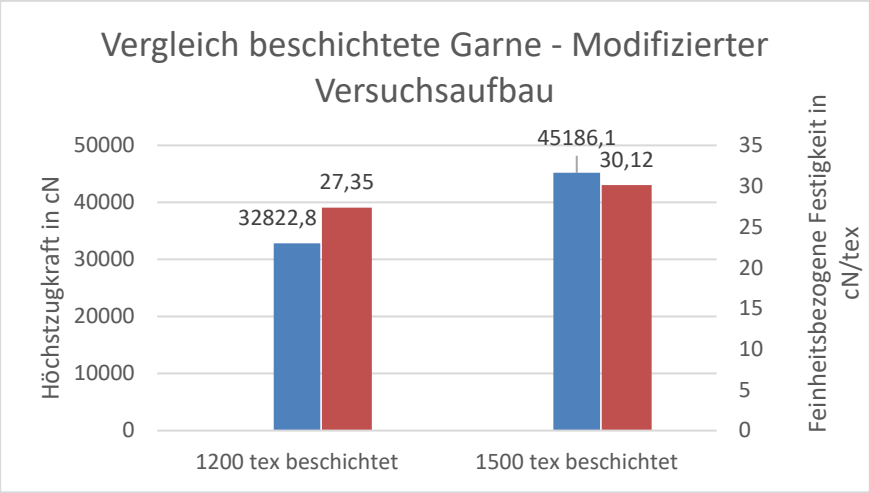


Abbildung 3: Ermittelte Höchstzugkraft und feinheitsbezogene Festigkeit der beschichteten Garne je untersuchter Feinheit, modifizierter Versuchsaufbau.

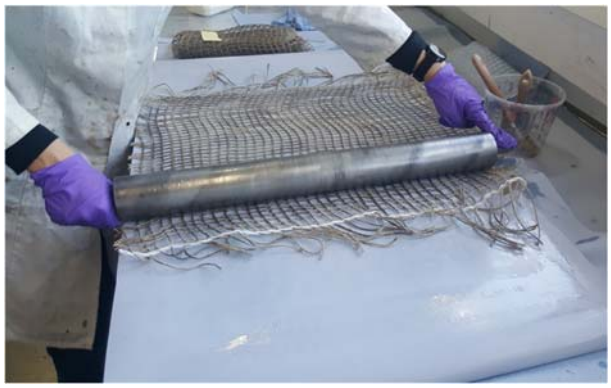
2.2 Herstellung der verschiedenen Gewebe und Tränkung der ausgewählten Textilien

Die projektrelevanten Naturfasertextilien wurden als Drehergewebe ausgebildet und ihr Aufbau kann der Versuchsmatrix im Anhang (Abbildung A-1) entnommen werden. Bei einem Drehergewebe werden in Kettrichtung zwei Fäden kombiniert: der Stehfaden, der rechtwinklig zum Schussfaden verläuft, sowie der Dreherfaden, der sich immer wieder um den Stehfaden dreht und so den Stehfaden umschließt (Abbildung 4 (a)). Durch die Verdrehung sind Drehergewebe deutlich verschiebefester als andere Bindungsarten, wie z. B. Leinwand- oder Atlasbindung. Dies ist besonders vorteilhaft, wenn große Öffnungsweiten wie in diesem Projekt erforderlich sind. Bei dieser Gewebeart wird zudem die Ondulation, d.h. die verarbeitungsbedingte Schädigung des Textils, minimiert.

Insgesamt wurden zehn verschiedene Flachsfasergewebe hergestellt, die sich jeweils in ihrer Öffnungsweite (Variation der Schussdichte: 8, 10, 12 und 15 mm) und der Feinheit der verwendeten Schussfäden (1.000, 1.200 und 1.500 tex) unterschieden und die teilweise, in Abhängigkeit der erwarteten Belastungen, auch mehrlagig eingebaut wurden. Alle Gewebe wurden jeweils unbeschichtet und mit einer biobasierten Beschichtung (*Sicomin GreenPoxy SR 56*) beschichtet geprüft (siehe Versuchsmatrix, Anhang A).

Das Beschichten der Textilien erfolgte in einem händischen Verfahren (Abbildung 4 (b)), welches prinzipiell einer kontinuierlichen Beschichtungsmethode mit Quetschwalzen ähnelt. Die textilen Halbzeuge wurden zunächst auf einer metallischen, glatten Oberfläche fixiert. Anschließend wurde das Imprägnierharz auf dem Textil verteilt und mittels einer Walze (ca. 17 kg, 60 cm breit) durch Rollen in das Gewebe eingearbeitet. Dieser Prozess wurde beidseitig durchgeführt. Der Harzanteil wurde gravimetrisch bestimmt und während des Beschichtens vor der Aushärtung verifiziert, um möglichst gleiche Gewichtsanteile in den Geweben zu realisieren. Im Anschluss wurden die beschichteten textilen Halbzeuge gemäß den Angaben des Harzherstellers bei 80 °C für 30 min im Ofen ausgehärtet.

(a)



(b)

Abbildung 4: (a) Exemplarische Darstellung eines Drehergewebes (Dreher- (orangener Faden) und Stehfaden (gelber Faden) in Kettrichtung) und (b) Beschichtung der Gewebe.

2.3 Untersuchung der mechanischen Eigenschaften der Textilien (Zugfestigkeit und E-Modul)

Die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften soll exemplarisch für ein unbeschichtetes Flachsgarn mit einer Feinheit von 1.500 tex, für das eine durchschnittliche maximale Zugkraft von 45.186 cN ermittelt werden konnte, gezeigt werden. In Tabelle 4 sind die Ergebnisse für alle Garne zusammengefasst.

Die Rohdichte des Garns lag bei $\rho_f = 1{,}4\ g/cm^3$. In Anlehnung an z.B. MOLTER [13] wird die Querschnittsfläche A_s der Flachsgarne wie folgt berechnet:

$$A_g = \frac{F_g}{\rho_f} \cdot 10^{-3} \qquad (1)$$

mit A_g Querschnittsfläche eines Garns in mm²

F_g Feinheit eines Garns in g/km

ρ_f Rohdichte des Fasermaterials in g/cm³.

Für das oben genannte Garn ergibt sich eine mittlere Querschnittsfläche von 1,07 mm². Für die weiterführenden Berechnungen kann somit eine Zugfestigkeit von 421,74 N/mm² angesetzt werden.

Tabelle 4: Mechanische Eigenschaften der verwendeten Garne.

Garn	Höchstzug-kraft (cN)	Feinheitsbezogene Festigkeit (cN/tex)	Querschnitts-fläche (mm²)	Zugfestigkeit (N/mm²)
1000 tex, unbeschichtet	16 650	16,65	0,71	234,5
1000 tex, beschichtet[1]	12 418	12,42	0,71[2]	174,9
1200 tex, unbeschichtet	26 910	22,42	0,86	312,9
1200 tex, beschichtet	32 823	27,35	0,86[2]	382,9
1500 tex, unbeschichtet	38 840	25,89	1,07	363,0
1500 tex, beschichtet	45 186	30,12	1,07[2]	421,7

[1] Einzelgarnzugversuche mit 1000 tex sind überwiegend vorzeitig an der Einspannstelle versagt

[2] Bestimmt nach Gl. (1): gravimetrische Dichte durch Tränkung für Festigkeitsberechnung der Garne in Darstellung nicht berücksichtigt.

3 Experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten – AP 3

3.1 Planung der Zugversuche (Entwicklung des Versuchsstandes, Erstellung von Schal-, Bewehrungs- und Messtechnikplänen)

Die Dehnkörper und der zugehörige Versuchsstand sowie die Messtechnik wurden aufbauend auf den ersten Tastversuchen aus dem Jahr 2020 [40] weiterentwickelt. Ein Problem der damals verwendeten Dehnkörpergeometrie war der zu dünne Steg sowie die scharfen Übergänge vom Steg zu den dickeren Einspannbereichen, sodass hier aufgrund der auftretenden Kerbspannungen die Gefahr einer frühen Rissbildung bereits in der Schalung sehr groß war. Der Steg der Dehnkörper wies eine Dicke von 10 mm auf, was sich für einen mehrlagigen Einbau der (ungetränkten) Gewebe als zu dünn erwies. Die Gewebe waren aufgrund des dünnen Stegs und der begrenzten Viskosität des Betons teilweise nicht vollkommen mit Beton benetzt. Weitere verbesserungsfähige Punkte waren das Spannen der Gewebe in der Schalung, um einen lagegerechten Einbau der Bewehrung und somit eine direkte Aktivierung der Textilien unter Belastung zu ermöglichen, sowie die Befestigung der Dehnkörper im Versuchsstand. Im Rahmen der Vorversuche für dieses Arbeitspaket wurde daher die Geometrie der Dehnkörper (vgl. Abbildung 5) optimiert. Die Dicke des Steges wurde auf 15 mm vergrößert. Weiterhin wurden die Aufvoutungen ausgerundet und mit Polystyrol-Abschnitten in den kritischen Bereichen etwas abgepolstert, um die Gefahr der Rissbildung während des Abbindeprozesses an diesen Stellen zu reduzieren. Bedingt durch die maximale Länge der Textilien von 50 cm sind die Dehnkörper außerdem in den nicht relevanten Bereichen (Einspannköpfe) gekürzt worden, sodass sich eine Gesamtlänge des Dehnkörpers von 84 cm ergab.

Da die Gewebe in Schussrichtung nur mit einer Länge von 50 cm (+Schussfadenüberhang) hergestellt werden konnten, wurde die Lasteinleitung im Dehnkörper sowie die Spannvorrichtung zur Lagesicherung der Textilien in der Schalung angepasst. Die Gewebe wurden mit Hilfe eines Epoxidharzklebers an Lochblechen befestigt (Abbildung 6). Über Bolzen und Hülsen wurde die Last in den Beton und teilweise direkt in die Lochbleche eingeleitet. Die restliche Kraft konnte vom Beton in die Bleche eingeleitet werden. Bei dieser Konstruktion wurde darauf geachtet, dass die Lochbleche so kurz wie möglich waren, so dass diese keinen Einfluss auf die eigentliche Messlänge der textilbewehrten Stege der Dehnkörper hatten.

Mit Hilfe der Hülsen konnte die Bewehrung in der Schalung gestrafft eingebaut werden (Abbildung 7). Da die Schalung an einem Ende im Bereich der Hülsen Langlöcher aufwies, konnte durch zwei kurze L-Winkel die Hülse in Richtung Schalungsende gezogen werden (Abbildung 7). Die dafür erforderliche Zugkraft wurde mittels zweier Flügelmuttern, die sich gegen die Außenseite der Kopfschalung verspannten, aufgebracht. Dabei war außerdem vorteilhaft, dass sich durch diese Konstruktion bei allen Dehnkörpern eine vergleichbare Zugkraft zur Straffung des Textils aufbringen ließ.

Um die Wegaufnehmer bei der Versuchsdurchführung möglichst exakt platzieren zu können, wurden bereits vor der Betonage Flügelmuttern an den entsprechenden Stellen im Kopfbereich der Dehnkörperschalung eingebaut (Abbildung 7). In diese Flügelmuttern konnte nach dem Ausschalen eine Gewindestange eingeschraubt werden, die als Stativ für die Wegaufnehmer verwendet wurde.

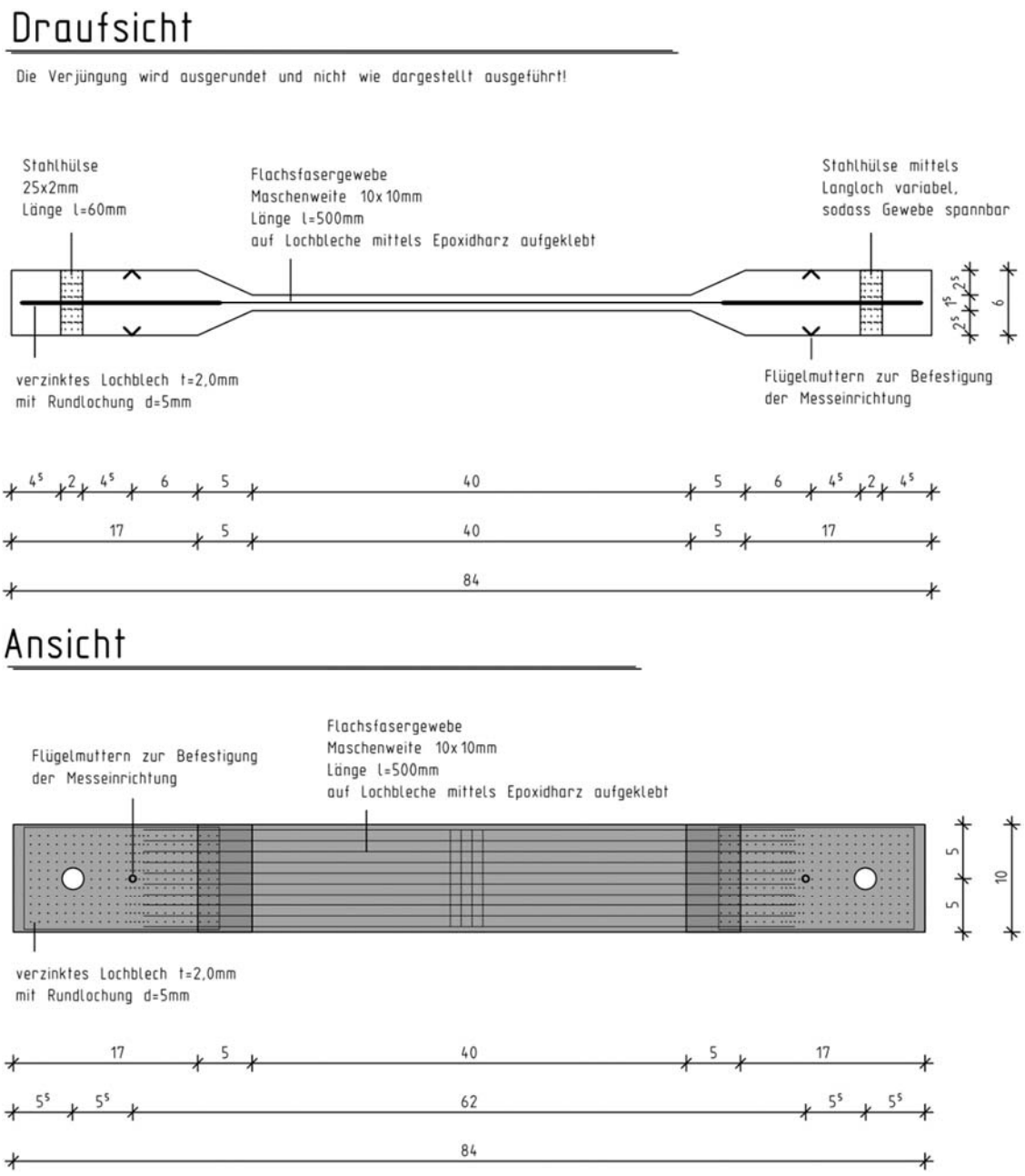


Abbildung 5: Draufsicht und Ansicht der Dehnkörper in (cm).

Somit konnte bei allen Versuchen eine präzise Anordnung der Wegaufnehmer sichergestellt werden.

Die Dehnkörper wurden vertikal in einer Universalprüfmaschine eingespannt geprüft. Um eine Bauteilprüfung ohne wesentliche zusätzliche Zwängungen (Biegebeanspruchung) sicherzustellen, wurden kardanische Gelenke entwickelt (siehe Anhang, Abbildung D-1). Eine Gewindestange (ø20 mm), die in der Prüfmaschine befestigt wurde, leitete die Zugkraft in das Gelenk über die eingeschraubte Gewindelänge von 30 mm ein. Das Kardangelenk leitete die Zugkraft schließlich zwängungsfrei in den Probekörper ein.

Um die Kraft und den Weg während der Versuche kontinuierlich aufzeichnen zu können, wurde die digitale Messtechnik der *Versuchshalle für Baustoff- und Bauteilprüfung* der HBC verwendet. Die Kraft wurde dabei direkt von der in der elektromechanischen Universalprüfmaschine der Fa. *Zwick GmbH & Co. KG* eingebauten Kraftmessdose übernommen. Die Verformungen des Dehnkörpers

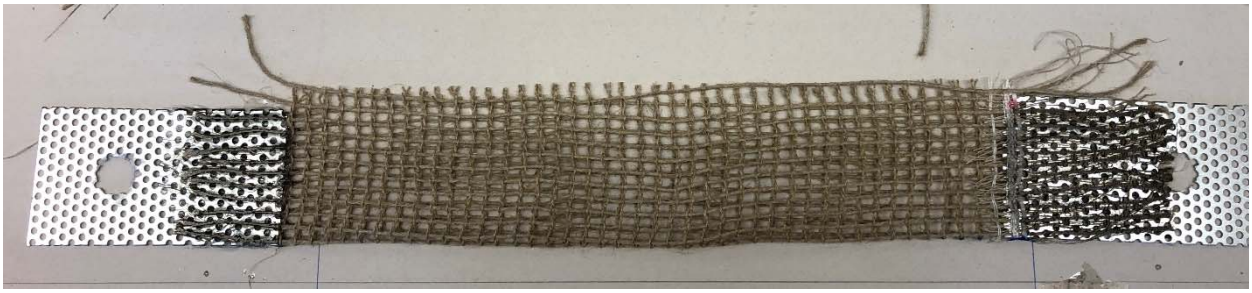


Abbildung 6: Auf Lochbleche geklebtes, ungetränktes Textil.

wurden mittels induktiven Wegaufnehmern mit Tastern (Fa. *HBM, WA/50mm*) gemessen. Über den Messverstärker *QuantumX* MX840B der Fa. *HBK* konnten die Messdaten zeitgleich im Messprogramm *catman EasyAP* aufgezeichnet, in Echtzeit visualisiert und nach dem Versuch ausgewertet werden.

Es wurden Zeitpläne erstellt, die eine genaue Taktung der Prüfkörperherstellung und der Dehnkörperversuche vorsahen. Auf diese Weise konnten die 28 Versuchsreihen à 4 Prüfkörper in den laufenden Betrieb der Firma FABRINO und der Versuchshalle der HBC eingeplant werden. Außerdem wurden zusätzliche Prüfungen an Referenzdehnkörpern ohne Bewehrung bei jeder 4. Betonage bzw. bei nur schwach bewehrten Prüfköpern vorgesehen. Auch die Begleitprismen nach DIN EN 196-1 [42] (6 Prismen je Betonagetag) zur Bestimmung und Kontrolle der Betoneigenschaften wurden in diesen Zeitplänen aufgelistet. Insgesamt wurden 136 Dehnkörper (einschließlich der unbewehrten Referenzkörper) und 72 Mörtelprismen im Zeitraum zwischen Dezember 2021 und April 2022 geprüft.

Abbildung 7: Spannvorrichtung zum Straffen der textilen Bewehrung vor der Betonage.

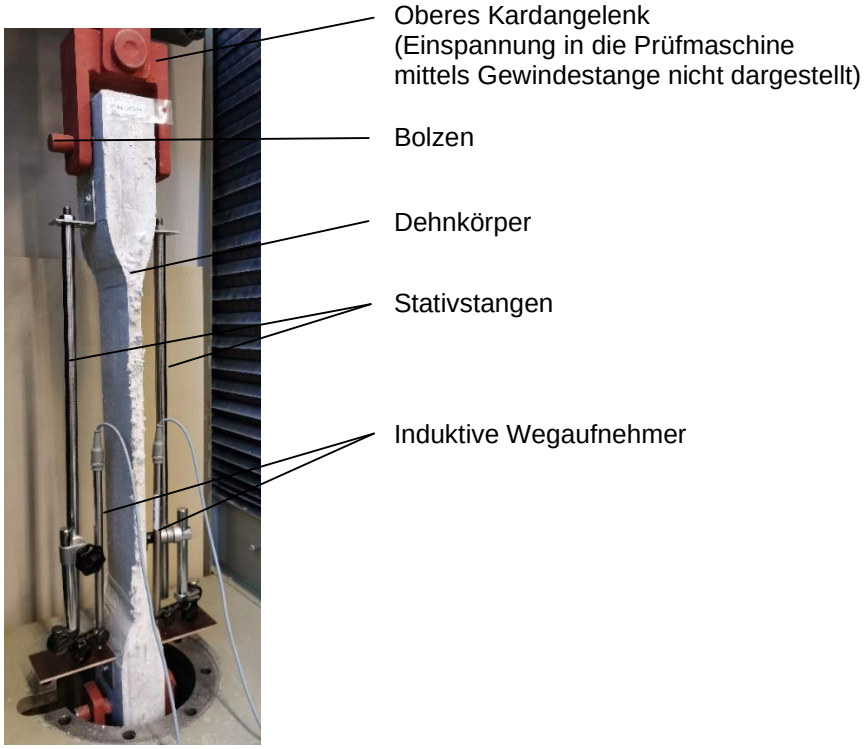


Abbildung 8: Aufbau des Zugversuchsstands.

3.2 Aufbau des Zugversuchsstandes

Wie in Abbildung 8 dargestellt ist der Zugversuchsstand so aufgebaut, dass über Gewindestangen die Kraft der Prüfmaschine in die Kardangelenke eingeleitet wird. Über einen Bolzen und eine einbetonierte Hülse an den Enden der Dehnkörper wird die Zugkraft schließlich in den Versuchskörper übertragen. Die Last wird von der Hülse zum Teil in den Beton und zum Teil direkt in die Lochbleche (vgl. Abbildung 6) eingeleitet. Die im Lochblech verbliebene Zugkraft wird direkt in das aufgeklebte Textil eingeleitet. Im Stegbereich des Dehnkörpers wird die Zugkraft (in den Rissbereichen) ausschließlich von der textilen Bewehrung abgetragen, so dass in den Stegbereichen das Zugtrag- und Verbundverhalten zwischen Beton und Textil untersucht werden konnte.

Die Befestigung der Wegaufnehmer erfolgte mittels Stativstangen, die an den einbetonierten Flügelmuttern befestigt wurden. Bei allen Versuchen konnte eine konstante Messlänge von 580 mm sichergestellt werden, da die Wegaufnehmer gegen Stahlwinkel maßen, die mit geringer Toleranz an den einbetonierten Flügelmuttern festgeschraubt wurden.

3.3 Herstellen der Dehnkörper (inkl. Lagerung)

Die Herstellung der Dehnkörper erfolgte in enger Zusammenarbeit der Firma FABRINO und der HBC gemäß dem erstellten Zeitplan (vgl. Abschnitt 3.1). Vor der Betonage wurden die Textilien auf die Lochbleche geklebt. Es wurden zwischen 12 und 16 Dehnkörper pro Tag hergestellt. Dabei konnten pro Betonagetag alle Dehnkörper und Begleitprismen aus einer Betonmischung hergestellt werden. Der verwendete Beton C5 war relativ fließfähig und verdichtete sich weitestgehend selbst. Um

Lufteinschlüsse zu vermeiden und sicherzustellen, dass die Textilien auch vollständig von der Betonmatrix umhüllt wurden, wurde der Beton zusätzlich auf einem Rütteltisch für ca. 10 Sekunden verdichtet.

Die Prüfkörper wurden nach einigen Stunden zur Betonnachbehandlung mit feuchten Tüchern und Folie abgedeckt. Am Tag nach der Betonage wurden die Dehnkörper und Begleitprismen ausgeschalt. Danach wurden die Prüfkörper zur Vermeidung einer unplanmäßigen frühen Rissbildung für 14 Tage im Wasserbad und anschließend für weitere 14 Tage im Klimaschrank (60 % rel. Luftfeuchte / 20 °C) gelagert. Die Prüfung fand am 28. Tag nach der Betonage statt.

3.4 Durchführung der Zugversuche

Die aus derselben Betoncharge hergestellten Begleitprismen wurden am Versuchstag zur Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit verwendet (vgl. Tabelle 2). Analog zur Herstellung der Dehnkörper wurden ebenfalls zwischen 12 und 16 Dehnkörper pro Tag geprüft.

Für die Zugprüfungen der Dehnkörper wurden diese kraftneutral in den Versuchsstand (Abbildung 8) eingebaut. In Anlehnung an vergleichbare Versuche mit Textilien aus synthetischen Fasern aus der Literatur (z.B. VOSS [14]) wurde zunächst mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min eine Prüfkraft von 1.000 N angefahren und anschließend mit einer Geschwindigkeit von 5 mm/min die Dehnkörper bis zum Bruch belastet. Durch das Aufbringen der Vorlast konnten bei der späteren Auswertung die Anfahreffekte der Prüfmaschine einfacher erkannt werden. Die Prüfgeschwindigkeit wurde im Vergleich zu ähnlichen Versuchen mit synthetischen Textilien auf 5 mm/min erhöht. Die Vorversuche und die Versuche mit unbeschichteten Flachsfasertextilien haben gezeigt, dass sich aufgrund des kleineren E-Moduls der Flachsfasergarne bei gleichen Dehnungen deutlich geringere Textilspannungen ergaben als in Dehnkörperversuchen aus der Literatur mit einer textilen Bewehrung aus Carbon- oder Glasfasern (z.B. [13]).

Wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, wurden während der Versuchsdurchführung die Kraft und die Axialverformung kontinuierlich mittels digitaler Messtechnik aufgezeichnet. Die Ergebnisse aller Dehnkörper sind detailliert im Anhang D.3 und D.4 aufgelistet.

3.5 Auswertung der Zugversuche

Ungetränkte Textilien

Für die Auswertung der Zugversuche wurden Kraft-Weg-Diagramme zum Vergleich der einzelnen Dehnkörperserien mit einer ungetränkten textilen Bewehrung erstellt [i],[iii]. In Abbildung 9 (a), (c), (e) sind die Verläufe für Textilien mit einem Schussfadenabstand von 8 mm und einem Abstand der Kettfäden von 10 mm sowie zwei Bewehrungslagen dargestellt. Die Feinheit der Schussfäden wurde mit 1000 tex, 1200 tex, und 1500 tex variiert. In Abbildung 9 (b), (d), (f) werden die Ergebnisse für dieselben Textilien allerdings bei einem dreilagigen Einbau gezeigt. Der Bewehrungsgehalt nimmt in Abbildung 9 also von oben nach unten und von links nach rechts zu, sodass in Abbildung 9 (a) die Ergebnisse für den kleinsten Bewehrungsquerschnitt von ca. 17,86 mm² und in Abbildung 9 (f) für den größten Textilquerschnitt von ca. 40,18 mm² dargestellt sind.

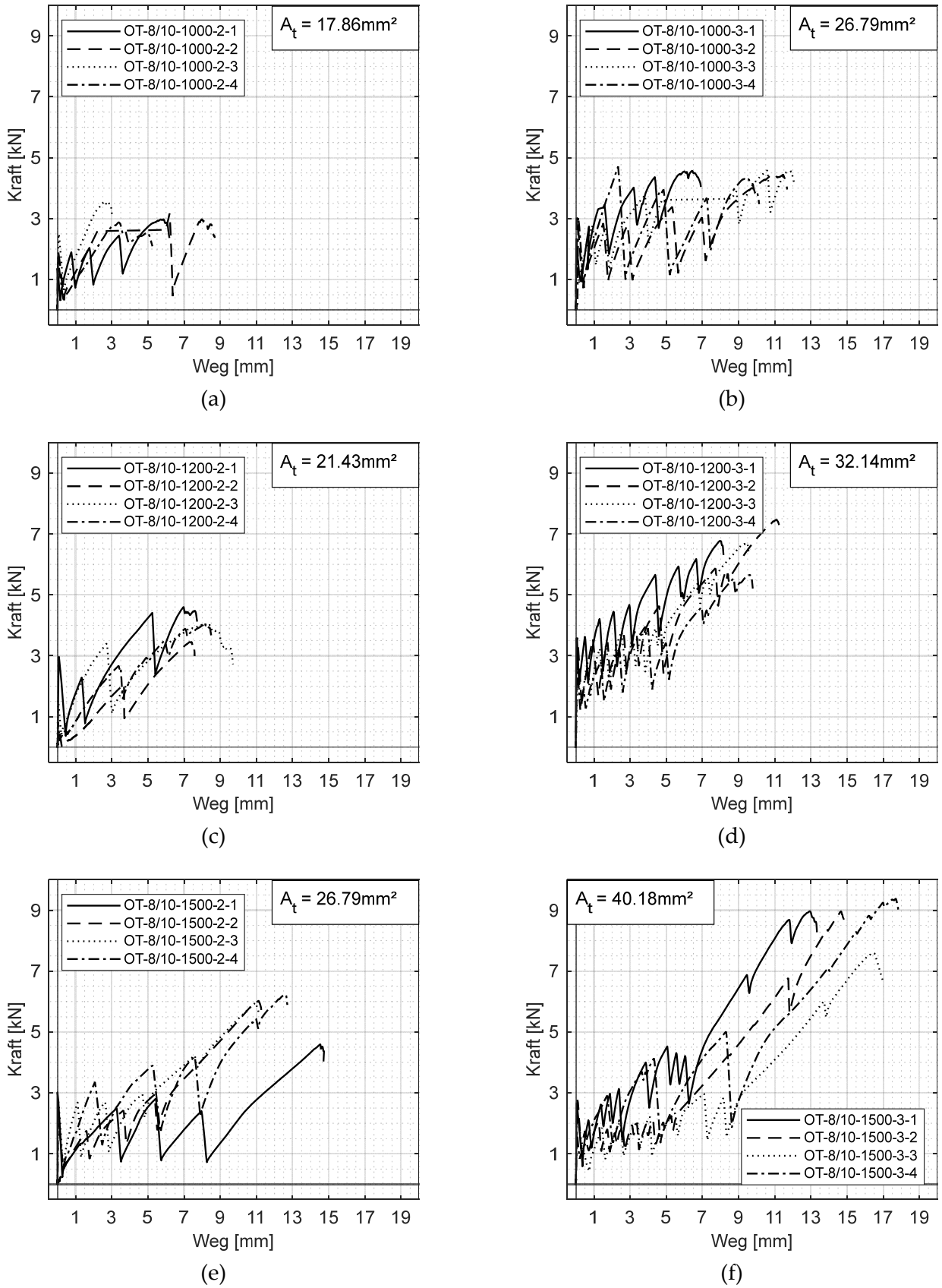


Abbildung 9: Kraft-Weg-Diagramme der Dehnkörper mit ungetränkten Textilien (8 mm Schussfadenabstand, 10 mm Kettfadenabstand, 1000 bis 1500 tex Feinheit der Schussfäden) mit 2 bzw. 3 Bewehrungslagen.

Bei hohen Bewehrungsgraden (Abbildung 9 (d)-(f)) ist eine deutliche Laststeigerung im Vergleich zu den unbewehrten Referenzdehnkörpern bzw. den unterbewehrten Dehnkörpern (siehe

Anhang D.2) zu erkennen. Die Kraft-Weg-Diagramme lassen sich in drei wesentliche Bereiche einteilen: Zustand I (*ungerissen*), Zustand IIa (*Erstrissbildung*) und Zustand IIb (*abgeschlossenes Rissbild*). Im Zustand I nimmt der noch ungerissene Betonquerschnitt die gesamte Zugbelastung auf, bis sich der erste Riss ausbildet und der Versuchskörper in den Zustand IIa übergeht. In diesem Zustand bilden sich nach und nach weitere Risse aus, was in den Diagrammen durch die sprunghaften Kraftabfälle zu erkennen ist. Es gibt im Zustand IIa in dem Bauteil somit immer noch Bereiche, in denen die Dehnung des Betons und des Bewehrungstextils gleich sind, so dass weitere Risse entstehen können. Es bilden sich so lange neue Risse aus, bis der Betonquerschnitt in regelmäßigen Abständen gerissen ist und in den Zustand IIb übergeht. Die aufgebrachte Spannung wird im Bereich der Risse vollständig vom Textil abgetragen, so dass die Spannungen größer als die Zugfestigkeit des Betons sein können. Im Zustand IIb überschreiten die in den Beton über Verbundkräfte eingeleiteten Spannungen an keinem Ort mehr die Betonzugfestigkeit, so dass keine weiteren Risse mehr entstehen können. Die Rissbreiten der vorhandenen Risse nehmen allerdings mit zunehmender Last weiter zu. Im gesamten Bauteil sind die Dehnungen des Betons und der Bewehrung unterschiedlich. Die Rissbildung ist somit abgeschlossen. Bei Erreichen der Bruchlast versagt das Textil spontan, wobei sich das Versagen zuvor durch eine große Anzahl an breiten, fein verteilten Rissen ankündigt.

Dieses Verhalten war bei den schwächer bewehrten Dehnkörpern (Abbildung 9 (a)-(c)) weniger stark ausgeprägt, sodass sich hier meist kein abgeschlossenen Rissbild ausbilden konnte. Diese Dehnkörper versagten im Allgemeinen vor dem Erreichen des Zustands IIb, wenn die Zugfestigkeit des Textils in einem Riss vorzeitig erreicht wurde. Dementsprechend war die Bruchlast bei diesen Dehnkörpern nur geringfügig höher als bei den unbewehrten Referenzdehnkörpern, welche mit einem einzelnen Versagensriss auf einem Bruchlastniveau zwischen 1,5 und 3 kN (entspricht in etwa dem Erstrissniveau der bewehrten Dehnkörper) sehr spröde versagten (vgl. Anhang D.2).

Die weiteren Kraft-Weg-Diagramme der Dehnkörper mit ungetränkten Textilien sowie die Diagramme der unbewehrten Referenzdehnkörper sind im Anhang dieses Berichts (Abbildungen D-2 und D-3) zu finden. Die Diagramme, die in Abbildung 9 dargestellt sind, sollen die Laststeigerung durch die Bewehrung im Vergleich zu unbewehrten bzw. schwach bewehrten Dehnkörpern exemplarisch für die weiteren Versuchsreihen verdeutlichen.

Bei unterschiedlichen Abständen der Kettfäden war zu beobachten, dass sich in den beiden untersuchten Fällen ein abgeschlossenes Rissbild ausbilden konnte und es zu einer deutlichen Laststeigerung über das Niveau der unbewehrten bzw. unterbewehrten Dehnkörper kam (Abbildung 10). Das lässt darauf schließen, dass beide Dehnkörperserien ausreichend hoch bewehrt waren. Das Bruchlastniveau war bei den Dehnkörpern mit Textilien mit einem Kettfadenabstand von 10 mm höher als bei den Versuchskörpern, die mit Textilien mit einem Abstand in Kettfadenrichtung von 15 mm bewehrt waren. Zwar weisen die Textilien mit einem größeren Kettfadenabstand prinzipiell eine geringere Vorschädigung auf als solche mit einem kleineren Abstand der Kettfäden, es ist allerdings davon auszugehen, dass die geringere Verschiebefestigkeit der Gewebe mit einem größeren Kettfadenabstand, den lagegenauen Einbau der Textilien erschwerte, sodass die erwartete Laststeigerung nicht beobachtet werden konnte.

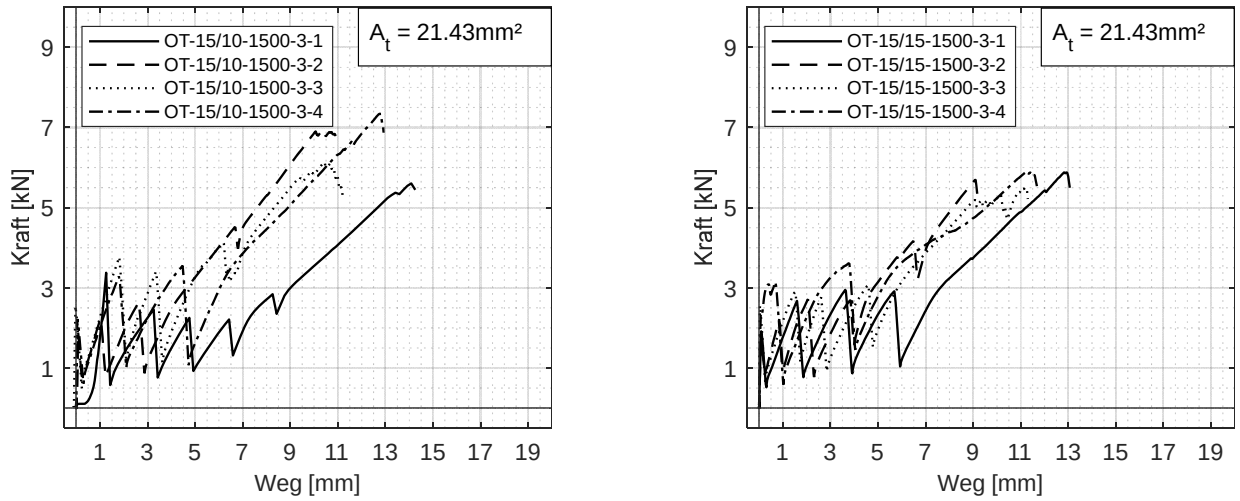


Abbildung 10: Kraft-Weg-Diagramme der Dehnkörper mit ungetränkten Textilien (15 mm Schussfadenabstand, 10 mm (a) bzw. 15 mm (b) Kettfadenabstand, 1500 tex Feinheit der Schussfäden) mit 3 Bewehrungslagen.

Getränkte Textilien

Analog zu den Dehnkörperversuchen mit ungetränkten Textilien sind auch Kraft-Weg-Diagramme aus den Messdaten der Versuche mit getränkten Textilien erstellt worden [ii],[iv]. Für einen einfacheren Vergleich wurden die gleichen Versuche wie zuvor für Abbildung 9 ausgewählt. Der einzige Unterschied ist, dass diesmal Versuche mit einer getränkten Bewehrung betrachtet werden. In Abbildung 11 (a), (c), (e) sind ebenfalls die Verläufe die sich für Textilien mit einer Öffnungsweite von 8 mm (Schussfäden) bzw. 10 mm (Kettfäden) bei unterschiedlichen Feinheiten der Schussfäden (1000 tex, 1200 tex, 1500 tex) ergaben dargestellt. Die Versuchskörper waren dabei jeweils mit zwei Bewehrungslagen versehen. In Abbildung 11 (b), (d), (f) werden die Ergebnisse derselben Textilien bei Anordnung von drei Bewehrungslagen gezeigt. Analog zu Abbildung 9 nimmt der Bewehrungsquerschnitt von oben nach unten sowie von links nach rechts zu, wobei die jeweils vorhandenen Querschnittswerte der textilen Bewehrung in den Diagrammen vermerkt sind.

Ähnlich wie bei den ungetränkten war auch bei den getränkten Textilien eine Laststeigerung gegenüber den unbewehrten oder unterbewehrten Referenzdehnkörpern (s. Anhang D.2) zu erkennen. Eine Einteilung der Kurvenverläufe in die drei wesentlichen Risszustände (Zustand I, Zustand IIa, Zustand IIb) war ebenfalls in den meisten Fällen möglich. Mit zunehmenden Bewehrungsgraden waren die verschiedenen Risszustände deutlicher ausgeprägt. Die Dehnkörper mit einem relativ kleinen Bewehrungsquerschnitt versagten auch bei einer getränkten textilen Flachsfaserbewehrung vor dem Erreichen des Zustands IIb. Es konnte sich somit kein abgeschlossenes Rissbild einstellen und das Bruchlastniveau lag nur unwesentlich über dem der unbewehrten Referenzdehnkörper.
Anders als bei den Versuchen mit ungetränkten Textilien zeigten die Versuche mit getränkten Textilien im Hinblick auf den Einfluss des Kettfadenabstands das erwartete Verhalten (Abbildung 12). Die Dehnkörper mit einem größeren Kettfadenabstand konnten eine etwas größere Traglast erreichen, da bei diesen Textilien die herstellungsbedingte Vorschädigung durch die Kettfäden geringer war als bei den Textilien mit kleineren Kettfädenabständen. Da die getränkten Textilien insgesamt deutlich formstabiler als die ungetränkten Textilien waren, konnten die Bewehrungslagen unabhängig vom Kettfadenabstand deutlich lagesicherer in die Dehnkörper eingebaut werden. Dementspre-

chend konnte bei den aufgrund der größeren Kettfadenabständen weniger vorgeschädigten Textilien die erwartete Laststeigerung beobachtet werden.

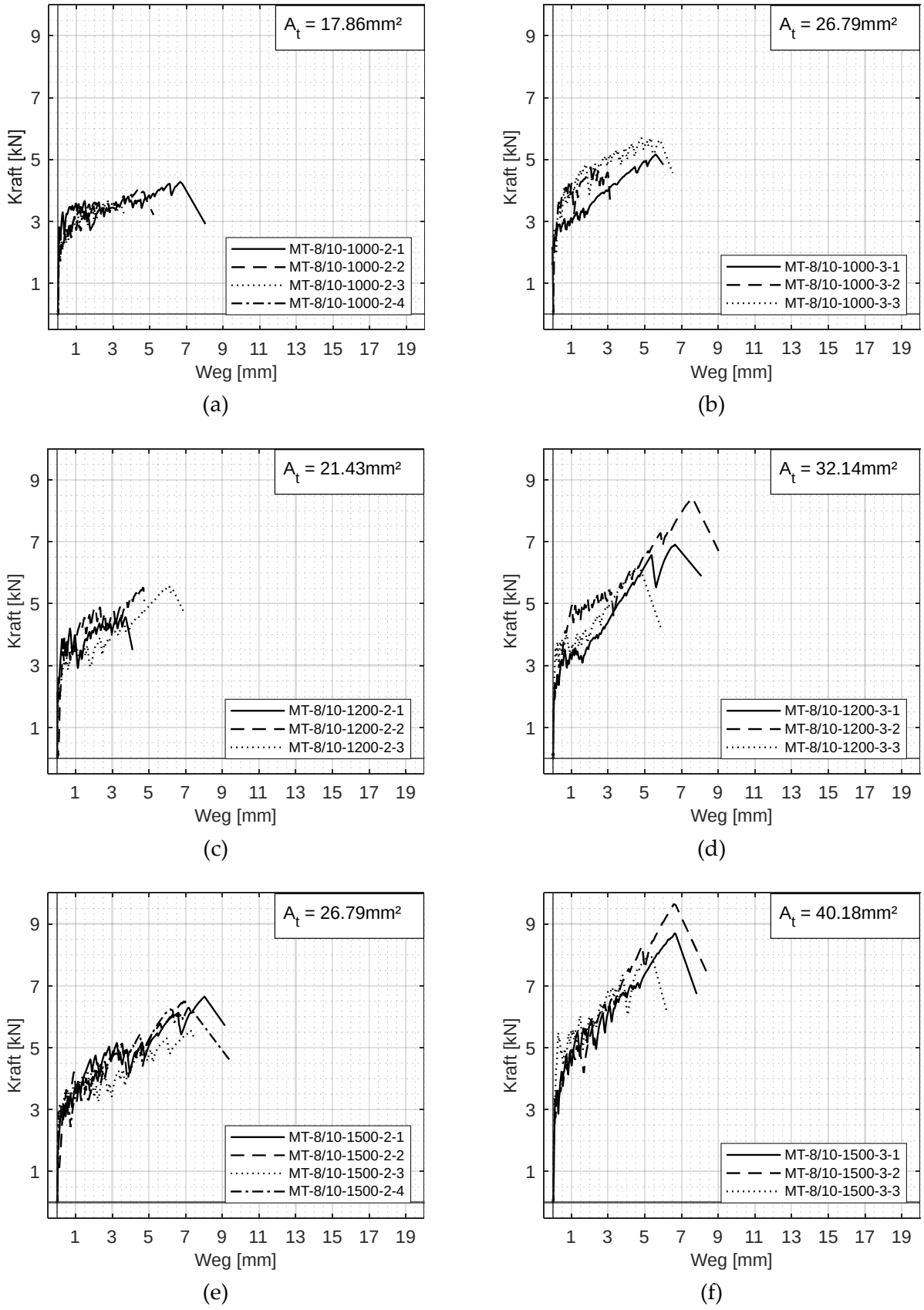
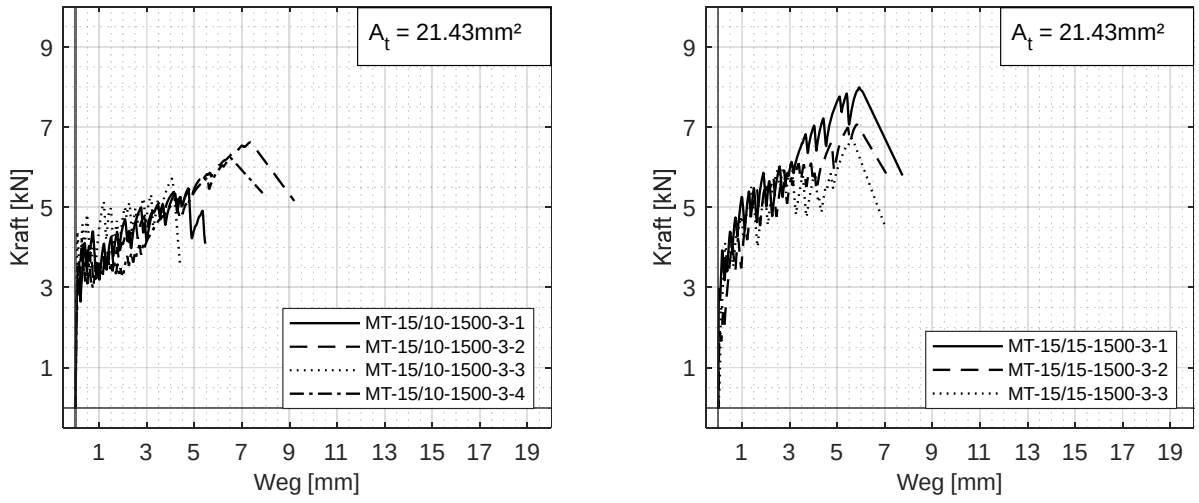


Abbildung 11: Kraft-Weg-Diagramme der Dehnkörper mit getränkten Textilien (8 mm Schussfadenabstand, 10 mm Kettfadenabstand, 1000 bis 1500 tex Feinheit der Schussfäden) mit 2 bzw. 3 Bewehrungslagen.



(a) (b)

Abbildung 12: Kraft-Weg-Diagramme der Dehnkörper mit getränkten Textilien (15 mm Schussfadenabstand, 10 mm (a) bzw. 15 mm (b) Kettfadenabstand, 1500 tex Feinheit der Schussfäden) mit 3 Bewehrungslagen.

Aus dem Vergleich der Ergebnisse der Dehnkörper mit getränkten und ungetränkten Textilien ergeben sich folgende weitere Beobachtungen: Zum einen war die Rissbildung der Dehnkörper mit einer getränkten Textilbewehrung deutlich ausgeprägter, was zu einem sehr fein verteilten Rissbild führte, dessen Risse alle eine ähnliche Breite aufwiesen. Bei Dehnkörpern mit großen Bewehrungsquerschnitten (ab etwa 32,14 mm²) stellten sich über die gesamte Dehnlänge verteilte Risse mit einem durchschnittlichen Rissabstand von etwa 1 cm ein.

Zum anderen lag die Bruchlast bei den Dehnkörpern mit getränkten Textilien über der Versagenslast der Dehnkörper mit denselben Textilien ohne Tränkung (vgl. z.B. Abbildung 9 (d): durchschnittliche Versagenslast=6,65 kN, Abbildung 11 (d): durchschnittliche Versagenslast=7,18 kN). An dieser Stelle sei angemerkt, dass einige der Dehnkörper vorzeitig im Bereich der Stegaufweitungen gerissen sind und nicht wie geplant in der freien Dehnlänge versagten. Im Anhang D.4 ist dies für die einzelnen Dehnkörper entsprechend vermerkt.

Des Weiteren waren die gemessenen Verformungen in axiale Richtung bei der Verwendung von getränkten Textilien deutlich geringer als bei ungetränkten Textilien. Beispielsweise versagten die Dehnkörper in Abbildung 11 (f) mit einer getränkten Bewehrung bereits bei einer Verformung von etwa 5-7 mm, wohingegen bei den äquivalenten Dehnkörpern mit ungetränkten Textilien bei einer Verformung dieser Größenordnung erst der Übergang von Zustand IIa zu IIb stattfand. Die Dehnkörper mit einer ungetränkten Bewehrung versagten schließlich bei etwa 10-13 mm axialer Verformung (Abbildung 9 (f)). Dieses Verhalten ist darauf zurückzuführen, dass durch die Tränkung die Garne besser in der Betonmatrix aktiviert werden und diese somit bereits geringere Zugkräfte abtragen können als ungetränkte Textilien. Der Grund dafür ist die Verbesserung des inneren Verbunds der Garne durch die Tränkung, da neben dem Ausgleich von (herstellungsbedingten) Schädigungen einzelner Fasern vor allem auch der Garnquerschnitt durch die Tränkung homogenisiert wird. Dadurch tragen nicht nur die äußeren Fasern durch direkten Kontakt zum Beton Spannungen ab, sondern es können auch die inneren Fasern aktiviert und somit besser am Spannungsabtrag beteiligt werden.

3.6 Diskussion und Rückspiegelung der Ergebnisse der Dehnkörperversuche und ggf. Anpassung der Gewebe

Die Auswertungen (vgl. Abschnitt 3.5) der Zugversuche an Dehnkörpern mit einer Bewehrung aus getränkten Textilien zeigten, dass diese gegenüber den Dehnkörpern mit einer vergleichbaren ungetränkten Textilbewehrung ein deutlich verbessertes Verbund- und Zugtragverhalten aufweisen: Das Rissbild war deutlich feiner verteilt und die Bruchlasten waren größer [ii]. Auch im Hinblick auf das Arbeitspaket AP 6 (Bau der Demonstratoren und Probeeinbau Randbewehrung), für das ein möglichst dauerhaftes Textil zwingend erforderlich war, wurden im weiteren Projektverlauf nur noch getränkte Textilien in den Untersuchungen (z.B. für die Biegeversuche an Plattenstreifen) verwendet.

Da rechnerisch bei den Biegeversuchen bereits mit den Textilien, die im Rahmen der Dehnkörperversuche nur geringe Laststeigerungen ermöglichten, eine Laststeigerung und das gewünschte Bruchverhalten erreicht werden kann, wurden diese Textilien mit einer Tränkung versehen und ebenfalls für die Biegeversuche verwendet. Mit den in den vorangehenden Arbeitsschritten bestimmten Materialkennwerten konnten zudem die voraussichtlichen Bruchlasten der Biegeversuche bereits im Vorfeld besser abgeschätzt werden. Diese Untersuchungen ergaben, dass eine Änderung der Textilien für die Biegeversuche nicht nötig war.

3.7 Planung der Biegeversuche (Entwicklung des Versuchsstandes, Erstellung von Schal-, Bewehrungs- und Messtechnikplänen)

Die Biegeversuchskörper wurden in Anlehnung an die Versuche von KULAS [12] entwickelt [v]. Die Geometrie der Plattenstreifen wurde im Rahmen von Tastversuchen für die verwendeten Naturfasertextilien optimiert. Für die Plattenstreifen erwiesen sich dabei Abmessungen von $l \times b \times h$ = 600 mm × 125 mm × 30 mm als geeignet (vgl. Abbildung 13). Die Biegekörper wurden dabei auf der späteren Oberseite liegend im Laminierverfahren hergestellt. Da die Textilien nur mit einer Länge von 50 cm in Schussfadenrichtung hergestellt werden konnten, wurden die seitlichen, herstellungsbedingten Überstände der Gewebe in der Schalung eingeklemmt und die Bewehrung somit fixiert und in ihrer Lage gesichert. Wie in Abbildung 13 zu erkennen ist, wurde die Bewehrung exzentrisch angeordnet, sodass sich für die Versuche eine statische Nutzhöhe von etwa d=20 mm ergab. Diese wurde nach der Versuchsdurchführung durch ein Aufsägen der Platten überprüft und entsprechend bei der Entwicklung der Tragmodelle (AP 6) berücksichtigt.

Der Versuchsstand sah eine lichte Weite zwischen den Auflagern von 50 cm vor, sodass im belasteten Bereich des Plattenstreifens vollständige Textilien mit Kettfäden vorlagen und die Fadenüberstände nur in den unbelasteten, auskragenden Endbereichen vorhanden waren. Die entsprechenden Gewebe wurden auf eine Probengröße von 500 mm plus Webkante × 120 mm zugeschnitten und im Anschluss wie in Abschnitt 2.2 beschrieben beschichtet.

Eine spezielle Konstruktion für eine optimierte Lasteinleitung, wie diese bei den Dehnkörperversuchen benötigt wurde, war für die Biegeversuche nicht notwendig. Auch ein Vorspannungsmechanismus für die in die Schalung eingebauten Gewebe war nicht erforderlich, da die getränkten Textilien weitaus formstabiler waren als die ungetränkten Gewebe. Zudem stellte die Klemmung der Bewehrung in der Schalung während der Betonage die genaue Lage der Gewebe sicher. Für die

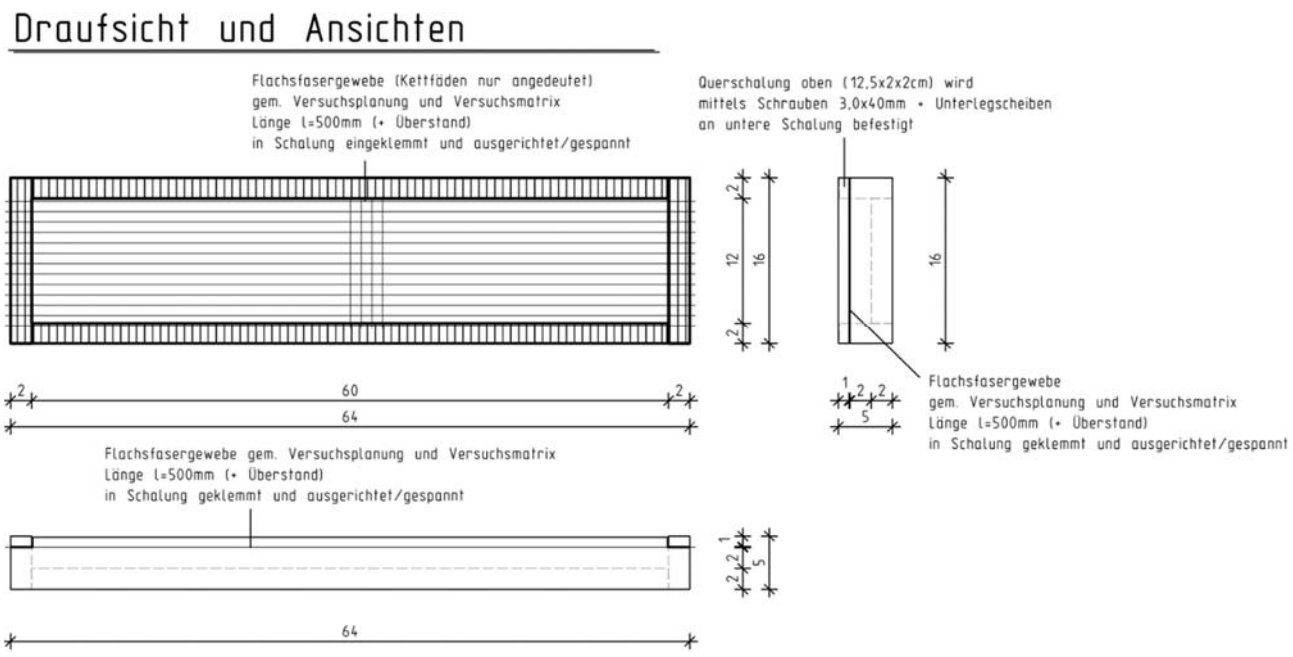


Abbildung 13: Draufsicht und Ansicht der Biegekörperschalung in (cm), M1:5.

Befestigung der Messtechnik während der Versuchsdurchführung wurden keine zusätzlichen Befestigungselemente einbetoniert, da diese im Versuchsstand installiert werden konnte. Die gelenkige und weitgehend zwangfreie Lagerung der Plattenstreifen während des 4-Punkt-Biegeversuchs wurde durch die Kalotten der Universalprüfmaschine bzw. durch die verwendeten Rollenlager sichergestellt (vgl. Abschnitt 3.8). Der 4-Punkt-Biegeversuch wurde ausgewählt, da im Gegensatz zum 3-Punkt-Biegeversuch in Feldmitte zwischen den beiden Einzellasten keine Querkraft wirkt und somit ein reines Biegetragverhalten untersucht werden kann.

Während der Versuche wurden die Kraft, die Dehnung der Betondruckzone, die vertikale Verformung in Plattenmitte sowie die horizontalen Verformungen der unteren Randfaser der Platte kontinuierlich aufgezeichnet. Dazu wurde die digitale Messtechnik der *Versuchshalle für Baustoff- und Bauteilprüfung* der HBC genutzt. Die aufgebrachte Kraft wurde mit der in der Universalprüfmaschine der Fa. *Zwick GmbH & Co. KG* eingebauten Kraftmessdose bestimmt. Die vertikalen Verformungen wurden durch einen induktiven Wegaufnehmer (Fa. *HBM, WA/50mm*) und die horizontalen Verformungen mit einem potentiometrischen Wegtaster (Fa. *Novotechnik, TR-100*) aufgezeichnet. Die Stauchungen der Betondruckzone wurden durch einen zentrisch auf der Plattenoberseite angeordneten Dehnmessstreifen mit einer Messgitterlänge von 50 mm der Fa. *HBM* (Typ 1-LY41-50/120) aufgenommen. Durch den Messverstärker *Quantum X MX840B* der Fa. *HBM* wurden die Messdaten zeitsynchron im Messprogramm *catman EasyAP* dargestellt und konnten nach dem Versuch gespeichert und ausgewertet werden.

3.8 Aufbau des Biegeversuchsstandes

Es wurden 4-Punkt-Biegeversuche mit einer lichten Spannweite von 50 cm durchgeführt (vgl. Abbildung 14). Für die Lasteinleitung sowie die Auflager wurden in Querrichtung gelenkig gelagerte Rollenlager verwendet. Die Prüfmaschine verfügte darüber hinaus am oberen Prüfstempel über eine

Kalotte, die in Längs- und Querrichtung gelenkig angeordnet war. Es konnte somit sichergestellt werden, dass die Plattenstreifen weitgehend zwängungsfrei gelagert waren.

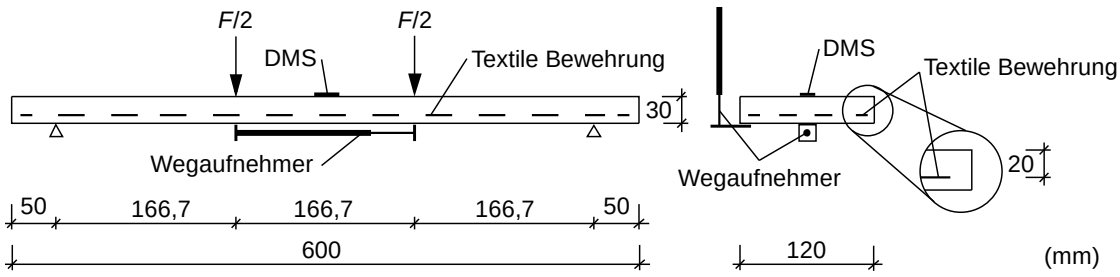


Abbildung 14: Schematischer Versuchsaufbau der 4-Punkt-Biegeversuche.

Die Lasteinleitung erfolgte in den Drittelspunkten der Plattenstreifen, also nach jeweils 16,7 cm von den Auflagern aus gemessen. Es wurden Filzstreifen zwischen der Betonoberfläche und den Metallrollen eingelegt, um punktuelle Spannungsspitzen zu vermeiden und eine gleichmäßige Lasteinleitung in den Betonquerschnitt sicherzustellen.

Der horizontale Wegaufnehmer (Messlänge = 16,7 cm) an der Plattenunterseite ist über angeklebte Winkel bzw. Holzklötze befestigt worden (vgl. Abbildung 15). Dabei wurde ein handelsüblicher Montagekleber verwendet.

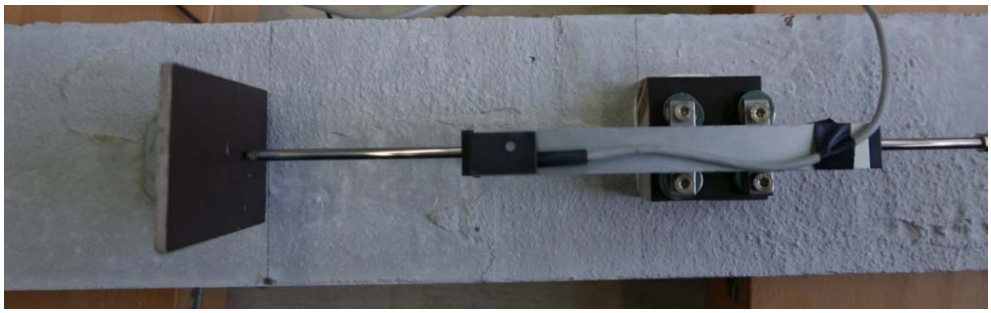


Abbildung 15: Befestigung des horizontalen Wegaufnehmers an der Plattenunterseite.

Der vertikale Wegaufnehmer zur Messung der Durchbiegung in Plattenmitte wurde mittels eines Magnetstativs auf dem Tisch der Prüfmaschine fixiert. Der Dehnmessstreifen ($l = 50$ mm) an der Oberseite der Platte wurde fachgerecht in 3-Leitertechnik mit dem dafür vorgesehenen Zwei-Komponentenkleber *X 60* der Fa. *HBM* installiert. Der in Abbildung 16 dargestellte Versuchsstand stellt die Anordnung der Komponenten exemplarisch für die Versuche dar.

3.9 Herstellen der Prüfkörper (inkl. Lagerung)

Die Herstellung der Plattenstreifen für die Biegeversuche erfolgte in Zusammenarbeit der Firma FABRINO und der HBC. Vor der Betonage wurden die Textilstreifen entsprechend zugeschnitten, sodass eine reibungslose Betonage sichergestellt werden konnte. Pro Tag wurden etwa 8 Plattenstreifen hergestellt, sodass an einem Betonagetag aus derselben Mischung die Plattenstreifen und die Begleitprismen hergestellt werden konnten. Der verwendete Beton C6 war verglichen mit dem Beton C5 der Dehnkörperversuche etwas viskoser und wurde daher auf einem Rütteltisch verdichtet. Für das zur Herstellung der Plattenstreifen verwendete Laminierverfahren eignete sich diese Konsistenz sehr gut.

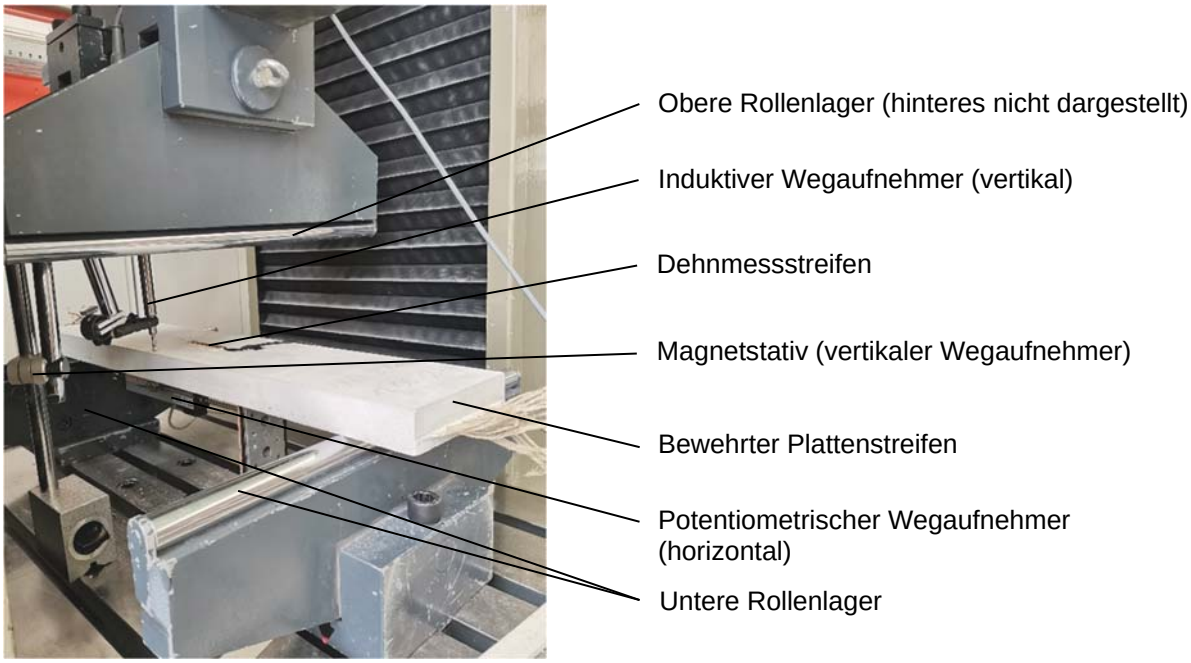


Abbildung 16: Aufbau des 4-Punkt-Biegeversuchstands vor der Prüfung.

Obwohl bei den Vorversuchen keine Schwierigkeiten mit Schwindrissen innerhalb der ersten 48 h auftraten, wurden die Prüfkörper vorsorglich nach der Betonage mit feuchten Tüchern und Folie abgedeckt. Am Tag nach der Betonage wurden die Plattenstreifen und Begleitprismen ausgeschalt und für 14 Tage im Wasserbad gelagert. Danach wurden die Prüfkörper bis zur Prüfung (nach 28 Tagen) für weitere 14 Tage im Klimaschrank bei konstanten Bedingungen (60 % rel. Luftfeuchte / 20 °C) gelagert.

3.10 Durchführung der Biegeversuche

Die Begleitprismen wurden am selben Tag wie die dazugehörigen Plattenstreifen aus derselben Betoncharge geprüft, um die Biegezug- und Druckfestigkeit des Betons zu bestimmen (DIN EN 196-1 [42], vgl. Tabelle 3). Analog zu der Anzahl der an einem Tag hergestellten Biegeversuchskörper konnten ebenfalls etwa 8 Plattenstreifen pro Tag geprüft werden.

Für die 4-Punkt-Biegeprüfung wurden die Plattenstreifen zusammen mit der Messtechnik in den Versuchsstand (Abbildung 16) eingebaut. In Anlehnung an vergleichbare Versuche mit Textilien aus synthetischen Fasern aus der Literatur (z.B. KULAS [12], REMPEL [47]) wurde die Belastung weggesteuert mit einer konstanten Geschwindigkeit von 3 mm/min bis zum Versagen der Plattenstreifen aufgebracht.

3.11 Auswertung der Biegeversuche und ggf. Anpassung der Gewebe

Zur Auswertung der Biegeversuche wurden Moment-Verformungs-Diagramme, Spannungs-Dehnungs-Diagramme sowie Diagramme zur Darstellung der Dehnungsebenen erstellt. In den Moment-Verformungs-Diagrammen wurde das aufgebrachte Moment über der dazugehörigen Durchbiegung in Feldmitte aufgetragen. Die Versuchsergebnisse aller Plattenstreifen sind im Anhang E.4 detailliert dargestellt. Als Referenz ist das mittlere, experimentell bestimmte Bruchmoment der unbewehrten Plattenstreifen strichliniert eingezeichnet (Beschreibung der Einzelversuche an den un-

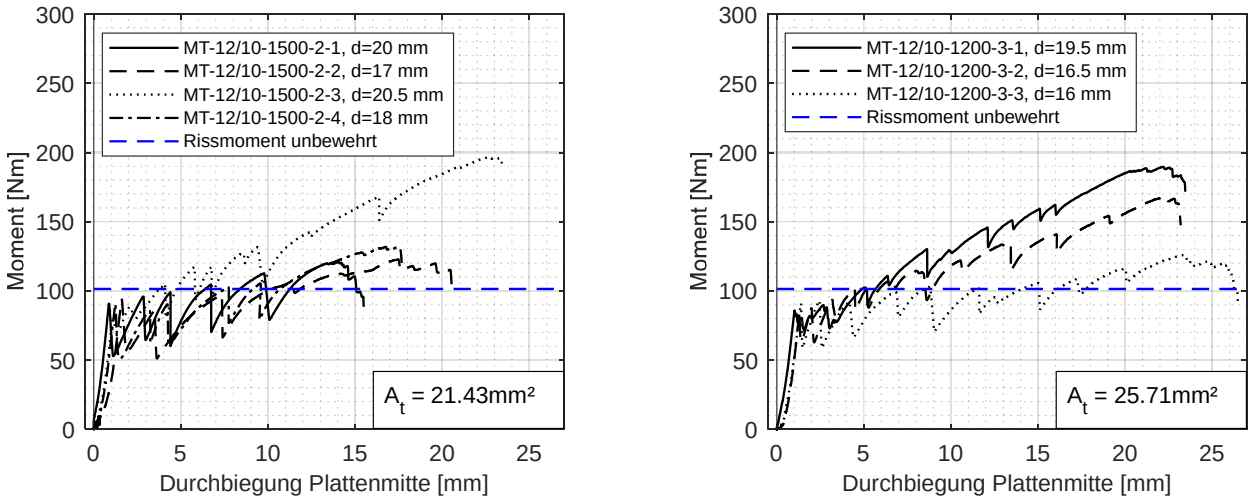


Abbildung 17: Moment-Verformungs-Diagramme von Biegeversuchen mit Erreichen des Zustandes IIb (abgeschlossenes Rissbild) bei einem Bewehrungsgrad von 21,43 mm² (a) und 25,71 mm² (b).

bewehrten Referenzkörpern siehe Anhang, Abschnitt E.2). Bei allen Versuchen lässt sich beobachten, dass sich ähnlich wie bei den Dehnkörperversuchen die Zustände I (ungerissener Querschnitt) und IIa (Erstrissbildung) einstellten. Bei entsprechend höher bewehrten Versuchskörpern (ab 21,43 mm² bzw. 25,71 mm²) bildete sich außerdem der Zustand IIb (abgeschlossenes Rissbild) aus (Abbildung 17). Bei diesen Plattenstreifen konnte die Traglast im Vergleich zu unbewehrten oder unterbewehrten Plattensteifen signifikant gesteigert werden. Bei allen Versuchen stellten sich außerdem fein verteilte Rissbilder ein (vgl. Anhang E.4), was auf einen effektiven Verbund zwischen Betonmatrix und Bewehrung schließen lässt.

In den Spannungs-Dehnungs-Diagrammen wurde die Textilspannung über der Randdehnung am unteren Rand des Plattenstreifens aufgetragen. Die Dehnung wurde aus der mittels des horizontal angebrachten Wegaufnehmers an der Plattenunterseite gemessenen Verformung berechnet. Für

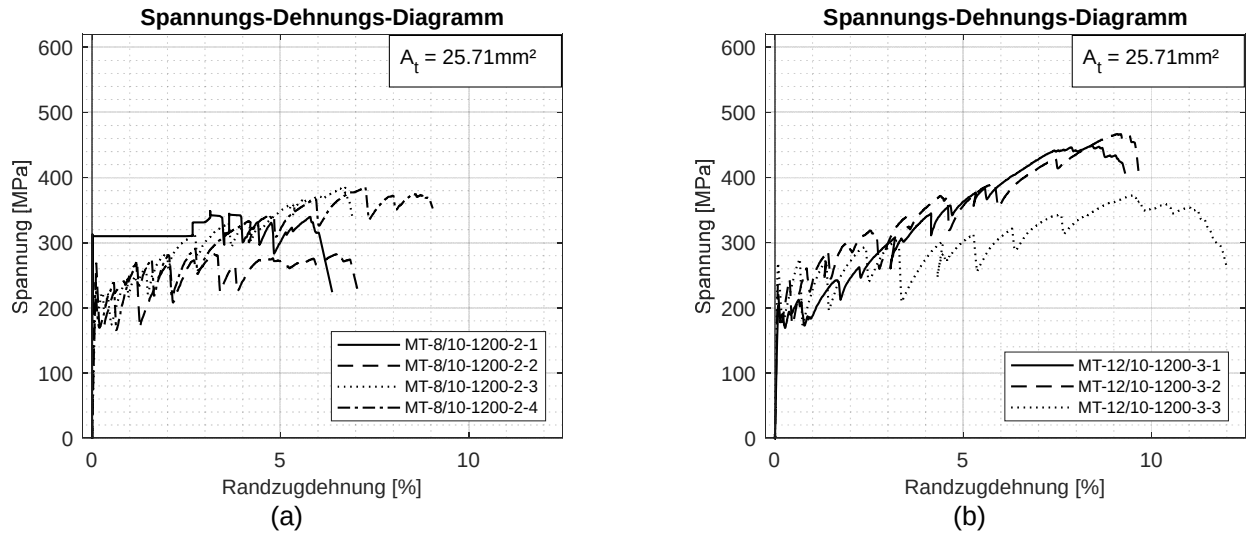


Abbildung 18: Spannungs-Dehnungs-Diagramme von Biegeversuchen mit gleichen Bewehrungsquerschnitten bei zweilagigem (a) und dreilagigem (b) Textilbewehrungseinbau.

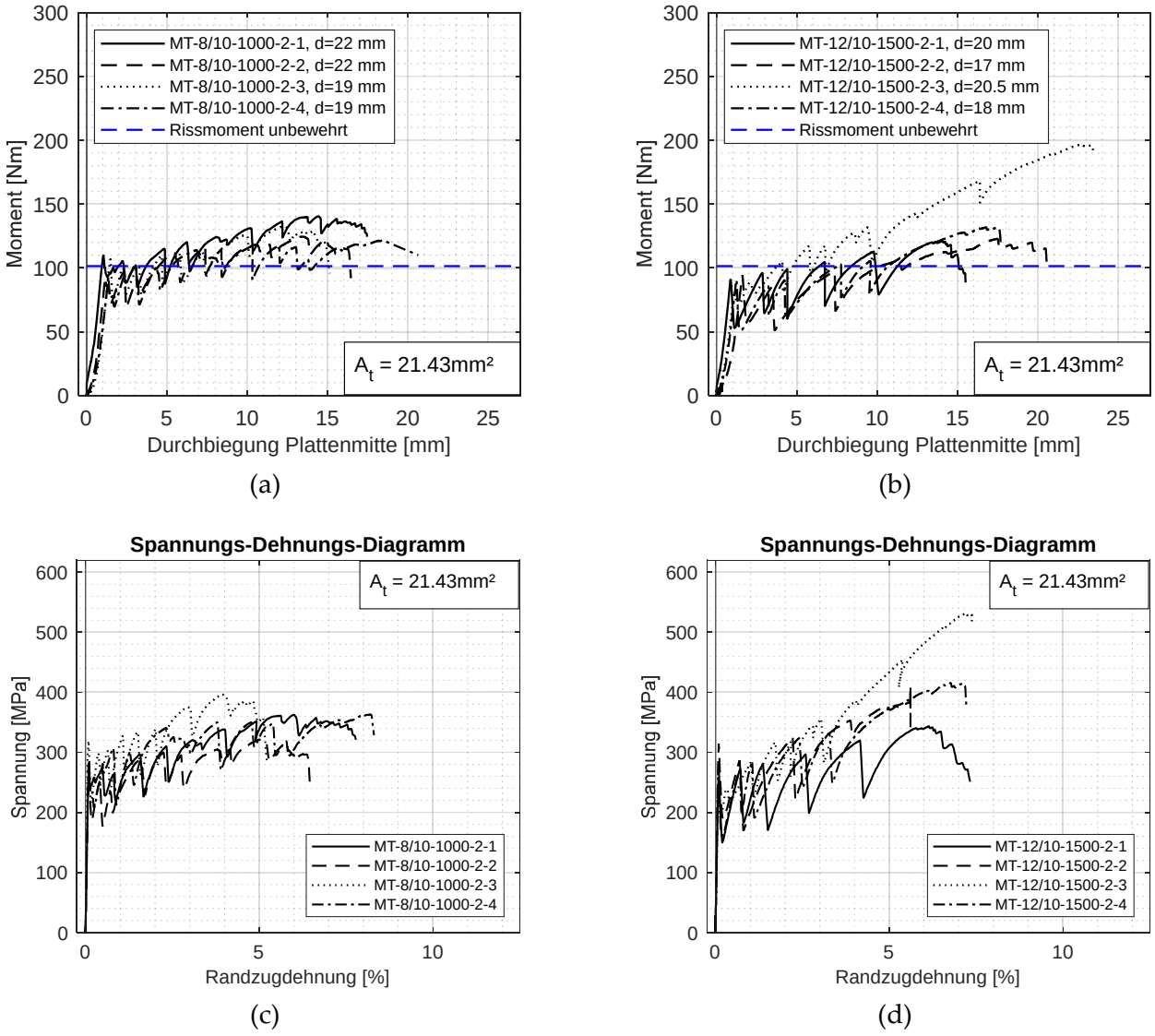


Abbildung 19: Moment-Verformungs-Diagramme von Biegeversuchen mit gleichen Bewehrungsquerschnitten bei 1000 tex (a) und 1500 tex (b) Schussfadenfeinheit sowie die dazugehörigen Spannungs-Dehnungs-Diagramme mit 1000 tex (c) und 1500 tex (d) Schussfadenfeinheit.

die Berechnung wurde der tatsächlich eingebaute Bewehrungsquerschnitt A_t sowie die an dem jeweiligen Versuchskörper nachgemessene Plattendicke h und statische Nutzhöhe d verwendet. Der innere Hebelarm z wurde zu $0{,}9d$ abgeschätzt. Es wurden Textilspannungen zwischen ca. 280 MPa und 590 MPa ermittelt, wobei sich bei größeren Bewehrungsquerschnitten tendenziell auch höhere Spannungen ergaben. Aus den Versuchen lassen sich folgende wesentliche Aussagen treffen: Zum einen ergab sich, wie bereits erwähnt, ab einem entsprechend hohen Bewehrungsquerschnitt eine deutliche Traglaststeigerung und es konnte ein abgeschlossenes Rissbild (Zustand IIb) erreicht werden. Zum anderen führte bei gleichem Bewehrungsquerschnitt die Verwendung von drei Lagen Bewehrung zu größeren Bruchmomenten und somit auch zu höheren Bruchspannungen (vgl. Abbildung 18).

Weiter ergaben sich bei ebenfalls gleichen Bewehrungsquerschnitten keine wesentlichen Nachteile durch eine Variation der Feinheit der Schussfäden. Wie Abbildung 19 zeigt, ergaben sich bei

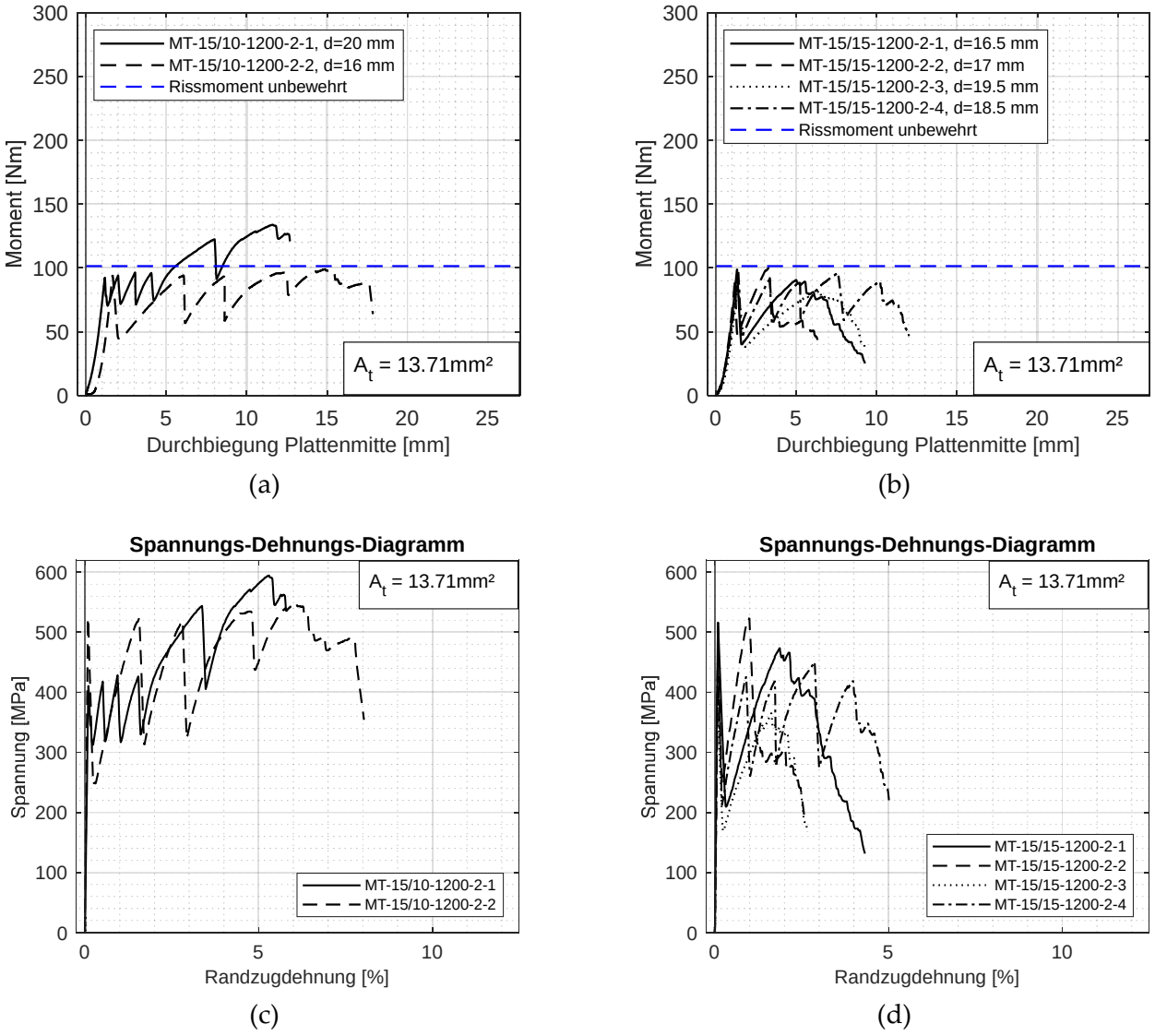


Abbildung 20: Moment-Verformungs-Diagramme von Biegeversuchen mit gleichen Bewehrungsquerschnitten bei 10 mm (a) und 15 mm (b) Kettfadenabstand sowie die dazugehörigen Spannungs-Dehnungs-Diagramme mit 10 mm (c) und 15 mm (d) Kettfadenabstand.

gleichem Bewehrungsquerschnitt unabhängig von der Feinheit der Schussfäden ähnliche Ergebnisse: Bei der Verwendung von Schussfäden mit einer Feinheit von 1000 tex konnte ein vergleichbares Versagensmoment wie bei Schussfäden mit einer Feinheit von 1500 tex erreicht werden. Die ermittelten Textilspannungen lagen in beiden Fällen ebenfalls in einem ähnlichen Bereich. Diese Beobachtungen lassen darauf schließen, dass die 1.500 tex-Schussfäden zwar im Vergleich zum gesamten Querschnitt eine kleinere Oberfläche haben als die 1.000 tex-Garne, diese aber noch ausreichend groß ist, um den Verbund zwischen der Betonmatrix und dem Garn sicherzustellen. Die Feinheit hat also im betrachteten Bereich von 1000 tex bis 1500 tex keinen signifikanten Einfluss auf das Bruchmoment und die erreichte Textilspannung. Für andere Feinheiten (<1000 tex und >1500 tex) kann im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen keine Aussage getroffen werden.

Zum Einfluss der unterschiedlichen Abstände der Kettfäden kann ebenfalls keine eindeutige Aussage getroffen werden. Die Dehnkörperversuche zeigten, dass die Traglast bzw. Bruchspan-

nung bei getränkten Textilien durch die Verwendung von größeren Kettfädenabständen erhöht werden kann (vgl. Abschnitt 3.5). Dieses Verhalten konnte jedoch durch die Biegeversuche nicht eindeutig bestätigt werden, da der eingebaute Textilquerschnitt in den beiden untersuchten Versuchsserien zu klein war. Die Moment-Verformungs-Diagramme zeigen deutlich, dass keine wesentliche Laststeigerung über das Niveau der unbewehrten Referenzkörper hinaus möglich war und sich somit auch kein abgeschlossenes Rissbild ausbilden konnte (vgl. Abbildung 20). Eine Anpassung der Gewebe zur Optimierung der Tragfähigkeit war für den weiteren Projektverlauf nicht erforderlich.

3.12 Diskussion und Rückspiegelung der Ergebnisse der Biegeversuche

Anhand der Biegeversuche konnten wesentliche Aussagen abgeleitet werden, die mit den Erkenntnissen aus den Dehnkörperversuchen gut übereinstimmten bzw. die für die Zugversuche getroffenen Aussagen unterstützten. Außerdem konnte gezeigt werden, dass mit einem entsprechend hohen (verglichen mit Stahlbetonbauteilen aber immer noch geringen) Bewehrungsquerschnitt eine deutliche Laststeigerung erreicht werden kann. In Abhängigkeit des Bewehrungsgrades konnten die Zustände I bis IIb klar voneinander abgegrenzt werden. Die fein verteilten Rissbilder wiesen zudem auf einen guten Verbund zwischen der Betonmatrix und der textilen Bewehrung hin.

Die in den Biegeversuchen beobachteten wesentlich höheren Bruchspannungen der textilen Bewehrung bestätigten, dass es sowohl bei den Garnzugversuchen nach ASTM D 2256 [44]/ DIN EN ISO 2062 [45] als auch bei den Dehnkörperversuchen teilweise zu einem vorzeitigen Versagen aufgrund der Klemmung bzw. der Geometrie gekommen ist. Demnach kann davon ausgegangen werden, dass mit der getränkten Textilbewehrung aus Flachsfasern bei einer Optimierung der Dehnkörperversuche noch größere Bruchspannungen erreicht werden können. Für eine Optimierung der Dehnkörpergeometrie laufen bereits weitere Untersuchungen für eine Anwendung bei zukünftigen Arbeiten.

Trotz dieser Einschränkung kann abschließend zu Arbeitspaket AP 3 (Experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten) festgehalten werden, dass die Textilien aus Flachsfasern als Bewehrung in Betonbauteilen bei einaxialem Zug und bei einaxialer Biegung zu einer gesteigerten Bauteilperformance (Traglast, Bruchverhalten, Rissbild) beitragen können. Die Gewebe erfüllen somit die im Rahmen des Projektes gestellten Anforderungen an das Verbundverhalten und sind sowohl bei einer Zug- als auch bei einer Biegebeanspruchung tragfähig.

3.13 Ergänzende Arbeiten zum AP 3: Ringversuche

Über die beschriebenen Untersuchungen zum Verbund- und Zugtragverhalten hinaus wurden im Rahmen eines Ringversuchs zusammen mit dem Institut für Allgemeine Mechanik (IAM) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) in Aachen, dem Fraunhofer Institut für Holzforschung (WKI) sowie der Hochschule Biberach (HBC) weitere Dehnkörperversuche in Aachen und in Braunschweig durchgeführt. Dabei kam modernste Messtechnik zum Einsatz, um das Bruchverhalten der Dehnkörper genauer zu untersuchen. Mittels einer akustischen Kamera des IAM konnten die Risse qualitativ sowie quantitativ detektiert werden. Außerdem war es durch die optischen Messverfahren des IAM sowie des WKI möglich, Aussagen zur Rissvorankündigung zu treffen und die Messergebnisse zu vergleichen.

Die Prüfkörper wurden wie in Abschnitt 3.1 beschrieben als knochenförmige Dehnkörper hergestellt und analog zu Abschnitt 3.3 gelagert. Durch dieses Vorgehen sollte eine möglichst gute Vergleichbarkeit dieser Versuchsreihen mit den Versuchsreihen des in diesem Bericht beschriebenen Forschungsprojektes (AP 3) sichergestellt werden. Der Prüfablauf und die Prüfgeschwindigkeiten wurden weitestgehend übernommen. Lediglich die seitlich angebrachten induktiven Wegaufnehmer wurden durch optische und akustische Messsysteme ersetzt.

Die untersuchten Parameter wurden ebenfalls in Anlehnung an die Versuchsmatrix des Projektes festgelegt, wobei der Umfang der Versuche kleiner war. Es wurden beispielsweise ausschließlich getränkte Textilien untersucht, welche zweilagig eingebaut wurden. Der Bewehrungsquerschnitt wurde durch unterschiedliche Schussfadenabstände variiert. Als Referenz wurden unbewehrte Dehnkörper sowie Begleitprismen jeweils aus denselben Betonchargen hergestellt. Die untersuchten Bewehrungen sind in Abbildung 21 dargestellt. Je Variante wurden sechs identische Dehnkörper hergestellt, wobei jeweils drei am IAM sowie drei am WKI geprüft wurden. Die drei unbewehrten Referenzdehnkörper wurden an der HBC geprüft.

		getränkte Textilien		
		1 Öffnungsweite Schussfaden		
		1.1	1.2	1.3
		I-8/10-1500-2-	I-10/10-1500-2-	I-12/10-1500-2-
Öffnungsweite (Schuss)	[mm]	8	10	12
Öffnungsweite (Dreher)	[mm]	10	10	10
Feinheit	[tex]	1500	1500	1500
Bewehrungslagen	[-]	2	2	2
Bewehrungsquerschnitt	**[mm²]**	**26,79**	**21,43**	**17,86**

Abbildung 21: Versuchsmatrix der Ring-Zugversuche (IAM, WKI und HBC).

Am IAM wurden die Versuche an einer Zugprüfmaschine (Eigenbau; Steuerung: MTS FlexTest 60 Controller; Zylinder: MTS) durchgeführt. Die Kraft wurde dabei kontinuierlich über eine eingebaute Kraftmessdose aufgezeichnet. Die Verformungen wurden zum einen mit optischer und zum anderen mit akustischer Messtechnik aufgenommen. Dabei wurde das Kamerasystem *Aramis 3D Camera System* der Fa. *Carl Zeiss GOM Metrology GmbH* für die Photogrammetrie sowie das *Acoustic Camera Bionic M-112 Array* der Fa. *CAE Software und Systems GmbH* für die optisch-akustische Auswertung verwendet. Für die Erstellung von einfachen Kraft-Weg-Diagrammen wurde der Maschinenweg herangezogen.

Am WKI wurden die Versuche ebenfalls an einer Zugprüfmaschine (MTS Systems Modell 322.21) durchgeführt, wobei Kraft und Weg direkt aus dieser aufgezeichnet wurden. Hier wurde als optische Messtechnik ebenfalls das Kamerasystem *Aramis 3D Camera System* der Fa. *Carl Zeiss GOM Metrology GmbH* verwendet.

Neben den Erkenntnissen, die bereits im Rahmen der Dehnkörperversuche des Projektes erlangt wurden (fein verteiltes Rissbild, Laststeigerung, Ausbildung der Zustände I bis IIb), ermöglichte die verwendete Messtechnik weitere Beobachtungen vor allem zum Verbundverhalten: Die Ergebnisse des optischen Messsystems ermöglichten im Post-Processing die visuelle Überprüfung, ob zum Zeitpunkt des Versagens ein abgeschlossenes Rissbild (Zustand IIb) vorlag. Dies ist vor allem für eine Aussage zum Verbundverhalten zwischen Betonmatrix und textiler Bewehrung interessant. Zudem

kann die Entstehung einzelner Risse vorher anhand der Messungen erkannt werden. Die einsetzende Rissbildung kann teilweise anhand der flächigen optischen Dehnungsmessungen erkannt werden und relativ zuverlässig anhand der Darstellung der gemessenen Beschleunigungen (siehe Anhang F). Durch die Darstellung der Dehnung innerhalb der Messfläche über die Zeit lassen sich Dehnungs-Zeit-Diagramme erstellen. Aus diesen kann ohne weitere Einflüsse (beispielsweise durch zusätzliche Dehnung der Kopfbereiche) auf die Dehnung der Stegbereiche geschlussfolgert werden. Das stellt einen wesentlichen Vorteil gegenüber der konventionellen Kraft-Weg-Messung mit Wegaufnehmern dar.

Das akustisch-optische Messsystem (akustische Kamera) kann die Rissaktivität in den Versuchskörpern quantitativ und qualitativ detektieren. Zum einen kann die Anzahl der Risse in Übereinstimmung mit den sprunghaften Kraftabfällen der Kraft-Weg-Diagramme bestimmt werden. Zum anderen kann der zeitliche Abstand der Rissentstehung über den Abstand der Ausschläge bezogen auf die Zeitachse bestimmt werden. Außerdem ist es möglich, die Lage des entstandenen Risses zu ermitteln, indem eine Farbkarte über das Bild des Prüfkörpers gelegt wird. Diese Einstellung kann auch bereits während der Messung erfolgen, sodass eine Echtzeitauswertung möglich ist.

3.14 Ergänzende Arbeiten zum AP 3: CT-Untersuchungen

Im Forschungsantrag war zur Untersuchung des Verbundes zwischen Textil und Beton die Anfertigung von Dünnschliffen von ausgewählten Versuchskörpern vorgesehen. Während der Projektbearbeitung ergab sich die Möglichkeit, die Versuchskörper mit einem Computertomographen (CT) am Institut für Allgemeine Mechanik (IAM) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) in Aachen zu untersuchen. Durch diese Methode kann das Untersuchungsobjekt in einer Vielzahl an Schnitten in drei verschiedenen Achsen untersucht werden. Die so angefertigten Aufnahmen erlauben die gleichen Aussagen wie Dünnschliffe, haben aber den Vorteil, dass ein weitaus größeres Bereich des Versuchskörpers untersucht werden kann.

Wie in Abbildung 22 zu erkennen ist, bildet die Betonmatrix ein sehr dichtes Gefüge und umschließt die Naturfaserbewehrung (schwarze Kreisflächen) sehr gut. Die Trennflächen zwischen den getränkten Naturfasergarnen und der Betonmatrix sind sehr klar zu erkennen und scharf abgegrenzt, was darauf schließen lässt, dass sich dort keine Lufteinschlüsse befinden. Der Verbund kann somit augenscheinlich als sehr gut bezeichnet werden.

Im Anhang G finden sich noch weitere Aufnahmen der CT-Untersuchung, die die zuvor getroffenen Aussagen stützen.

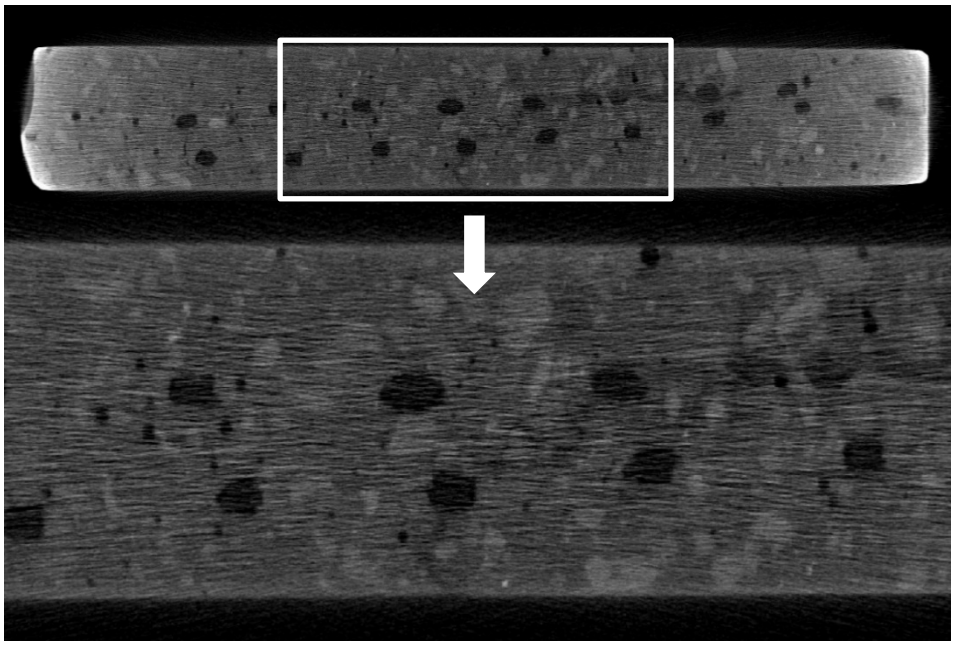


Abbildung 22: CT-Scan senkrecht zur Belastungsrichtung; Gesamtansicht und vergrößerter Ausschnitt.

4 Entwicklung erster Modelle zum Tragverhalten – AP 4

4.1 Entwicklung eines Bemessungsmodells auf Grundlage der bekannten Modelle für einaxiale Zugbeanspruchung

Als Grundlage für das eigene Tragmodell wurden die Modelle von AVESTON et al. [48], JESSE [11], VOSS [14] und KULAS [12] herangezogen. Diese Modelle (Abbildung 23) wurden wegen der guten Vergleichbarkeit aufgrund der Ähnlichkeit der Versuche (Geometrie, Tränkung usw.) ausgewählt. Die ausgewählten Modelle können das Last-Verformungsverhalten eines Textilbetonkörpers unter einaxialer Zugbeanspruchung unter Berücksichtigung der Rissbildung abbilden.

Die Abbildung der Verläufe im Zustand I (ungerissenes Bauteil) sind bei allen vier Modellen sehr ähnlich, wobei ausschließlich bei KULAS Festigkeiten der Begleitproben und keine in den Dehnkörperversuchen gemessene Lasten verwendet werden. Die Erstrissdehnungen bestimmen alle Modelle über ein E-Modul des Verbundquerschnitts.

Der Verlauf in Zustand IIa (Erstrissbildung) wird im ACK-Modell nach AVESTON et al. mit Hilfe der Erstrissspannung und eines Homogenisierungsfaktors für die Dehnung bestimmt. Eine Laststeigerung kann im Zustand IIa nicht berücksichtigt werden. Dieser Effekt, der durch das Mitwirken des Betons auf Zug auftritt, wird von JESSE, VOSS und KULAS durch empirische Faktoren berücksichtigt. Die Dehnung nach Abschluss der Erstrissbildung bestimmt JESSE aus der dazugehörigen Spannung und mit Korrekturfaktoren unter Berücksichtigung des E-Moduls der Textilien bezogen auf die Volumenanteile. VOSS bestimmt diese Dehnung aus den entsprechenden Spannungen dividiert durch einen empirisch abgeminderten E-Modul und mit einem Faktor zur Berücksichtigung der Verbundeigenschaften in Zustand IIa. KULAS berechnet die Dehnungen aus den dazugehörigen Spannungen dividiert durch den E-Modul des Textils.

Im Zustand IIb (abgeschlossenes Rissbild) unterscheiden sich die Ergebnisse der betrachteten Modelle nur geringfügig: Das ACK-Modell stützt sich zur Berechnung des Bruchzustandes auf die

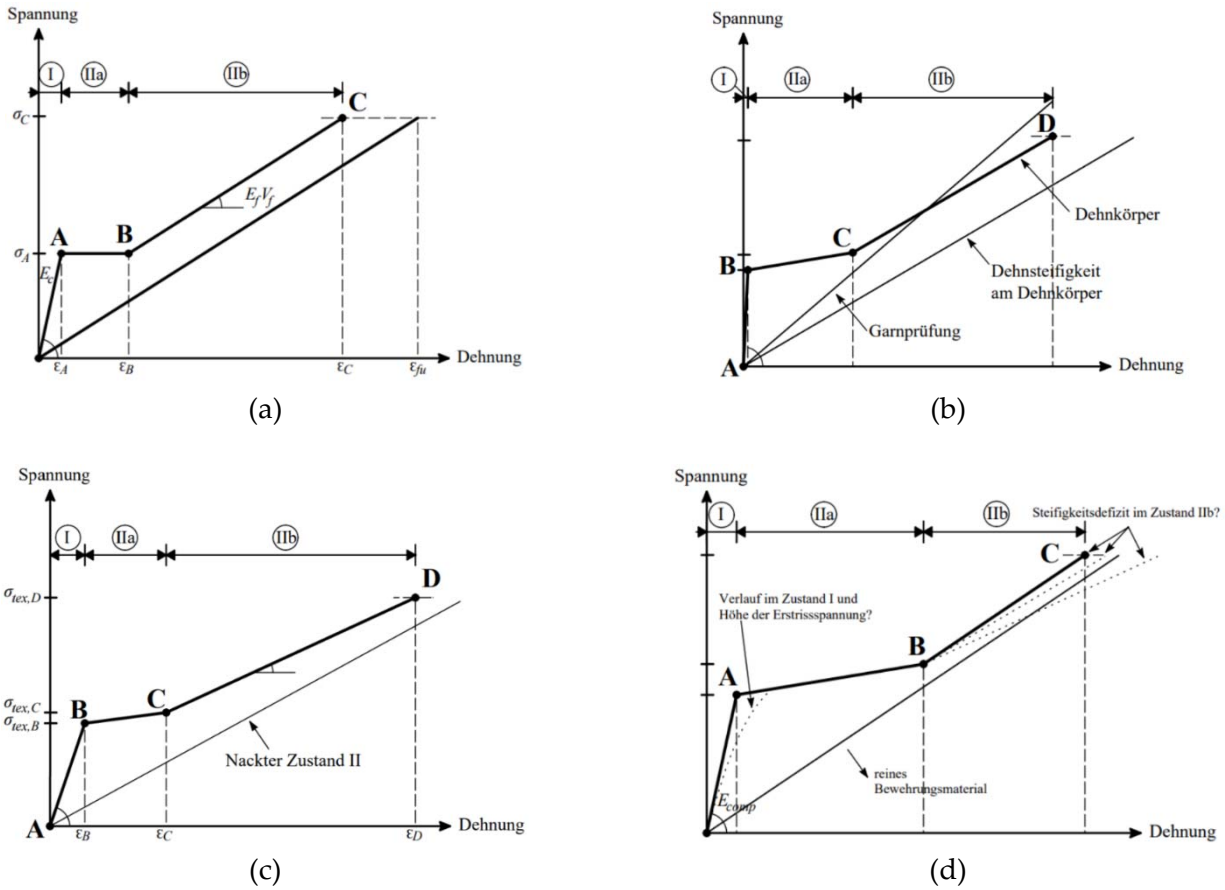


Abbildung 23: Qualitative Spannungs-Dehnungslinie eines Verbundwerkstoffes unter einaxialer Zugbeanspruchung nach dem ACK-Modell [48] (a), nach JESSE [11] (b), nach VOSS [14] (c) und nach KULAS [12] (d).

Ergebnisse der Textilzugversuche, welche faktorisiert werden. JESSE übernimmt die Bruchspannungen aus den Versuchen und bestimmt die Bruchdehnung aus der Bruchspannung und der Spannung nach Abschluss des Rissbildes analog zur Dehnung nach Abschluss des Zustands IIa. VOSS bestimmt die Bruchspannung aus den Bruchspannungen der Textilzugversuche multipliziert mit einem Effektivitätsbeiwert zur Berücksichtigung der tatsächlich im Dehnkörperversuch erreichten Festigkeiten. Die Bruchdehnung berechnet sich vergleichbar den Dehnungen in Zustand IIa. Nach KULAS werden die Bruchspannungen des Dehnkörpers anhand der im Rovingzugversuch ermittelten Festigkeiten bestimmt. Dazu werden die Rovingzugfestigkeiten mit einem empirischen Faktor zur Berücksichtigung eines Maßstabeffekts (Verbundreduktion infolge Querkontraktion des Rovings) abgemindert.

Das eigene Bemessungsmodell für die Dehnkörperversuche mit einer textilen Bewehrung aus Flachsfasern basiert auf den Modellen von JESSE und KULAS, da hier bereits ohne wesentliche Anpassungen die größten Übereinstimmungen mit den Versuchsergebnissen festgestellt werden konnten. Die Erstrissspannung und -dehnung wurden nach KULAS aus der zentrischen Zugfestigkeit der Begleitprismen bestimmt. Der Verlauf in Zustand IIa wurde nach JESSE berechnet, wobei eine Laststeigerung und ein Dehnungszuwachs berücksichtigt wurden. In Anlehnung an JESSE wurde die Bruchspannung aus den Ergebnissen der Dehnkörperversuche ermittelt. Die Bruchdehnungen wurden in Anlehnung an KULAS ermittelt, wobei die Steifigkeitsverhältnisse bzw. -anteile berücksichtigt wurden.

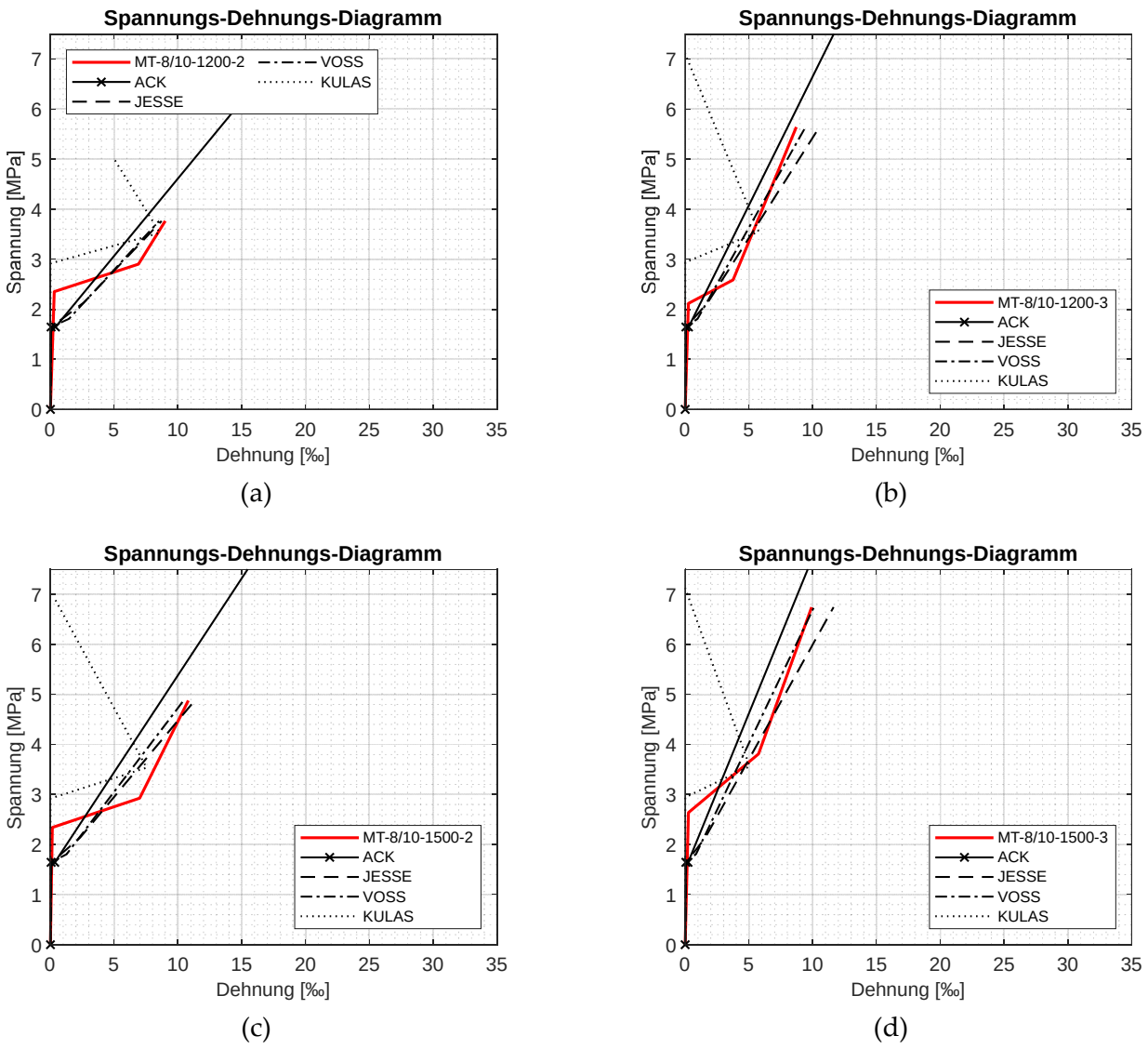


Abbildung 24: Vergleich der Modellberechnungen mit idealisierten Ergebnissen der Dehnkörperversuche mit getränkten Textilien (8 mm Schussfadenabstand, 10 mm Kettfadenabstand, 1200 und 1500 tex Feinheit der Schussfäden) mit 2 bzw. 3 Bewehrungslagen.

4.2 Vergleich der Rechenergebnisse mit Dehnkörperversuchen zur Evaluierung des Modells für die Zugtragfähigkeit

Analog zu den Ausführungen zu den Dehnkörperversuche (Abschnitt 3.5) sollen nachfolgend nur exemplarisch die Nachrechnung einiger Dehnkörperversuche mit den verschieden Tragmodellen dargestellt werden (vgl. Abbildung 24). Für die Nachrechnung der Versuche wurden die experimentell ermittelten Spannungs-Dehnungs-Kurven gemittelt und idealisiert. Die Nachrechnung aller Dehnkörperversuche kann dem Anhang H entnommen werden.

Bei einer Berechnung der Zugtragfähigkeit der Dehnkörper mit einer textilen Bewehrung aus getränkten Flachsfasern mit den Modellen von AVESTON et al. [48], JESSE [11] und VOSS [14] ergaben sich geringere Erstrissspannungen als in den durchgeführten Versuchen erreicht wurden. Einzig bei KULAS lagen die rechnerischen Erstrissspannungen höher als die Versuchsergebnisse. Die rechnerisch bestimmten Erstrissdehnungen stimmten jedoch in allen Modellen weitestgehend überein.

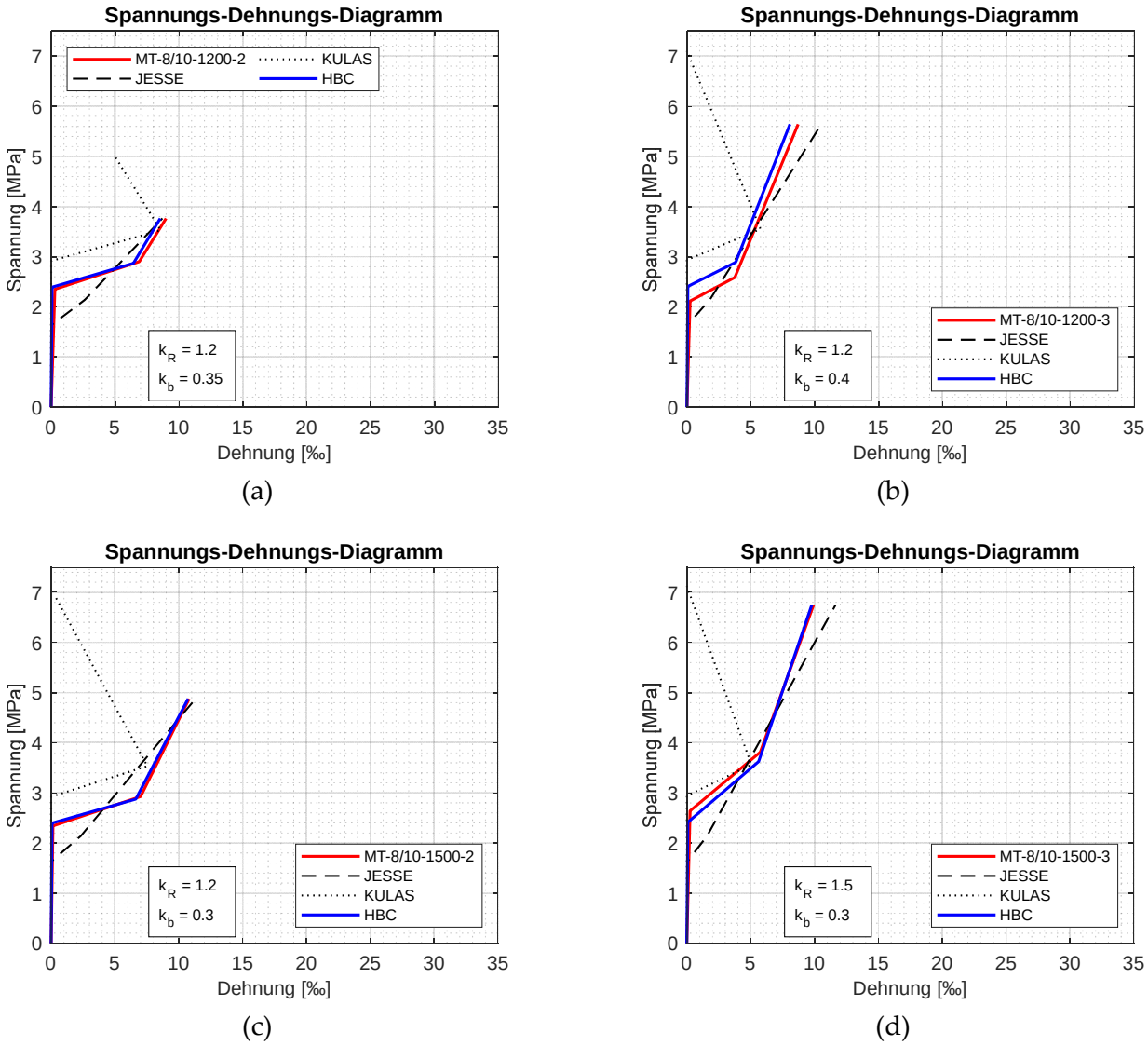


Abbildung 25: Angepasste Modellberechnungen für die Dehnkörperversuche mit getränkten Textilien (8 mm Schussfadenabstand, 10 mm Kettfadenabstand, 1200 und 1500 tex Feinheit der Schussfäden) mit 2 bzw. 3 Bewehrungslagen.

In Zustand IIa konnte bei den Dehnkörperversuchen ein Spannungsanstieg beobachtet werden. Das ACK-Modell berücksichtigt diesen nicht. Der rechnerische Anstieg der Modelle von JESSE, VOSS und KULAS in diesem Bereich stimmte mit dem in den Versuchen beobachteten Spannungszuwachs überein. Der rechnerische Dehnungsanstieg der betrachteten Modelle war jedoch deutlich geringer als bei den Dehnkörperversuchen. Ein Grund hierfür könnte die im Vergleich zu Textilien aus Synthesefasern unterschiedliche Dehnsteifigkeit der Naturfasertextilien sein, da die vier Tragmodelle für Textilien aus Glas- oder Carbonfasern hergeleitet wurden.

Die Dehnungen und Spannungen in Zustand IIb stimmten bei den Modellen von JESSE und VOSS überein, wobei der im Versuch beobachtete Übergang zwischen Zustand IIa und IIb nicht zutreffend erfasst wurde. Die Bruchspannungen waren weitestgehend identisch, wobei diese größtenteils direkt aus den Versuchsergebnissen übernommen werden. Die rechnerischen Dehnungen waren in Zustand IIb größer als in den Versuchen beobachtet. Da beim ACK-Modell die Spannungen anhand

der Textilzugversuche berechnet wurden, stimmten die rechnerischen Ergebnisse nur in den wenigsten Fällen mit den Ergebnissen der Dehnkörperversuche überein. Ähnlich verhielt es sich beim Modell nach KULAS: Bei diesem gehen in Zustand IIb der E-Modul des Textils sowie der steifigkeitsbezogene Längsbewehrungsgrad ein. Für die vorliegenden Werte ergeben sich negative Steigungen im Zustand IIb und entsprechend große Abweichungen beim Vergleich mit den vorliegenden Versuchsergebnissen (vgl. Abbildung 24).

4.3 Eventuelle Anpassung der Bemessungsmodelle

Wie in Abschnitt 4.1 erwähnt, wurden für die Entwicklung des eigenen Tragmodells für Dehnkörper mit einer textilen Bewehrung aus getränkten Flachsfasern vor allem die Modelle von JESSE und KULAS als Ausgangsbasis verwendet. Analog zu Abschnitt 4.2 werden nachfolgend die Modelle von JESSE, KULAS und das eigene Modell mit exemplarisch ausgewählten Versuchsergebnissen verglichen (Abbildung 25). Für die Vergleiche wurden die empirischen Parameter des eigenen Modells k_R und k_b variiert, um einen geeigneten Parametersatz zu finden. Die kompletten zur Kalibrierung der Parameter vorgenommenen Rechnungen können Anhang H entnommen werden.

Um eine gute Übereinstimmung mit den eigenen Dehnkörperversuchen zu erzielen, wurde für das eigene Modell die Erstrissspannung im Vergleich zu KULAS mit einem konstanten Faktor von 0,82 abgemindert. Außerdem wurde zur Ermittlung der E-Moduln bzw. der Steifigkeitsverhältniswerte ein Betonnettoquerschnitt angesetzt, der mit einer um 10% erhöhten Querschnittsfläche der Textilbewehrung berechnet wurde. Diese fiktive Abminderung k_A des Betonquerschnitts wurde gewählt, um die Schwächung des Betonquerschnitts durch die nicht am Lastabtrag beteiligte Tränkung zu berücksichtigen. Die Erstrissspannungen σ_B (MPa) berechneten sich somit nach Gl. (2) und die dazugehörigen Dehnungen nach Gl. (3).

$$\sigma_B = f_{ct,m} \cdot (1 + \omega_1) \cdot k_{cr} \qquad (2)$$

Hierbei sind $f_{ct,m}$ die mittlere zentrische Zugfestigkeit des Betons in MPa; $\omega_1 = \frac{E_t \cdot A_t}{E_c \cdot A_{c,n}}$ der steifigkeitsbezogene Bewehrungsgrad nach KULAS; E_t der E-Modul der Textilbewehrung in MPa; A_t die Querschnittsfläche der Textilbewehrung in mm²; E_c der E-Modul des Betons in MPa und $A_{c,n} = A_c - A_t \cdot k_A$ die Nettoquerschnittsfläche des Betons in mm² (mit A_c der Querschnittsfläche des Betons in mm² und $k_A = 1{,}10$ ein empirischer Faktor zur Berücksichtigung der Tränkung) und $k_{cr} = 0{,}82$ ein empirischer Faktor zur Abbildung der Erstrissspannung.

$$\varepsilon_B = \frac{\sigma_B}{E} \qquad (3)$$

Hierbei sind σ_B die Erstrissspannung nach Gl. (2) in MPa und $E = E_c \cdot (1 - V_t) + E_t \cdot V_t$ der E-Modul des Verbundquerschnitts in MPa (mit V_t der Volumenanteil des Textils).

Der zulässige Bereich des Faktors zur Berücksichtigung des Spannungsanstiegs in Zustand IIa nach JESSE (k_r-Faktor) wurde von 1,0 - 1,3 auf 1,2 - 1,5 erhöht. Nach JESSE ergeben sich mit ansteigenden Faservolumengehalten größere k_r -Faktoren [11], dies konnte für die ausgewerteten eigenen Versuche nicht belegt werden. Es stellten sich bei größeren Faservolumengehalten (hohe Feinheit, geringer Schussfadenabstand, 3 Bewehrungslagen) tendenziell zwar k_r -Faktoren im oberen Wertebereich (d.h. 1,45 bis 1,5) ein, jedoch ergaben sich für geringe Faservolumengehalte nicht ausschließlich k_r -Werte im unteren Bereich (d.h. 1,2-1,3).

Der Bündelfaktor nach JESSE zur Abminderung der Fasermenge für die Dehnungen nach Abschluss der Rissbildung (k_b-Faktor) wurde von 0,65 - 0,80 auf 0,20 - 0,60 angepasst. Ähnlich wie von JESSE beschrieben nimmt der k_b-Faktor mit zunehmendem Abstand der Schussfäden zu. Beispielsweise ergibt sich bei einem Schussfadenabstand von 8 oder 10 mm ein mittlerer k_b-Faktor von 0,3 bis 0,4, wohingegen sich der k_b-Faktor bei Schussfadenabständen von 12 bis 15 mm auf Werte zwischen 0,45 und 0,6 im Mittel erhöht. Dementsprechend werden die Spannungen σ_C nach Abschluss des Zustands IIa mit Gl. (4) und die Dehnungen ε_C mit Gl. (5) berechnet.

$$\sigma_C = \sigma_B \cdot k_R \tag{4}$$

Hierbei sind σ_B die Erstrissspannung nach Gl. (2) in MPa und $k_R = 1{,}2$ bis 1,5 ein angepasster empirischer Faktor zur Berücksichtigung des Spannungsanstiegs nach JESSE.

$$\varepsilon_C = \frac{\sigma_C}{E_t \cdot V_t \cdot k_b} - 0.682 \cdot \sigma_C \cdot \frac{1-V_t}{E_t \cdot V_t \cdot k_b} \tag{5}$$

In dieser Gleichung sind σ_C die Spannung nach Abschluss der Erstrissbildung (Zustand IIa) nach Gl. (4) in MPa und $k_B = 0{,}2$ bis 0,6 ein angepasster empirischer Faktor zur Berücksichtigung der Fasermenge nach JESSE.

Die Berechnung der Spannung σ_D und der Dehnung ε_D im Bruchzustand erfolgt direkt nach dem Modell von JESSE (siehe Gl. (6) und (7)).

$$\sigma_D = \sigma_t \tag{6}$$

Hierbei ist σ_t die aus den Versuchen ermittelte Bruchspannung des Verbundquerschnitts in MPa.

$$\varepsilon_D = \frac{(\sigma_D - \sigma_C) \cdot \frac{(A_{cn} - A_t)}{A_t}}{E_t} + \varepsilon_C \tag{7}$$

Hierbei sind σ_D die Bruchspannung nach Gl. (6) in MPa und ε_C die Dehnungen nach Abschluss der Erstrissbildung (Zustand IIa) nach Gl. (5).

5 Recycling – AP 5

5.1 Herstellung des Textils und anschließende Beschichtung

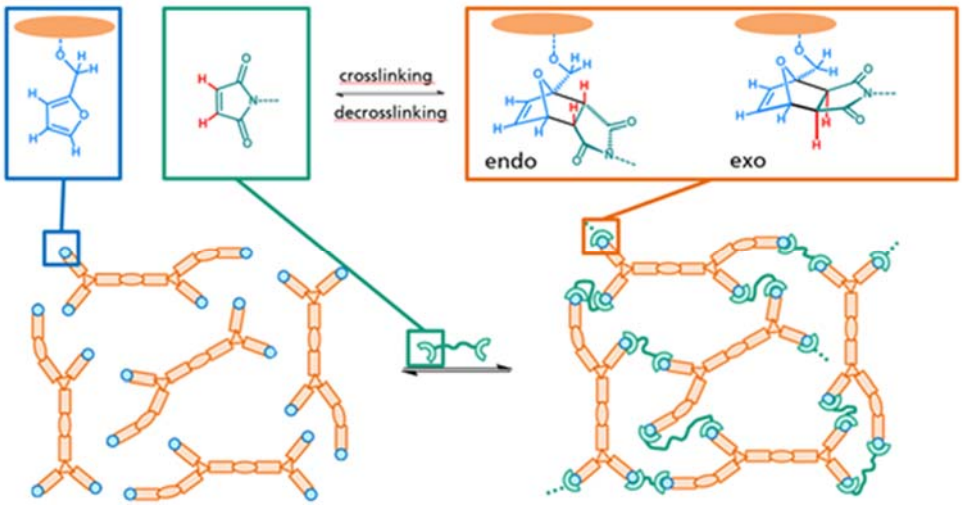


Abbildung 26: Schema: Prinzip der reversiblen Vernetzung, ©Fraunhofer WKI, Dr. Steven Eschig.

Die Grundlage der schaltbaren Beschichtung bildet die temperaturabhängige chemische Reaktion zwischen Furan- (blau) und Maleimid-Einheiten (grün) (Abbildung 26). Die Temperaturabhängigkeit der Reaktion nutzt man zur Schaltung aus. Bei Temperaturen unterhalb von 80°C verbinden

sich Furan und Maleimide zum sogenannten Diels-Alder-Produkt (exo und endo, Anmerkung: Dies sind Bezeichnungen für die räumliche Anordnung der entstehenden Produkte, beide werden allgemein als Cycloaddukte bezeichnet), die schwarz dargestellten Striche sind die sich neu ausgebildeten chemischen Bindungen. Bei Temperaturen oberhalb von 120 °C zerfällt das Produkt wieder in seine Einzelteile Furan und Maleimid, die schwarz dargestellten Bindungen werden aufgebrochen. Dieser Prozess ist mehrfach wiederholbar und lässt sich über die Temperatur steuern.

Für die Herstellung der schaltbaren Beschichtungen werden Diisocyanate (Rechteck) mit di- (Oval) und trifunktionellen (Dreieck) Alkoholen zu einem verzweigten Polyurethan umgesetzt (orange Einheiten). Das Isocyanat wird im leichten Überschuss eingesetzt, so dass am Ende der verzweigten PU-Ketten immer eine Isocyanat-Einheit (Rechteck) vorhanden ist. In einem zweiten Schritt wird der Furanbaustein (blau) zugegeben. Dieser reagiert an die endständigen Isocyanateinheiten und wird dadurch chemisch am Polymer angebunden. Es werden furanhaltige/furfurylierte PU erhalten. Die fu-PUs werden mit einem Bismaleimid abgemischt und in einem geeigneten Lösungsmittel gelöst. Anschließend wird die Substanz erwärmt damit die Vernetzung startet. Die Gewebe werden in die Lösung eingetaucht und anschließend abgekühlt. Anschließend erfolgt die Einbettung des Gewebes in Zement.

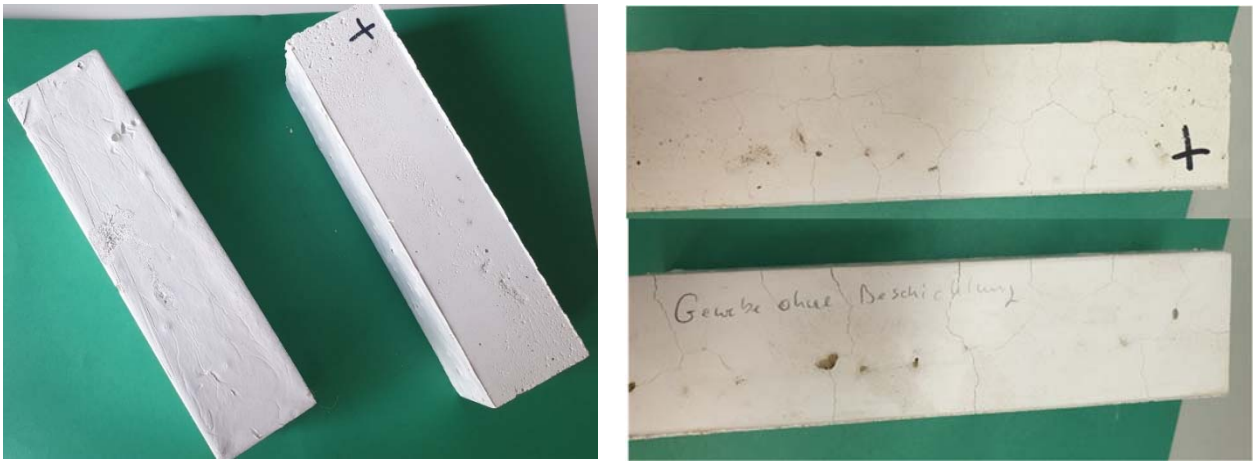
5.2 Herstellung eines Betonprismas (inkl. Aushärtung)

Zur Herstellung der Betonprismen wurde eine genormte Prüfkörperschalung 40 × 40 × 160 mm³ (Abbildung 27) verwendet und zur Hälfte mit angemischtem Beton gefüllt. Anschließend wurde das Gewebe eingelegt und die Form weiter mit Beton aufgefüllt. Gemäß verkürzter Industrieprüfung wurden die Formen nach 72 Stunden ausgeschalt und die Prismen bei Raumtemperatur weitere 7 Tage in einem Kunststoffbeutel gelagert. Nach der Lagerung erfolgte die Trocknung der Prismen bei 40°C im Trockenschrank für 24 Stunden.

Abbildung 27: Normprismaform 40 x 40 x 160 mm³, © Fraunhofer WKI, Christian Reck.

Es kam ein (Fein-)Beton folgender Zusammensetzung zum Einsatz:

40 Masse-%	CEM I 42.5 R
60 Masse-%	Mauersand, Körnung 0-2 mm
0,25%	Fließmittel auf Gesamtmasse
w/z-Wert = 0,50	auf Gesamtmasse (Wasserzementwert 0,5 bedeutet bei z.B. 1000 g Zement würde man 500 g Wasser verwenden)



(a) (b)

Abbildung 28: Probekörper vor Erwärmen auf 120°C (a) und nach Erwärmen im Ofen für ca. 14 h (b), © Fraunhofer WKI, Steven Eschig.

5.3 Aktivierung des Triggers, Brechen des Prismas, Trennung der einzelnen Komponenten und abschließende Dokumentation

Die Probekörper wurden vor der weiteren Behandlung optisch untersucht. Nachfolgend sind die Betonprismen von oben und von vorne abgebildet, wobei der mit „+“ markierte Probekörper unter Einsatz eines Gewebes mit schaltbarer Beschichtung hergestellt wurde.

Es zeigen sich keine Risse in den beiden Betonprismen, unabhängig davon, ob die eingesetzten Gewebe beschichtet wurden (vgl. Abbildung 28 (a)). Um die Schaltung der Beschichtung auszulösen ist eine thermische Behandlung des Probekörpers notwendig. Beide Probekörper wurden daher auf 120 °C im Ofen, über Nacht, ca. 14 h erwärmt und anschließend erneut optisch bewertet.

Nach der beschriebenen Erwärmung wiesen beide Betonprismen deutlich Risse auf – unabhängig davon, ob ein Gewebe mit oder ohne schaltbare Beschichtung eingesetzt wurde (Abbildung 28 (b)). An diesem Punkt ist daher optisch noch kein Einfluss der Beschichtung auf das Verhalten der Werkstoffe unter Temperatureinfluss erkennbar. Um eine Untersuchung des Verhaltens des Gewebes im Inneren der Probekörper zu ermöglichen, wurden sie nach der thermischen Behandlung mechanisch zerstört. In der Abbildung 29 sind Betonmatrix und Gewebe nach mechanischem Einfluss dargestellt.

Wie in Abbildung 29 zu erkennen ist, zeigt das unbeschichtete Gewebe auch nach der mechanischen Zerkleinerung eine starke Haftung an die Betonmatrix. Im Gegensatz hierzu lösen sich die Betonstücke deutlich besser von dem Gewebe, welches mit der schaltbaren Beschichtung versehen wurde.

Um die Lösung der Gewebe von der Betonmatrix nach Auslösen des Triggers und mechanischer Zerkleinerung noch deutlicher darstellen zu können, werden einzelne Zwirne von der Matrix entfernt. Auch hier zeigen sich signifikante Unterschiede: das mit der schaltbaren Beschichtung behandelte Gewebe lässt sich, wie in der nachfolgenden Abbildung 30 (b) erkennbar ist, vollständig von der Matrix lösen, es zeigen sich keine relevanten Anhaftungen von Fasern an der verbleibenden Matrix.

(a) (b)

Abbildung 29: Probekörper mit unbeschichtetem Gewebe nach thermischer und mechanischer Behandlung (a) und Probekörper mit beschichtetem Gewebe nach derselben Behandlung (b), © Fraunhofer WKI, Steven Eschig.

Das unbeschichtete Gewebe lässt sich nur schwer lösen – die Zwirne fransen stark aus und es verbleiben deutlich erkennbar Zwirn- bzw. Faserreste an der Betonmatrix (vgl. Abbildung 30 (a)).

(a) (b)

Abbildung 30: Betonmatrix nach Entfernen der unbeschichteten Zwirne (a) und der beschichteten Naturfaserzwirne (b), © Fraunhofer WKI, Steven Eschig.

Die Unterschiede in der Haftung sind in der nachfolgenden Darstellung noch einmal direkt gegenübergestellt (Abbildung 31). Die Haftung zwischen Gewebe bzw. Garn und Betonmatrix wird durch die schaltbare Beschichtung nach Auslösen des Triggers deutlich reduziert, sodass eine Verbesserung der Recyclingfähigkeit durch den Einsatz dieses Beschichtungssystems möglich ist. Die grundsätzliche Tauglichkeit des Ansatzes konnte im Rahmen dieses Projektes gezeigt werden.

Um diesen gesamten Sachverhalt des Einsatzes einer schaltbaren Beschichtung zur Verbesserung der Recyclingfähigkeit von naturfaserbewehrtem Beton im Detail zu untersuchen sind jedoch umfangreiche weitere Untersuchungen notwendig: Es sind verschiedene schaltbare und konventionelle Beschichtungen bzgl. der Haftung nach thermischer und mechanischer Behandlung sowie deren Einfluss auf die Gebrauchseigenschaften des resultierenden Werkstoffverbundes vor Auslösen des Triggers zu untersuchen. Da auch das eingesetzte Gewebe einen deutlichen Einfluss auf die genannten Aspekte hat, sind auch verschiedene Gewebe- und Faserarten in diesem Themenkomplex

zu betrachten. Diese umfangreichen Untersuchungen und Fragestellungen konnten aufgrund des begrenzten zeitlichen und finanziellen Umfangs jedoch nicht im Rahmen dieses Projekts abgebildet werden, da der Fokus hier auf den übrigen, in diesem Bericht vorgestellten Themen lag.

Abbildung 31: Gegenüberstellung der Probekörper mit unbeschichtetem (oben) und beschichtetem (unten) Gewebe nach thermischer und mechanischer Behandlung, © Fraunhofer WKI, Christina Haxter.

6 Bau des Demonstrators und Probeeinbau Randbewehrung – AP 6

6.1 Definition der Anforderungen an das Fassadenelement und die Randbewehrung für den Industriefußboden

Die Fassadenplatte wurde für eine Windbeanspruchung von 1,2 kN/m² ausgelegt. Da die Fassadenplatte im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ungerissen sein soll, dient die vorhandene Bewehrung nur zur Aufnahme des Rissmoments (Mindestbewehrung). Die textile Bewehrung wird auf Zug beansprucht, weshalb auf der sicheren Seite liegend angenommen wurde, dass die Textilien ausschließlich in Schussfadenrichtung Last abtragen können. Daher wurden die Textilien im Fassadenelement mehrlagig und kreuzweise eingebaut. Das Fassadenelement sollte zur späteren Auflagerung mit für den Textilbetonbau zugelassenen Fassadenplattenankern versehen werden und mit den Abmessungen $l \times b \times h = 120\,\text{cm} \times 80\,\text{cm} \times 4{,}5\,\text{cm}$ vor allem Spannungen in einer Richtung abtragen. Bei der Randbewehrung für den Industriefußboden, die ebenfalls auf Zug beansprucht wird, wurden die Textilien entsprechend der erwarteten Spannungsrichtungen eingebaut. Da beide Bauteile möglichst dauerhaft sein sollten, wurden ausschließlich beschichtete Textilien verwendet. Für beide Anwendungen sollte ein möglichst praxisnaher Beton verwendet werden, der üblicherweise ein Größtkorn von 8 oder 16 mm aufweist. Aus diesem Grund wurden große quadratische Öffnungsweiten (15 mm) und Garne mit einer relativ großen Feinheit (1500 tex in Schussfadenrichtung, 2 × 500 tex in Kettfadenrichtung) gewählt.

6.2 Herstellung der Gewebe mit den erforderlichen Abmessungen

Für die Herstellung der Textilien wurde die Webmaschine des WKI auf Drehergewebe mit 2 × 500 tex Flachszwirn in Kettfadenrichtung umgerüstet, unterteilt in Dreher- und Stehfaden. In der Schussfadenrichtung wurde ein Garn mit einer Feinheit von 1500 tex gewählt und es wurde in beiden Rich-

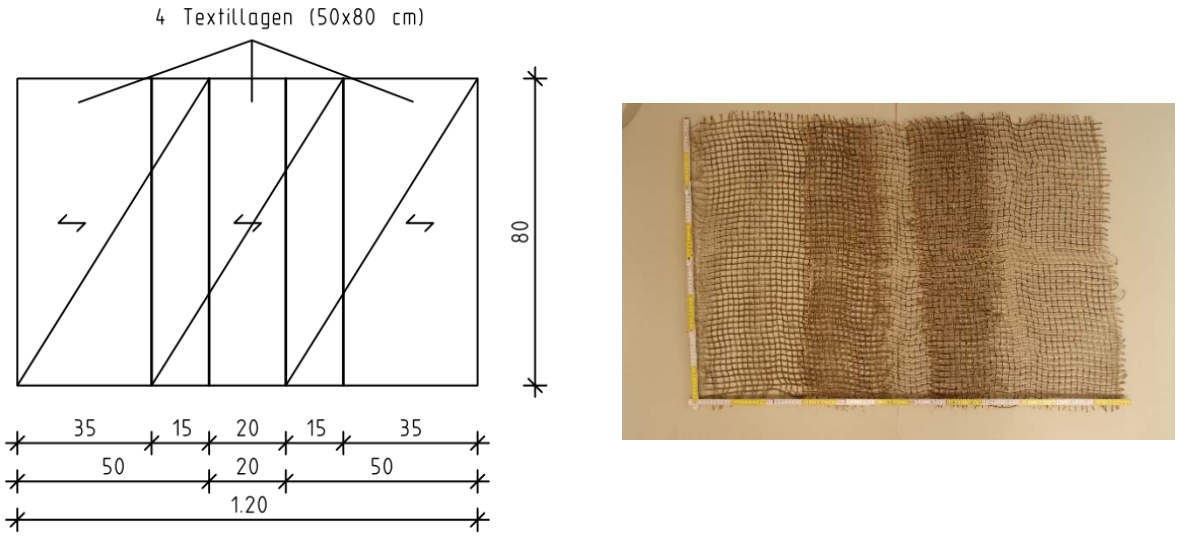


Abbildung 32: Bewehrungsskizze der Fassadenplatte in Längsrichtung (Schussfaden parallel zu eingezeichneter Spannrichtung) (a); Textile Bewehrungslagen in Längsrichtung (b).

tungen ein Abstandsmuster von 15 mm realisiert. Für die NF-Bewehrung des Demonstrators (Fassadenplatte) wurden 12 Textilien mit 80 × 50 cm (Längsbewehrung, 4 Lagen) sowie 2 Textilien mit 120 × 50 cm (Querbewehrung, 1 Lage) hergestellt. Des Weiteren wurde für den Randeinbau im Industriefußboden ein Textil für eine U-förmige Bewehrung mit zwei Anschlussgeweben mit je 70 × 50 cm angefertigt.

Wie bereits in Abschnitt 6.1 erwähnt, wurden – auch im Hinblick auf die besseren Ergebnisse von beschichteten Textilien im Rahmen des Projektes – ausschließlich beschichtete Textilien verwendet, um möglichst dauerhafte Bauteile realisieren zu können. Die Textilien wurden nach dem Zuschneiden mit dem biobasierten Harz-Härtersystem *SR GreenPoxy56* / *SD8822* der Fa. *SICOMIN* beschichtet, welches auch bei den Bauteilversuchen verwendet worden ist. Unter Berücksichtigung des stöchiometrischen Mischverhältnisses von 100 : 31 nach Herstellerangaben wurde das Harz-Härtersystem angemischt und mittels Pinsel und Quetschwalze (vgl. Abbildung 4 (b)) auf die Textilien aufgetragen. Um den Zielwert von 55 % Fasermassenanteil zu erreichen, wurde überschüssiges Harz-Härtergemisch mit der Quetschwalze und saugfähigen Tüchern sukzessive bis zur Gewichtstoleranz von ca. 45 – 55 % abgetragen. Für das Aushärten wurden die beschichteten Textilien im Ofen bzw. im Autoklav für 0,5 h bei 80°C ausgehärtet. Das Textil für das U-förmige Bauteil wurde nach dem Beschichten um einen entsprechenden U-förmigen Aufbau gewickelt und mit diesem ebenfalls im Ofen ausgehärtet.

6.3 Herstellung des Fassadenplatten-Demonstrators

Für die Fassadenplatte wurden 4 Bewehrungslagen in Längsrichtung, d.h. die Schussfäden verlaufen parallel zur langen Kante der Platte, sowie eine Bewehrungslage in Querrichtung vorgesehen. Da die Textilien mit den in Abschnitt 6.2 beschriebenen Abmessungen gefertigt wurden, sind diese vor der Betonage zu Textilien zusammengebunden worden, die den letztendlichen Abmessungen

(a) (b)

Abbildung 33: Erhärtete Fassadenplatte: Fehlstellen am Rand (a), Sichtseite der Platte (b).

der Fassadenplatte entsprachen. Dabei wurde eine Übergreifungslänge von etwa 15 cm berücksichtigt. Um den Einbau zu erleichtern, wurden die Textilien der einzelnen Lagen mit ungetränkten Flachsfasergarnen zusammengebunden (vgl. Abbildung 34 (a), Abschnitt 6.4). Die Bewehrungsskizze sowie exemplarische Bewehrungslagen sind in Abbildung 32 dargestellt.

Der für den Demonstrator verwendete Beton war der Festigkeitsklasse C55/67 zuzuordnen, entwickelte jedoch eine mittlere Druckfestigkeit von etwa 85 MPa nach 28 Tagen. Der Beton war selbstverdichtend und wies ein Größtkorn von 8 mm auf. Um das vollständige Umschließen der Textilien sicher zu stellen, wurde die Fassadenplatte (ähnlich wie die Plattenstreifen für die Biegeversuche) im Laminierverfahren beginnend mit einer Schicht Beton hergestellt. Um die geringe Plattenstärke einhalten zu können, wurden die 4 Textilien in Längsrichtung und das einzelne Textil in Querrichtung mittig in einer Lage eingebaut. Somit konnten auch die Einbauteile zur späteren Montage der Platte einfacher angeordnet werden (vgl. Anhang I).

Trotz der selbstverdichtenden Eigenschaften des Betons wurde nach dem Einfüllen der obersten Betonschicht mit einem Handrüttler zusätzlich verdichtet, sodass der im Vergleich zu den kleinformatigen Versuchen zähflüssigere Beton durch die einzelnen Bewehrungslagen dringen konnte. Um eine ordnungsgemäße Überdeckung der Bewehrung sicherzustellen, war eine Erhöhung der Bauteildicke auf etwa 5,5 cm erforderlich. Abschließend wurde die Lage der Einbauteile nochmals kontrolliert und die Oberfläche, welche später die Rückseite der Platte darstellte, geglättet.

Wie bei den Dehnkörper- und Biegeversuchen wurde die Platte am Tag nach der Betonage ausgeschalt. Aufgrund des zähflüssigen Betons konnten die Textilien in den Randbereichen nicht vollständig von der Matrix umhüllt werden, weshalb sich hier einige Fehlstellen ausbildeten (Abbildung 33 (a)). Die Fassadenplatte (Abbildung 33 (b)) wurde in der *Versuchshalle für Baustoff- und Bauteilprüfung* der HBC gelagert, um eventuelle Langzeituntersuchungen in der Zukunft durchführen zu können und kann dort besichtigt werden.

6.4 Einbau der Randbewehrung aus Naturfasern

Die beschichtete Textilbewehrung wurde vor der Betonage für den Einbau im Industriefußboden

(a)

(b)

Abbildung 34: Fixierungspunkt mit Flachsfasergarn (a) und vorbereitete beschichtete Textilbewehrung für den Randeinbau (b).

vorbereitet. Dabei wurden das U-förmige Textil mit den beiden Anschlusstextilien mit einer Übergreifungslänge von 20 cm zusammengebunden. Als Fixierungsmaterial wurden unbeschichtete Flachsfasergarne verwendet (Abbildung 34 (a)).

Die textile Bewehrung wurde in einem Industriefußboden des Projektpartners *FABRINO* eingebaut. Die Bodenplatte wurde unbewehrt und mit einer Bauteilhöhe von 20 cm hergestellt. Das Gesamtvolumen des Industriefußbodens betrug etwa 130 m³. Als Beton wurde ein Transportbeton (C30/37) verwendet, der ein Größtkorn von 16 mm aufwies und mit fibrillierten Hochleistungskurzfasern (HIGH GRADE) aus Polypropylen verstärkt war. Die textile Randbewehrung wurde an einer Ecke eingelegt. Mit Hilfe von handelsüblichen Abstandshaltern wurde die Betondeckung der unteren Lage (d_1=45 mm) sichergestellt. Um auch die obere Lage entsprechend auf ihrer Position zu halten, wurden entsprechende Unterstützungen zwischen die obere und untere Lage der U-Form gestellt. Damit konnte eine Betondeckung von ebenfalls 45 mm für die obere Lage erreicht werden (vgl. Abbildung 35 (a)).

Wegen eines Kommunikationsfehlers wurde die ursprünglich vorgesehene Anfahrmischung mit einem Größtkorn von 8 mm nicht geliefert, so dass die Betonage mit der normalen Mischung mit einem Größtkorn von 16 mm erfolgte. Die Betonage erfolgte mit einer Betonpumpe in drei Lagen: Dabei wurden zunächst die unteren 4,5 cm Beton eingebracht und die Textilbewehrung sauber eingelegt. Als nächstes wurden die ca. 11 cm Beton zwischen den Schenkeln der U-förmigen Bewehrung eingebaut, wobei die obere Lage etwas angehoben werden musste, um ein vollständiges Umschließen der unteren Lage durch die Betonmatrix sicherstellen zu können (Abbildung 35 (b)). Anschließend wurde die obere Lage auf den Beton gelegt und bis zur Bauteiloberkante betoniert. Der Beton wurde lagenweise verdichtet und abschließend geglättet.

(a)

(b)

Abbildung 35: Eingelegte Textilbewehrung (a), Textilbewehrung vor dem Einbringen der letzten Betonlage (b).

VII Fazit

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde ein Gewebe aus Flachsfasern entwickelt, das als Bewehrung in Betonbauteilen verwendet werden kann. Die Naturfaserbewehrung in Form eines Drehergewebes konnte mithilfe von Steh- und Dreherfaden in Kettfadenrichtung mit verschieden großen Abständen der Verkreuzungspunkte in der Doppelgreifer-Webmaschine des WKI mit Jacquard-Aufsatz realisiert werden und somit als Grundlage für die weiteren experimentellen Untersuchungen des Tragverhaltens sowie dem Bau des Demonstrators dienen. Die Drehergewebe wurden mit einer z.T. biobasierten Tränkung SR GreenPoxy56 / SD8822 der Fa. SICOMIN beschichtet, wodurch neben einer verbesserten Formstabilität und einer daraus resultierenden verbesserten Handhabbarkeit des Gewebes auch die Zugfestigkeiten der Garne erhöht werden konnten. Potential für weitere Untersuchungen bietet die Fragestellung, wie sich komplexe Geometrien der getränkten Naturfaserbewehrung realisieren lassen können.

Zur Untersuchung des Tragverhaltens wurden Dehnkörper- und 4-Punkt-Biegeversuche durchgeführt. Es konnte die grundsätzliche Eignung der mit einer biobasierten Tränkung versehenen nachwachsenden Flachsfasertextilien als textile Bewehrung gezeigt werden. Neben einer Laststeigerung gegenüber unbewehrten oder unterbewehrten Dehnkörpern konnten die für bewehrte Betonkörper typischen Rissbildungszustände beobachtet werden: ungerissener Querschnitt (Zustand I), Phase der Erstrissbildung (Zustand IIa) sowie Phase des abgeschlossenen Rissbildes (Zustand IIb). Die klare Abgrenzung der einzelnen Bereiche sowie das sichere Erreichen des Zustands IIb war bei kleinen Schussfadenabständen bzw. höheren geometrischen Bewehrungsgraden erkennbar. Im Zustand IIb war jedoch ein Steifigkeitsdefizit zu beobachten, was auf einen Abbau der Verbundspannungen infolge der Querkontraktion der auf Zug beanspruchten getränkten Garne zurückgeführt wurde. Die Rissbilder der Dehnkörper waren bei ausreichend großem Bewehrungsgrad fein verteilt und bestätigten die Aussagen zum beschriebenen Tragverhalten, d. h., bei höheren geometrischen Bewehrungsgraden stellten sich geringere Rissabstände ein als bei kleineren Bewehrungsgraden. Dementsprechend konnte das Rissbild auch optisch als abgeschlossen eingestuft werden. Weiterhin konnte ein erstes Modell zur Beschreibung des Zugtragverhaltens des neuen Textilbetons mit einer Bewehrung aus Naturfasern entwickelt werden. Die grundsätzliche Anwendbarkeit des neuen Baustoffs konnte durch den Bau einer kleinformatigen Fassadenplatte als Demonstrator gezeigt werden. Zudem konnte im Rahmen eines Probeeinbaus in einem mit Polypropylenfasern bewehrten Industrieboden ein Teil der notwendigen Randbewehrung aus Betonstahl durch die neuentwickelte textile Bewehrung aus Naturfasern ersetzt werden.

Weitere noch zu untersuchende Fragestellungen sind beispielsweise die Entwicklung eines validen Modells zur Ermittlung des Biegewiderstands oder die Untersuchung des Querkrafttragverhaltens. Für eine spätere praktische Anwendung als Bewehrung ist es außerdem zwingend erforderlich, die Dauerhaftigkeit und die Dauerstandfestigkeit des neuartigen Verbundwerkstoffes näher zu untersuchen. Neben den Festigkeitsverlusten, die aus der Exposition der Textilien aus Flachsfasern resultieren (Alterung der Textilien), ist zu erwarten, dass es mit zunehmender Belastungsdauer und -höhe zu einer weiteren Abnahme des Tragwiderstands kommt (Dauerstandfestigkeit). Aus diesem Grund sollten diese beiden zeitabhängigen Effekte (Alterung des Textils und Abnahme der

Festigkeit unter Dauerbelastung) kombiniert untersucht werden. Die maßgebenden äußeren Einflussfaktoren sind Spannung, Temperatur, Feuchtigkeit und Alkalität (pH-Wert). In Bauwerken treten diese Einflussfaktoren oftmals kombiniert auf. Mögliche Versuchsaufbauten für realitätsnahe Dauerstandversuche werden z.B. in [49],[50] beschrieben. Perspektivisch sollten auch angestrebt werden, erste Bemessungsregeln in Form einer Richtlinie zusammenzustellen, um einen praktischen Einsatz von Textilbeton mit einer Bewehrung aus Naturfasern zu ermöglichen. Um die CO_2-Emissionen des neuen Verbundwerkstoffs noch weiter zu verringern, kann der konventionelle Zement in der Betonmatrix durch ein klimafreundlicheres hydraulisches Bindemittel (z.B. Bindemittel auf Basis von Calciumsilicathydraten – Celitement) ersetzt werden [51]. Da die Naturfasern im Gegensatz zu Stahl kein alkalisches Milieu für eine Passivierung benötigen, kann der Zement durch alternative Bindemittel mit geringem CaO/SiO_2-Verhältnis und geringer Alkalität relativ einfach ersetzt werden. Beispielsweise können mit den aktuell verfügbaren alternativen Bindemitteln die CO_2-Emissionen gegenüber einem herkömmlichen Portlandzement bereits jetzt um bis zu 50 % verringert werden [52].

Im Rahmen des bearbeiteten Projekts konnte durch erste Untersuchungen bereits gezeigt werden, dass der Einsatz einer schaltbaren Beschichtung zur Verbesserung der Recyclingfähigkeit des Verbunds nach der Nutzungsphase zielführend erscheint. Um dies im Detail zu untersuchen, sind jedoch noch deutlich weitreichendere Untersuchungen notwendig.

VIII Eigene Veröffentlichungen

[i] Ricker, M.; Zecherle, K.; Binde, J.; Haxter, C.; Winkelmann, J.: *Zugtragverhalten von Betonbauteilen mit Textilbewehrung aus Naturfasern.* In: BFT International 08-2022.

[ii] Zecherle, K.; Ricker, M.; Binde, J.; Winkelmann, J.; Haxter, C.: *Zugtragverhalten von Betonbauteilen mit getränkter Textilbewehrung aus Flachsfasern.* Beton- und Stahlbetonbau 118 (2023), S. 25–35.

[iii] Zecherle, K.; Ricker, M.; Binde, J.; Winkelmann, J.; Haxter, C.: *Zugtragverhalten von Textilbetonbauteilen mit mehrlagiger Bewehrung aus Naturfasern.* 15. Forschungsforum der österreichischen Fachhochschulen, 20.-21. April 2022 in Villach, Österreich, http://ffhoarep.fh-ooe.at/handle/123456789/1549

[iv] Zecherle, K.; Ricker, M.; Binde, J.; Winkelmann, J.; Haxter, C.: *Tensile load-bearing behaviour of concrete components reinforced with impregnated flax fibre textiles.* RILEM Spring Convention & 4th International Congress on Materials & Structural Stability, 06.-10. März 2023, online.

[v] Zecherle, K.; Ricker, M.; Binde, J.; Winkelmann, J.; Haxter, C.: *Bending load-bearing behaviour of concrete components reinforced with impregnated flax fibre textiles. fib* Symposium 2023, Building for the future: Durable, Sustainable, Resilient, 05.-07. Juni 2023, Istanbul, Türkei.

IX Literaturverzeichnis

[1] Sivakumar, A.; Santhanam, M.: *Mechanical properties of high strength concrete reinforced with metallic and non-metallic fibres*. Cement and Concrete Composites 29 (2007), Nr. 8, pp. 603–608. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp. 2007.03.006.

[2] Helbig, T.; Unterer, K.; Kulas, C.; Rempel, S.; Hegger, J.: *Fuß- und Radwegbrücke aus Carbonbeton in Albstadt-Ebingen. Die weltweit erste ausschließlich carbonfaserbewehrte Betonbrücke*. Beton- und Stahlbetonbau 111, H. 10 (2016), S. 676–685. https://doi.org/10.1002/best.201600058.

[3] Rempel, S.; Will, N.; Hegger, J.; Beul, P.: *Filigrane Bauwerke aus Textilbeton*. Beton- und Stahlbetonbau 110, Sonderheft Verstärken mit Textilbeton S1 (2015), S. 83–93. https://doi.org/10.1002/best.201400111.

[4] Seifert, W.; Lieboldt, M.: *Ressourcenverbrauch im globalen Stahlbetonbau und Potenziale der Carbonbetonbauweise*. Beton- und Stahlbetonbau 115, H. 6 (2020), S. 469–478. https://doi.org/10.1002/best.201900094.

[5] Curbach, M; Ortlepp. R.: *Sonderforschungsbereich 528 "Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung".* Abschlussbericht 2008/2, 2009, 2010, 2011/1 (gekürzte Fassung), Technische Universität Dresden. Dresden, 2012.

[6] Hegger, J.: *Sonderforschungsbereich 532: Textilbewehrter Beton – Grundlagen für die Entwicklung einer neuartigen Technologie*. Abschlussbericht, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2012.

[7] Hegger, J.; Will, N.; Curbach, M.; Jesse, F.: *Tragverhalten von textilbewehrtem Beton – Verbund, Rissbildung und Tragverhalten*. Beton- und Stahlbetonbau 99, H. 6 (2004), S. 452-455. https://doi.org/10.1002/best.200490115.

[8] Hegger, J.; Horstmann, M.; Voss, S.; Will, N.: *Textilbewehrter Beton – Tragverhalten, Bemessung und Anwendung*. Beton- und Stahlbetonbau 102, H. 6 (2007), S. 362-370. http://dx.doi.org/10.1002/best.200700552.

[9] Jesse, F.; Ortlepp, R.; Curbach, M.: *Tensile stress-strain behaviour of textiles reinforced concrete*. IABSE Symposium Report 86 (2002), S. 127-134. http://dx.doi.org/10.2749/222137802796336900.

[10] Jesse, D.: *Tragverhalten von textilbewehrtem Beton unter zweiaxialer Zugbeanspruchung*. Dissertation Fakultät Bauingenieurwesen, TU Dresden, Dresden, 2011.

[11] Jesse, F.: *Tragverhalten von Filamentgarnen in zementgebundener Matrix. Dissertation Fakultät Bauingenieurwesen*, TU Dresden, Schriftenreihe konstruktiver Ingenieurbar (kid), Heft 5, Dresden, 2004.

[12] Kulas, C. H.: *Zum Tragverhalten getränkter textiler Bewehrungselemente für Betonbauteile*. Dissertation Fakultät Bauingenieurwesen, RWTH Aachen, Schriftenreihe des IMB, Heft 38. Aachen, 2013.

[13] Molter, M.: *Zum Tragverhalten von textilbewehrtem Beton*. Dissertation Fakultät Bauingenieurwesen, RWTH Aachen, Schriftenreihe des IMB, Heft 20. Aachen, 2005.

[14] Voss, S.: *Ingenieurmodelle zum Tragverhalten von textilbewehrtem Beton*. Dissertation Fakultät Bauingenieurwesen, RWTH Aachen, Schriftenreihe des IMB, Heft 24. Aachen, 2008.

[15] Curbach, M; Jesse, F.: *Eigenschaften und Anwendung von Textilbeton*. Beton- und Stahlbetonbau 104, Heft 1 (2009), S. 9 – 16.

[16] Kandemir, A.; Pozegic, T. R.; Hamerton, I.; et al.: *Characterisation of Natural Fibres for Sustainable Discontinuous Fibre Composite Materials*. Materials 13, 2129 (2020). http://dx.doi.org/10.3390/ma13092129.

[17] Castillo-Lara, J. F.; Flores-Johnson, E. A.; Valades-Gonzales, A.; et al.: *Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Foamed Concrete*. Materials 13, 3060 (2020). doi:10.3390/ma13143060.

[18] Kouta, N.; Saliba, J.; Saiyouri, N.: *Fracture behaviour of flax fibers reinforced earth concrete*. Engineering Fracture Mechanics 107378, Vol. 241 (2021). https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107378.

[19] Parisi, F.; Asprone, D.; Fenu, L.; et al.: *Experimental characterization of Italian composite adobe bricks reinforced with straw fibers*. Composite Structures 122 (2015), p. 300-307. http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.11.060.

[20] Sethunarayanan, R.; Chockalingam, S.; Ramanathan, R.: *Natural Fiber Reinforced Concrete*. Transportation Research Record 1226 (1989).

[21] Abbass, A.; Lourenco, P. B.; Oliveira, D. V.: *The use of natural fibers in repairing and strengthening of cultural heritage buildings*. Materials Today: Proceedings 31 (2020), S. 321-328. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.206.

[22] Yan, L.; Chouw, N.; Jayaraman, K.: *Flax fibre and its composites – A review*. Composites Part B: Engineering 56 (2014), S. 296-317. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.08.014.

[23] Luna, P.; Lizarazo-Marriaga, J.; Luna, L.; et al.: *Mechanical Behaviour of natural fiber textile reinforced mortar sheets*. Fifth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies (SCMT5), Kingston University, London (UK), 14-17 July 2019.

[24] Codispoti, R.; Oliviera, D. V.; Olivito, R. S.; et al.: *Mechanical performance of natural fiber-reinforced composites for the strengthening of masonry*. Composites Part B 77 (2019), p. 74-83. http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.021.

[25] Mattenklott, M.; Van Gelder, R.: *Carbonfasern und carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK).* Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 79, H. 9 (2019), S. 317–322.

[26] Fidelis, M. E. A.; Filho, R. D. T.; de Andrade Silva, F.; et al.: *The effect of accelerated aging on the interface of jute textile reinforced concrete*. Cement and Concrete Composites 74 (2016), p. 7-15. http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.09.002.

[27] Savastano, H.; Santos, S. F.; Radonjic, M.; Soboyejo, W. O.: *Fracture and fatigue of natural fiber-reinforced cementitious composites*. Cement and Concrete Composites 31 (2009), S. 232-243. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.02.006

[28] Shadheer, A. M.; Ravichandran, P.; Krishnaraja, A. R.: *Natural Fibers in Concrete – A review*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 1055 (2021). http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1055/1/012038

[29] Naik, D.; Sharma, A.; Kiran, R.: *Modified pullout test for indirect characterization of natural fiber and cementitious matrix interface properties*. Construction and Building Materials 208 (2019), S. 381-393. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.021

[30] Momoh, E. O.; Osofero, A. I.; Menshykov, O.: *Bond behaviour of Treated Natural Fibre in Concrete*. Nano Hybrids and Composites 34 (2022), S. 37-44. https://doi.org/10.4028/p-h40o32

[31] Nindyawati, N.; Umniati, B. S.: *Bond Strength of Bamboo Reinforcement in Light Weight Concrete*. Journal of Civil Engineering and Architecture 10 (2016), S. 417-420. http://dx.doi.org/10.17265/1934-7359/2016.04.003

[32] Ghavami, K.: *Ultimate Load Behaviour of Bamboo-Reinforced Lightweight Concrete Beams*. Cement and Concrete Composites 17 (1995), S. 281-288. https://doi.org/10.1016/0958-9465%2895%2900018-8

[33] Zhang, Q.; Li, S.; Gong, S.; Zhang, G.; Xi, G.; Wu, Y.: *Study on Flexural Properties of Basalt Fiber Textile Reinforced Concrete (BTRC) Sheets Including Short AR-Glass Fibers*. Frontiers in Materials: Structural Materials 7 (2020). https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00277

[34] Claramunt, J.; Fernández-Carrasco, L. J.; Ventura, H.; Ardanuy, M.: *Natural fiber nonwoven reinforced cement composites as sustainable materials for building envelopes*. Construction and Building Materials 115 (2016), S. 230-239. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.044

[35] Page, J.; Khadraoui, F.; Boutouil, M.; Gomina, M.: *Multi-physical properties of a structural concrete incorporating short flax fibres*. Construction and Building Materials 140 (2017), S. 344-353. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.124

[36] Majstorovic, F.; Sebera, V.; Mrak, M.; et al.: *Impact of metakaolin on mechanical performance of flax textile-reinforced cement-based composites*. Cement and Concrete Composites 126 (2022), 104367. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104367.

[37] DIN EN 206:2017-01. *Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*; Deutsche Fassung EN 206:2013+A1:2016.

[38] Sicomin: *Technical Datasheet. SR GreenPoxy 56. Clear epoxy resin*. http://sicomin.com/datasheets/product-pdf1152.pdf. Version 08/12/2015, Châteauneuf les Martigues (FR). 2015.

[39] TIME OUT COMPOSITE: *Technisches Datenblatt. SR8100. Epoxy-System für Injektion und Infusion*. https://www.timeout.de/pdf/SR8100_TDB_DE_20040325.pdf. Version 28/08/2003

[40] Heinzmann, J.: *Entwicklung eines Versuchsstands zum axialen Zugtragverhalten von Betonbauteilen mit textiler Bewehrung aus Flachsfasern*. Masterthesis Fakultät Bauingenieurwesen, Hochschule Biberach, 2020.

[41] Schneider, K.; Butler, M.; Machtcherine, V.: *Carbon Concrete Composites C3 – Nachhaltige Bindemittel und Betone für die Zukunft*. Beton- und Stahlbetonbau 112 (2017), Heft 12, S. 784 – 794.

[42] DIN EN 196-1: *Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit*; Deutsche Fassung EN 196-1:2016. Beuth Verlag. Berlin, 2016.

[43] fib. *fib* Model Code for Concrete Structures 2010, Ernst und Sohn, Berlin, 2013.

[44] ASTM D2256/D2256M-21: *Standard Test Method for Tensile Properties of Yarns by the Single-Strand Method*. August 2021.

[45] DIN EN ISO 2062:2010-04: *Textilien – Garne von Aufmachungseinheiten – Bestimmung der Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung von Garnabschnitten unter Verwendung eines Prüfgeräts mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit (CRE) (ISO 2062:2009)*. Deutsche Fassung EN ISO 2062:2009, Ausgabe April 2010.

[46] Hinzen, M.: *Prüfmethode zur Ermittlung des Zugtragverhaltens von textiler Bewehrung für Beton*. Bauingenieur 92 (2017), S. 289-291.

[47] Rempel, S.: *Zur Zuverlässigkeit der Bemessung von biegebeanspruchten Betonbauteilen mit textiler Bewehrung*. Dissertation Fakultät Bauingenieurwesen, RWTH Aachen, Schriftenreihe des IMB , Heft 51. Aachen, 2018.

[48] Aveston, J.; Cooper, G. A.; Kelly, A.: *Single and Multiple Fracture*. The Properties of Fiber Composites (1971), S. 15-24.

[49] Orlowsky, J.: *Zur Dauerhaftigkeit von AR-Glasbewehrung in Textilbeton*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 558, Berlin: Beuth, 2005.

[50] Spelter, A.; Bergmann, S.; Bielak, J.; Hegger, J. *Long-Term Durability of Carbon-Reinforced Concrete: An Overview and Experimental Investigations.* In: Applied Sciences 9 (2019), Artikel-Nr. 1651.

[51] Winnefelf, F.; Leemann, A.: *Nachhaltige Betone mit alternativen Bindemittelsystemen – was wird die Zukunft bringen?*, FSKB-Seminar "Am Puls der Betontechnologie – neue Erkenntnisse", Dagmersellen (CH) am 25.04.2017.

[52] Stemmermann, P.; Schweike, U.; Garbev, K.; Beuchle, G.; Möller, H.: *Celitement – a sustainable prospect for the cement industry.* In: Cement International 8 (2010), S. 52-66.

Anhang A Versuchsmatrizen

ungetränkt																																			
		1					2					3					4					5													
		OT-8/10-1000-2-x		OT-8/10-1200-2-x		OT-8/10-1500-2-x	OT-8/10-1000-3-x		OT-8/10-1200-3-x		OT-8/10-1500-3-x	OT-10/10-1200-3-x		OT-10/10-1500-3-x		OT-12/10-1200-3-x		OT-12/10-1500-2-x	OT-15/10-1200-3-x		OT-15/10-1500-3-x	OT-15/10-1200-3-x		OT-15/15-1500-3-x											
Öffnungsweite (Schuss)	[mm]	8					8					10				12			15																
Öffnungsweite (Dreher)	[mm]	10					10					10				10			10			15												
Feinheit	[tex]	1000		1200		1500	1000		1200		1500	1200		1500		1200		1500	1200		1500	1200		1500										
Bewehrungslagen	[-]	2		2		2	3		3		3	3		2		3		2	3		3	3		3										
Bewehrungsquerschnitt	**[mm²]**	**17.86**		**21.43**		**26.79**	**26.79**		**32.14**		**40.18**	**25.71**		**21.43**		**21.43**		**17.86**	**17.14**		**21.43**	**17.14**		**21.43**											

getränkt																																			
		6					7					8					9					10													
		MT-8/10-1000-2-x		MT-8/10-1200-2-x		MT-8/10-1500-2-x	MT-8/10-1000-3-x		MT-8/10-1200-3-x		MT-8/10-1500-3-x	MT-10/10-1200-3-x		MT-10/10-1500-3-x		MT-12/10-1200-3-x		MT-12/10-1500-2-x	MT-15/10-1200-3-x		MT-15/10-1500-3-x	MT-15/10-1500-3-x		U-O-x											
Öffnungsweite (Schuss)	[mm]	8					8					10				12			15					-											
Öffnungsweite (Dreher)	[mm]	10					10					10				10			10			15		-											
Feinheit	[tex]	1000		1200		1500	1000		1200		1500	1200		1500		1200		1500	1200		1500	1500		-											
Bewehrungslagen	[-]	2		2		2	3		3		3	3		2		3		2	3		3	3		-											
Bewehrungsquerschnitt	**[mm²]**	**17.86**		**21.43**		**26.79**	**26.79**		**32.14**		**40.18**	**25.71**		**21.43**		**21.43**		**17.86**	**17.14**		**21.43**	**21.43**		**0.00**											

unbewehrt	
	12
	U-O-x
Öffnungsweite (Schuss)	[mm]	-
Öffnungsweite (Dreher)	[mm]	-
Feinheit	[tex]	-
Bewehrungslagen	[-]	-
Bewehrungsquerschnitt	**[mm²]**	**0.00**

Abbildung A-1: Versuchsmatrix Dehnkörperversuche.

		getränkt										unbewehrt	
		1			2	3	4	5	6				
		1.1	1.2	1.3	2.1	3.1	4.1	5.1	6.1				
		MT-8/10-1200-2-	MT-12/10-1200-2-	MT-15/10-1200-2-	MT-8/10-1000-2-	MT-12/10-1500-2-	MT-12/10-1200-3-	MT-15/15-1200-2-	U-0-				
Öffnungsweite (Schuss)	[mm]	8	12	15	8	12	12	15	-				
Öffnungsweite (Dreher)	[mm]	10	10	10	10	10	10	15	-				
Feinheit	[tex]	1200	1200	1200	1000	1500	1200	1200	-				
Bewehrungslagen	[-]	2	2	2	2	2	3	2	-				
Bewehrungsquerschnitt	**[mm²]**	**25,71**	**17,14**	**13,71**	**21,43**	**21,43**	**25,71**	**13,71**	**0,00**				

Abbildung A-2: Versuchsmatrix Biegeversuche.

Anhang B Wahl einer geeigneten Betonrezeptur

Tabelle B-1: Untersuchte Betonrezepturen.

Bestandteile	**Einheit**	**C1 nach** Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.	**RB2 nach** Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.	**FA-1200-01 nach** Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.
CEM II A-LL 42,5 R	kg/m³	205	–	–
CEM I 52,5 R	kg/m³	205	535	210
Sand 0/1	kg/m³	346	–	668
Sand 0/2	kg/m³	729	1399	–
Sand 2/5	kg/m³	465	–	–
Quarzmehl 0,04/0,15	kg/m³	–	–	468
Kalksteinmehl	kg/m³	255	241	455
Silikastaub	kg/m³	45	53	35
Fließmittel	kg/m³	12	70	6
Wasser	kg/m³	157	172	280

Anhang C Herstellung der Gewebe

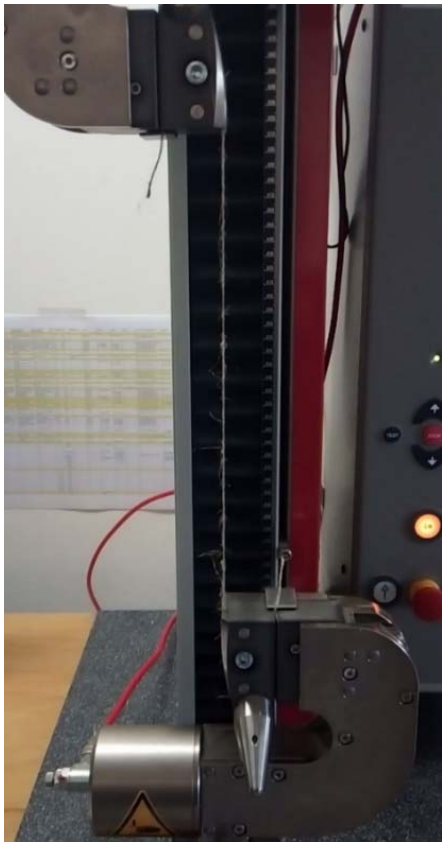


Abbildung C-1: Probenhalter für Garnzugversuche.

Abbildung C-2: Beschichtung der Gewebe.

Anhang D Dehnkörperversuche

D.1 Versuchsaufbau

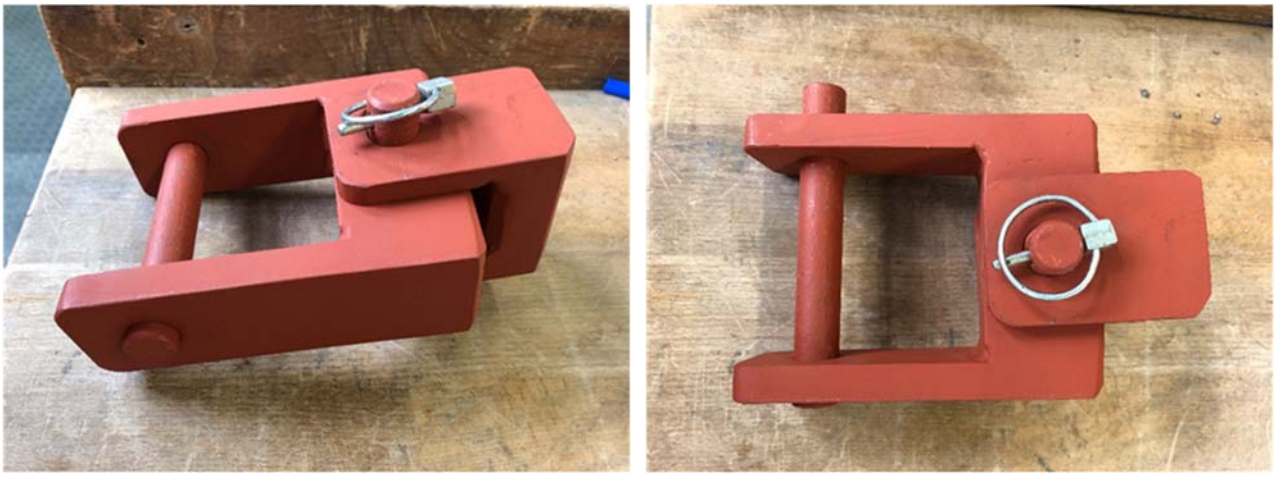


Abbildung D-1: Kardangelenke für zwängungsfreie Lasteinleitung bei den Dehnkörperversuchen.

D.2 Unbewehrte Referenzdehnkörper ($A_t = 0$ mm²)

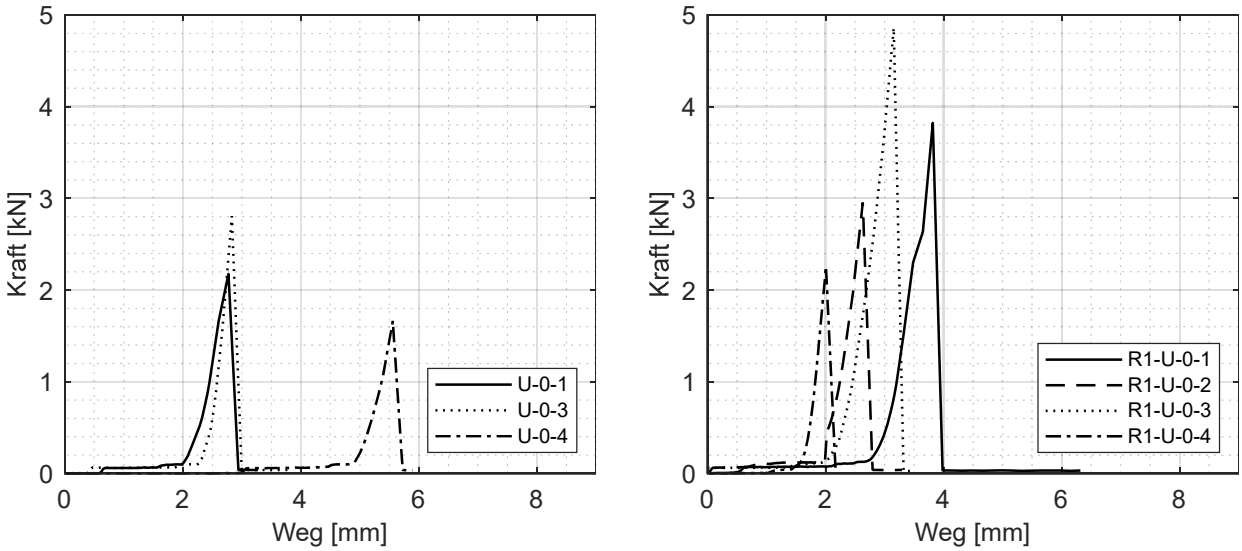


Abbildung D-2: Kraft-Weg-Diagramme der unbewehrten Referenzdehnkörper (Teil 1).

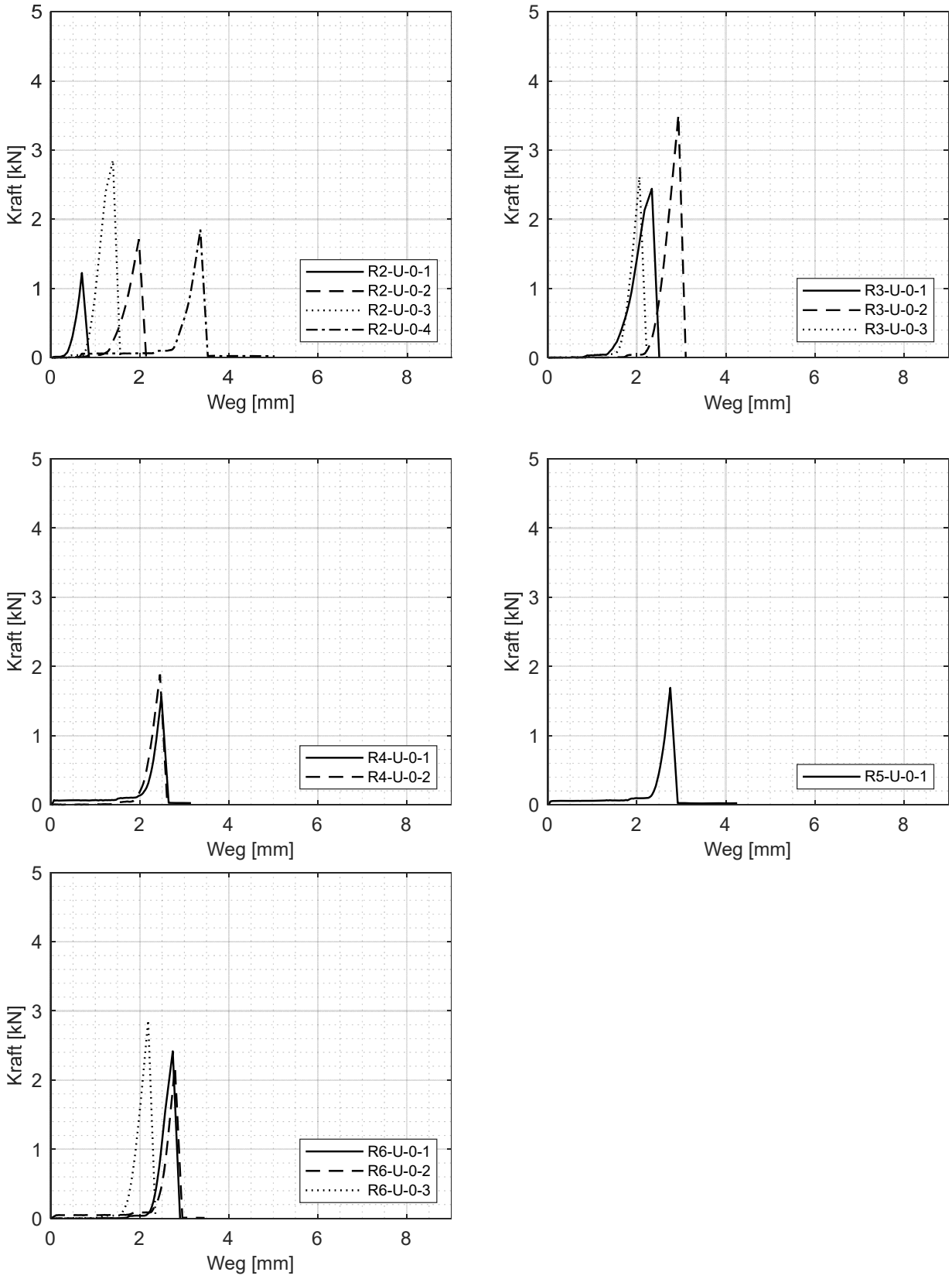


Abbildung D-3: Kraft-Weg-Diagramme der unbewehrten Referenzdehnkörper (Teil 2).

D.3 Ergebnisübersicht

Tabelle D-1: Zusammenstellung aller Ergebnisse der Dehnkörperversuche.

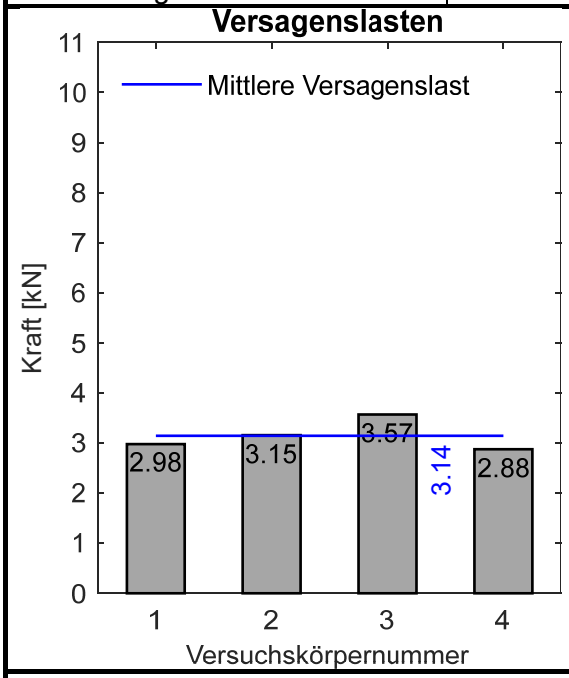
Bezeichnung	Bruch-spannung (MPa)	Bruchdeh-nung (‰)	Mittlerer Rissab-stand (mm)	Mittlere Bruch-spannung (MPa)	Mittlere Bruchdeh-nung (‰)	Mittlerer Rissab-stand (mm)
OT-8/10-1000-2-1	166,03	10,13	80	173,28	8,64	153,3
OT-8/10-1000-2-2	166,63	13,75	133,3			
OT-8/10-1000-2-3	199,40	4,84	200			
OT-8/10-1000-2-4	161,06	5,84	200			
OT-8/10-1200-2-1	214,72	12,02	100	188,20	11,79	116,7
OT-8/10-1200-2-2	160,95	12,74	133,3			
OT-8/10-1200-2-3	188,94	14,23	133,3			
OT-8/10-1200-2-4	188,18	8,15	100			
OT-8/10-1500-2-1	171,30	25,02	100	212,58	18,93	95
OT-8/10-1500-2-2	224,29	19,20	80			
OT-8/10-1500-2-3	222,49	18,90	100			
OT-8/10-1500-2-4	232,25	12,60	100			
OT-8/10-1000-3-1	170,56	11,09	80	167,06	15,01	81,7
OT-8/10-1000-3-2	166,15	18,92	80			
OT-8/10-1000-3-3	169,85	20,53	66,7			
OT-8/10-1000-3-4	161,68	9,49	100			
OT-8/10-1200-3-1	210,57	13,74	66,7	206,77	14,68	54,6
OT-8/10-1200-3-2	232,31	19,09	57,1			
OT-8/10-1200-3-3	208,46	16,32	44,4			
OT-8/10-1200-3-4	175,73	9,58	50			
OT-8/10-1500-3-1	223,10	22,31	40	217,06	23,42	50,2
OT-8/10-1500-3-2	222,96	25,25	30,8			
OT-8/10-1500-3-3	188,79	28,44	50			
OT-8/10-1500-3-4	233,37	17,68	80			
OT-10/10-1200-3-1	231,23	20,11	44,4	239,39	15,10	57,9
OT-10/10-1200-3-2	266,80	17,21	50			
OT-10/10-1200-3-3	227,47	13,07	80			
OT-10/10-1200-3-4	232,07	10,00	57,1			
OT-10/10-1500-3-1	211,53	26,74	36,4	218,83	21,05	65,1
OT-10/10-1500-3-2	204,21	22,86	100			
OT-10/10-1500-3-3	205,79	24,75	66,7			
OT-10/10-1500-3-4	253,80	9,85	57,1			
OT-12/10-1200-3-1	227,33	16,68	100	228,99	13,05	97,6
OT-12/10-1200-3-2	232,50	14,09	57,1			
OT-12/10-1200-3-3	236,57	10,49	133,3			
OT-12/10-1200-3-4	219,56	10,94	100			
OT-12/10-1500-2-1	277,16	12,40	133,3	259,12	11,19	191,7
OT-12/10-1500-2-2	290,17	17,58	100			
OT-12/10-1500-2-3	225,40	6,76	400			
OT-12/10-1500-2-4	243,76	8,01	133,3			

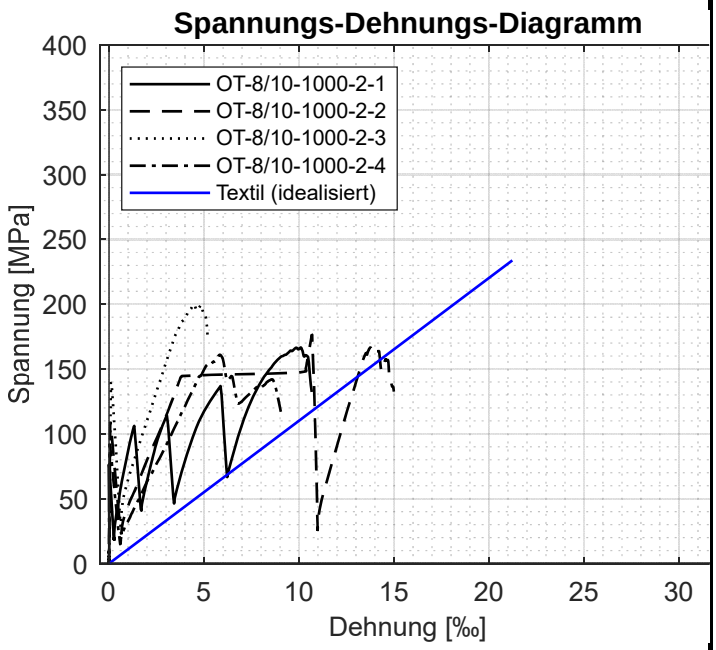
Bezeichnung	Bruch-spannung (MPa)	Bruchdeh-nung (‰)	Mittlerer Rissab-stand (mm)	Mittlere Bruch-spannung (MPa)	Mittlere Bruchdeh-nung (‰)	Mittlerer Rissab-stand (mm)
OT-15/10-1200-3-1	227,06	17,45	100	247,01	15,92	116,7
OT-15/10-1200-3-2	255,40	19,27	133,3			
OT-15/10-1200-3-3	259,38	14,68	133,3			
OT-15/10-1200-3-4	246,21	12,29	100			
OT-15/10-1500-3-1	261,51	24,29	80	303,24	18,23	120,0
OT-15/10-1500-3-2	323,23	17,94	133,3			
OT-15/10-1500-3-3	285,93	17,95	133,3			
OT-15/10-1500-3-4	342,30	12,73	133,3			
OT-15/15-1200-3-1	278,82	13,46	200	273,24	13,41	150,0
OT-15/15-1200-3-2	287,58	12,49	200			
OT-15/15-1200-3-3	237,38	19,14	100			
OT-15/15-1200-3-4	289,17	8,56	100			
OT-15/15-1500-3-1	274,23	22,27	100	267,85	17,13	125,0
OT-15/15-1500-3-2	265,46	15,70	100			
OT-15/15-1500-3-3	256,38	19,28	100			
OT-15/15-1500-3-4	275,31	11,26	200			
MT-8/10-1000-2-1	218,39	11,48	14,3	199,38	6,49	41,1
MT-8/10-1000-2-2	206,31	7,57	16,7			
MT-8/10-1000-2-3	186,71	4,73	33,3			
MT-8/10-1000-2-4	186,12	2,17	100			
MT-8/10-1200-2-1	194,07	6,41	18,2	221,98	8,33	15,3
MT-8/10-1200-2-2	236,97	10,49	16,0			
MT-8/10-1200-2-3	234,90	8,08	11,8			
MT-8/10-1500-2-1	227,28	13,85	21,1	213,59	11,39	22,4
MT-8/10-1500-2-2	222,50	12,08	23,5			
MT-8/10-1500-2-3	189,86	12,51	25,0			
MT-8/10-1500-2-4	214,72	7,13	20,0			
MT-8/10-1000-3-1	176,36	9,62	19,0	175,18	8,27	26,1
MT-8/10-1000-3-2	156,66	5,15	28,6			
MT-8/10-1000-3-3	192,52	10,03	30,8			
MT-8/10-1200-3-1	195,81	11,48	11,8	203,51	10,87	13,7
MT-8/10-1200-3-2	238,54	13,12	11,8			
MT-8/10-1200-3-3	176,19	8,02	17,4			
MT-8/10-1500-3-1	197,79	11,42	14,3	199,44	10,58	14,8
MT-8/10-1500-3-2	219,16	11,33	13,3			
MT-8/10-1500-3-3	181,37	9,00	16,7			
MT-10/10-1200-3-1	225,63	9,61	12,1	203,26	7,53	18,4
MT-10/10-1200-3-2	233,74	10,47	12,9			
MT-10/10-1200-3-3	215,69	8,14	12,1			
MT-10/10-1200-3-4	137,98	1,90	36,4			

Bezeichnung	Bruch-spannung (MPa)	Bruchdeh-nung (‰)	Mittlerer Rissab-stand (mm)	Mittlere Bruch-spannung (MPa)	Mittlere Bruchdeh-nung (‰)	Mittlerer Rissab-stand (mm)
MT-10/10-1500-3-1	158,33	11,84	12,9	197,89	13,40	12,2
MT-10/10-1500-3-2	191,45	10,02				
MT-10/10-1500-3-3	226,89	15,92	11,4			
MT-10/10-1500-3-4	214,90	16,17				
MT-12/10-1200-3-1	264,74	10,39	12,1	221,14	7,1	18,9
MT-12/10-1200-3-2	205,29	8,81	18,2			
MT-12/10-1200-3-3	195,41	4,73	33,3			
MT-12/10-1200-3-4	219,12	4,47	11,8			
MT-12/10-1500-2-1	260,19	5,16	36,4	291,41	9,91	26,0
MT-12/10-1500-2-2	275,47	12,23	23,5			
MT-12/10-1500-2-3	338,56	12,33	18,2			
MT-15/10-1200-3-1	238,69	1,53	100	252,67	3,97	53,2
MT-15/10-1200-3-2	264,71	8,28	22,2			
MT-15/10-1200-3-3	267,34	3,61	57,1			
MT-15/10-1200-3-4	239,92	2,44	33,3			
MT-15/10-1500-3-1	233,47	8,18	22,2	259,88	8,59	18,9
MT-15/10-1500-3-2	282,39	12,66	13,8			
MT-15/10-1500-3-3	243,65	6,99	23,5			
MT-15/10-1500-3-4	280,01	6,53	16,0			
MT-15/15-1500-3-1	341,33	10,23	22,2	310,22	9,97	23,1
MT-15/15-1500-3-2	301,94	10,03	23,5			
MT-15/15-1500-3-3	287,39	9,66	23,5			

D.4 Ergebnisse Bewehrte Dehnkörper

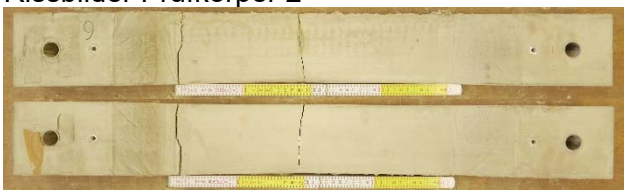
Bezeichnung	**OT-8/10-1000-2-x**
Verwendetes Textil	
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)	8/10
Feinheit Schussfäden (*tex*)	1000
Tränkung	Keine
Anzahl der Bewehrungslagen	2
Bewehrungsquerschnitt (mm^2)	17,86
Bewehrungsgehalt	1,19 %
Verwendeter Beton	Mischung C5 (gem. Tabelle 2)
Anzahl geprüfter Körper	4
Anmerkungen	



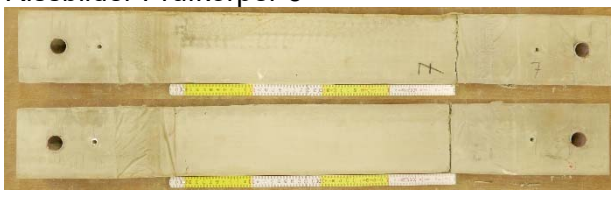


Rissbilder Prüfkörper 1

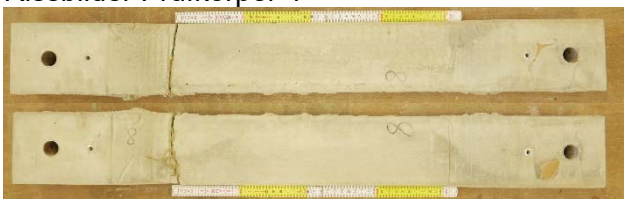
Rissbilder Prüfkörper 2



Rissbilder Prüfkörper 3

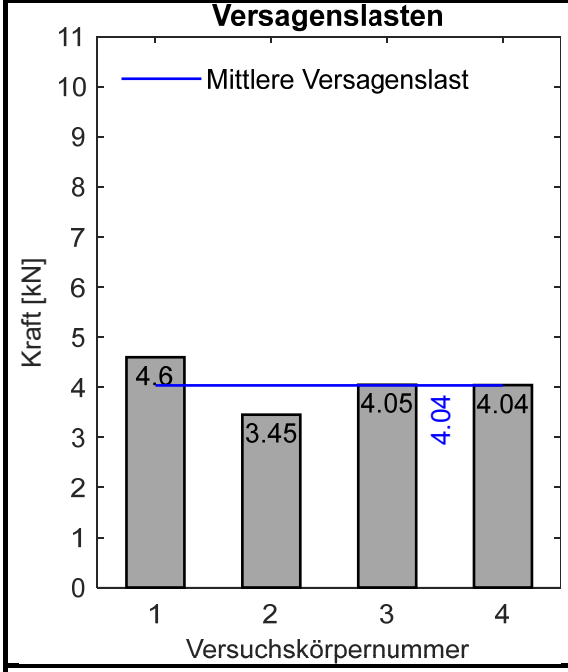


Rissbilder Prüfkörper 4

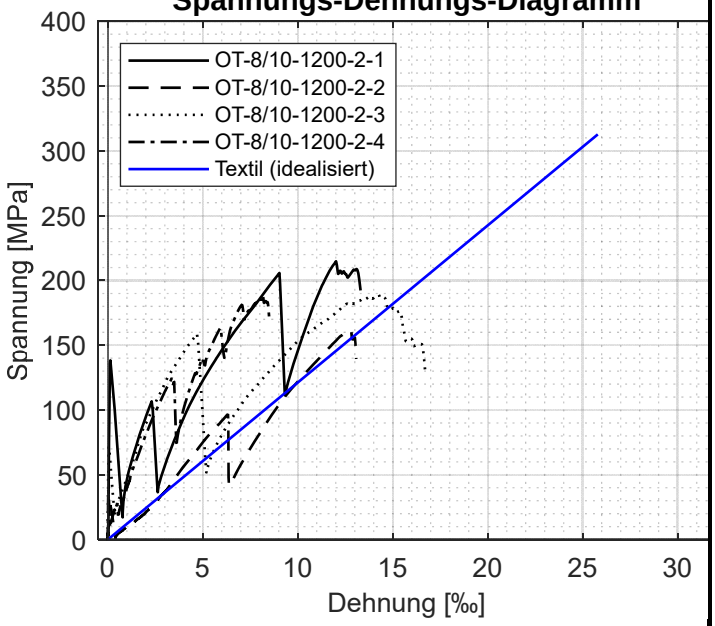


Bezeichnung	**OT-8/10-1200-2-x**
Verwendetes Textil	
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)	8/10
Feinheit Schussfäden (*tex*)	1200
Tränkung	Keine
Anzahl der Bewehrungslagen	2
Bewehrungsquerschnitt (mm^2)	21,43
Bewehrungsgehalt	1,43 %
Verwendeter Beton	Mischung C5 (gem. Tabelle 2)
Anzahl geprüfter Körper	4
Anmerkungen	Fehlstellen im Bereich des Steges: Textilien teilweise nicht vollständig von Betonmatrix umfasst (Nr. 1 bis 4)

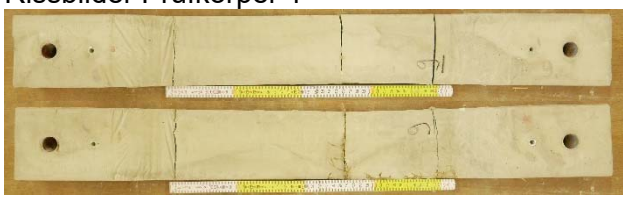
Versagenslasten



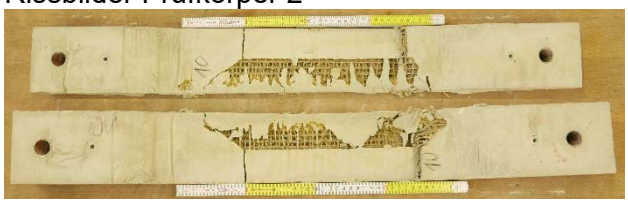
Spannungs-Dehnungs-Diagramm



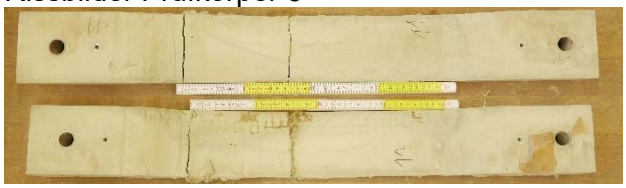
Rissbilder Prüfkörper 1



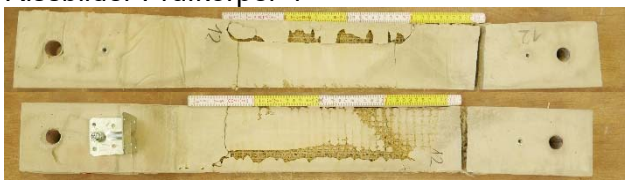
Rissbilder Prüfkörper 2



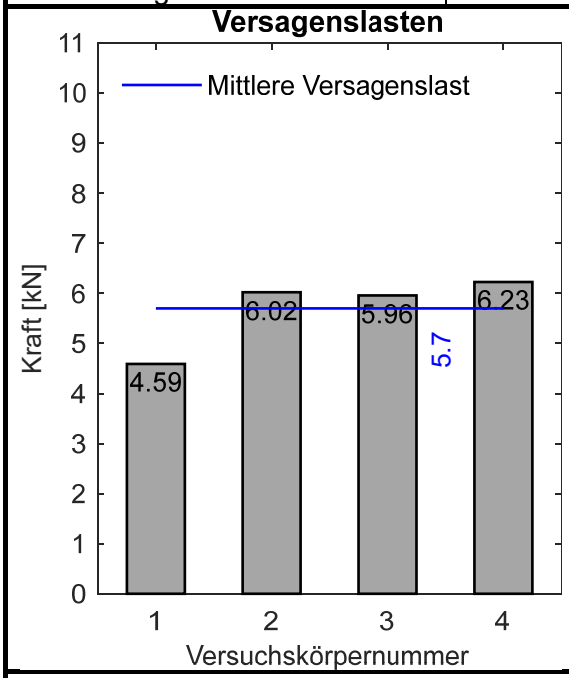
Rissbilder Prüfkörper 3

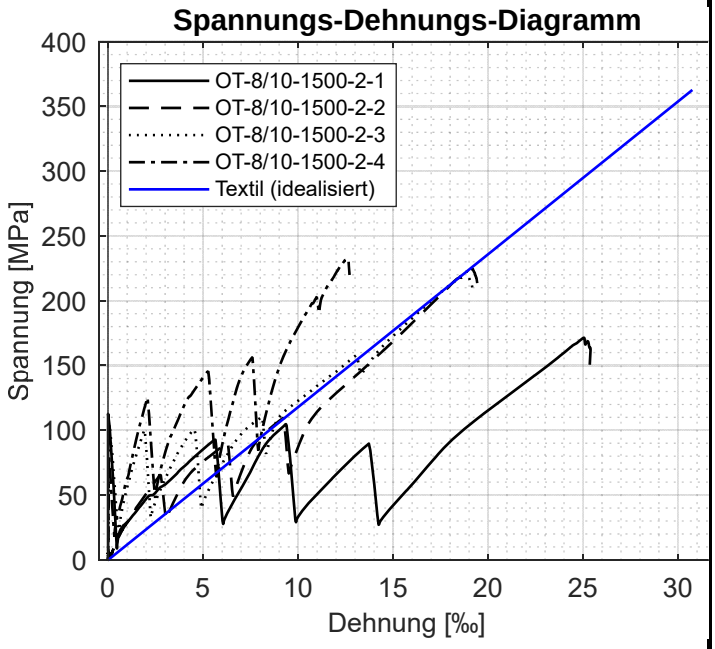


Rissbilder Prüfkörper 4

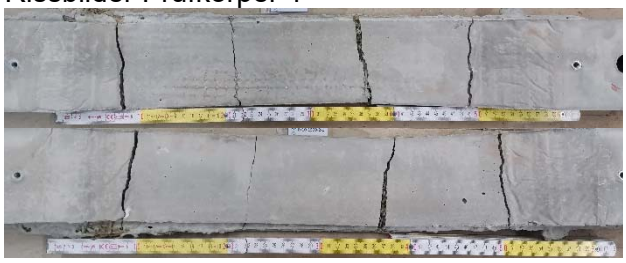


Bezeichnung	**OT-8/10-1500-2-x**
Verwendetes Textil	
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)	8/10
Feinheit Schussfäden (*tex*)	1500
Tränkung	Keine
Anzahl der Bewehrungslagen	2
Bewehrungsquerschnitt (mm^2)	26,79
Bewehrungsgehalt	1,77 %
Verwendeter Beton	Mischung C5 (gem. Tabelle 2)
Anzahl geprüfter Körper	4
Anmerkungen	

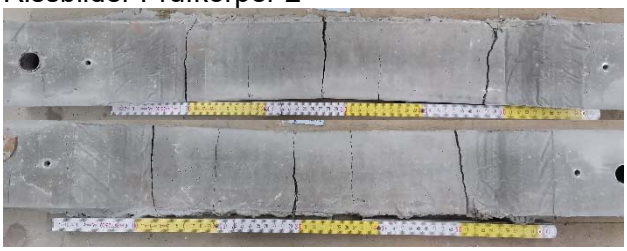




Rissbilder Prüfkörper 1

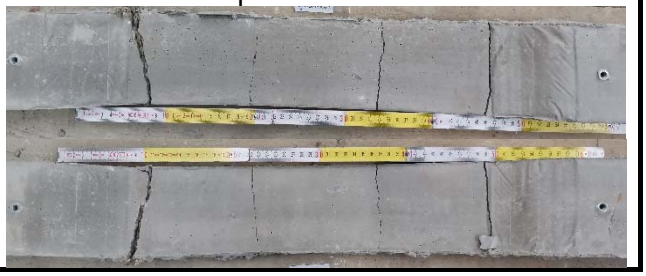


Rissbilder Prüfkörper 2

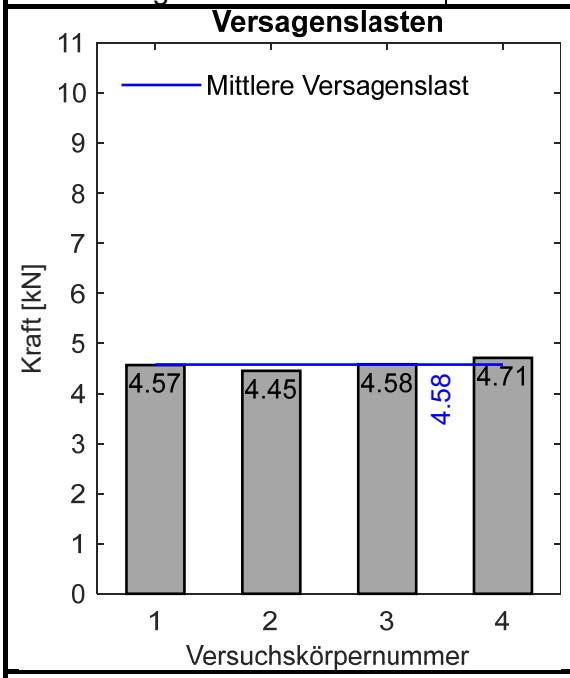


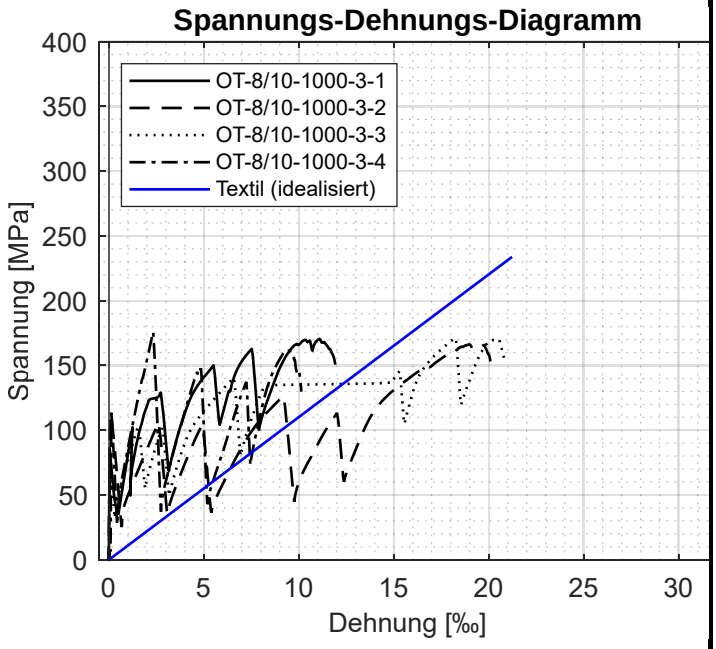
Rissbilder Prüfkörper 3

Rissbilder Prüfkörper 4

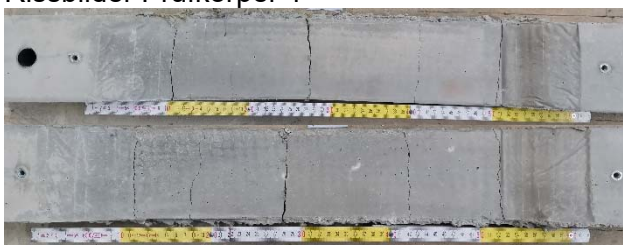


Bezeichnung	**OT-8/10-1000-3-x**
Verwendetes Textil	
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)	8/10
Feinheit Schussfäden (*tex*)	1000
Tränkung	Keine
Anzahl der Bewehrungslagen	3
Bewehrungsquerschnitt (*mm²*)	26,79
Bewehrungsgehalt	1,77 %
Verwendeter Beton	Mischung C5 (gem. Tabelle 2)
Anzahl geprüfter Körper	4
Anmerkungen	

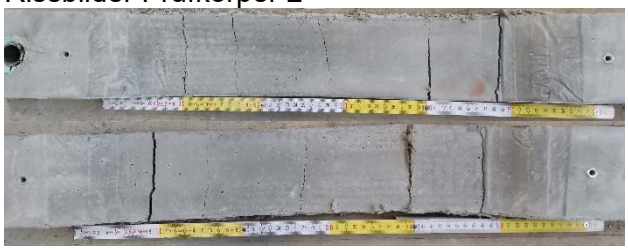




Rissbilder Prüfkörper 1

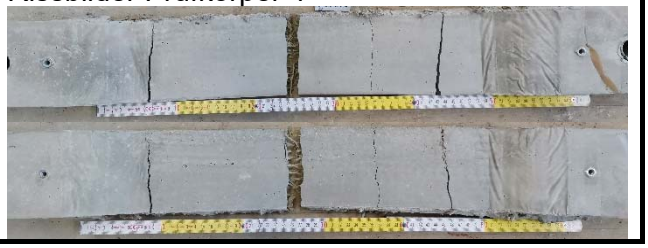


Rissbilder Prüfkörper 2

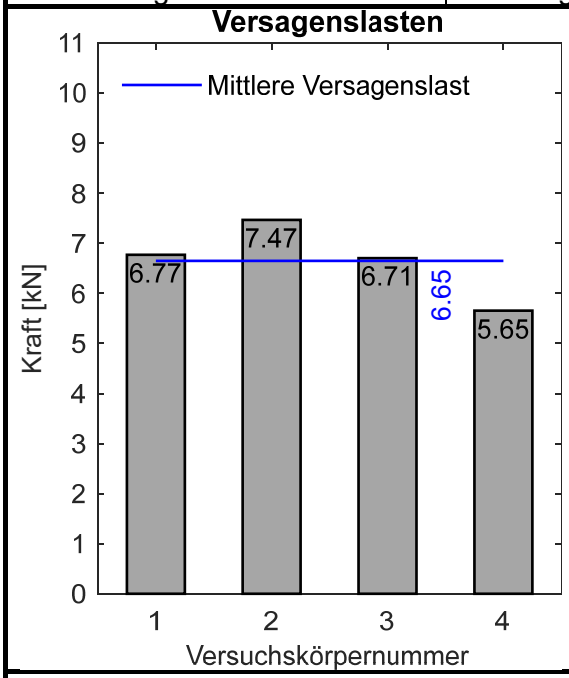


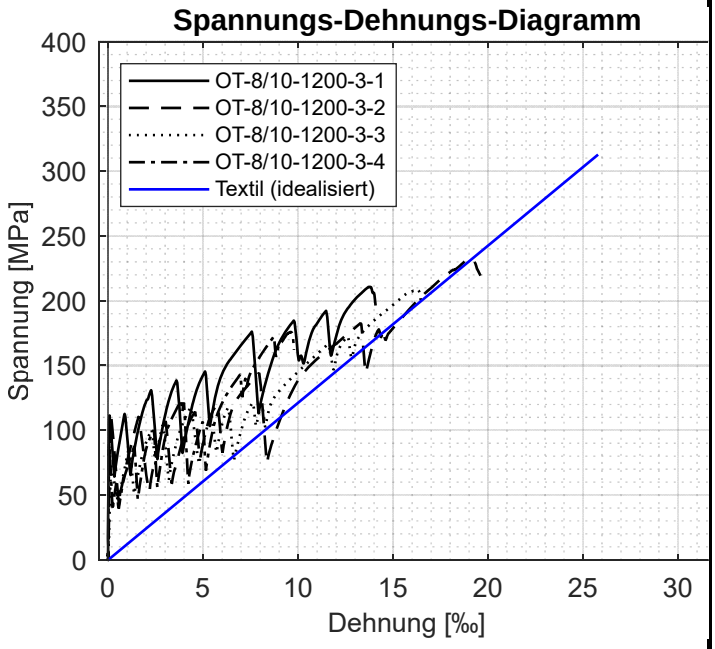
Rissbilder Prüfkörper 3

Rissbilder Prüfkörper 4

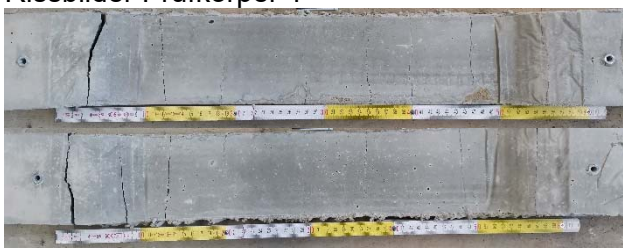


Bezeichnung	**OT-8/10-1200-3-x**
Verwendetes Textil	
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)	8/10
Feinheit Schussfäden (*tex*)	1200
Tränkung	Keine
Anzahl der Bewehrungslagen	3
Bewehrungsquerschnitt (mm^2)	32,14
Bewehrungsgehalt	2,14 %
Verwendeter Beton	Mischung C5 (gem. Tabelle 2)
Anzahl geprüfter Körper	4
Anmerkungen	Vorzeitiges Versagen im Kopfbereich (Nr. 1 bis 4)



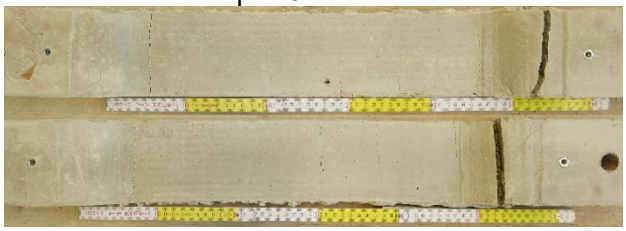


Rissbilder Prüfkörper 1



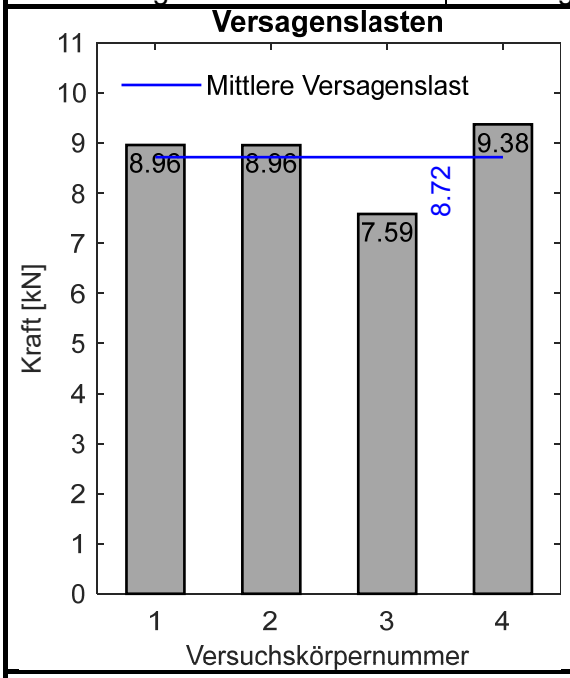
Rissbilder Prüfkörper 2

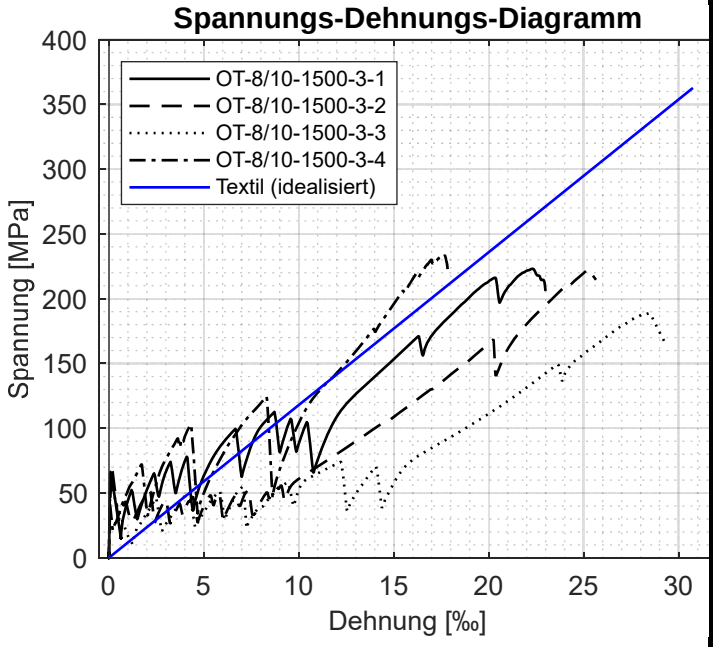
Rissbilder Prüfkörper 3



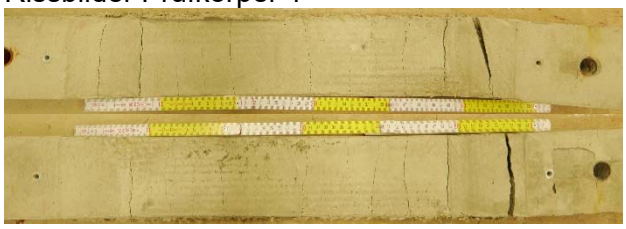
Rissbilder Prüfkörper 4

Bezeichnung	**OT-8/10-1500-3-x**
Verwendetes Textil	
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)	8/10
Feinheit Schussfäden (*tex*)	1500
Tränkung	Keine
Anzahl der Bewehrungslagen	3
Bewehrungsquerschnitt (*mm²*)	40,18
Bewehrungsgehalt	2,68 %
Verwendeter Beton	Mischung C5 (gem. Tabelle 2)
Anzahl geprüfter Körper	4
Anmerkungen	Vorzeitiges Versagen im Kopfbereich (Nr. 1 bis 3)



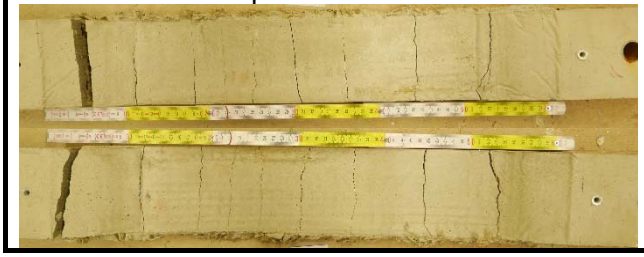


Rissbilder Prüfkörper 1



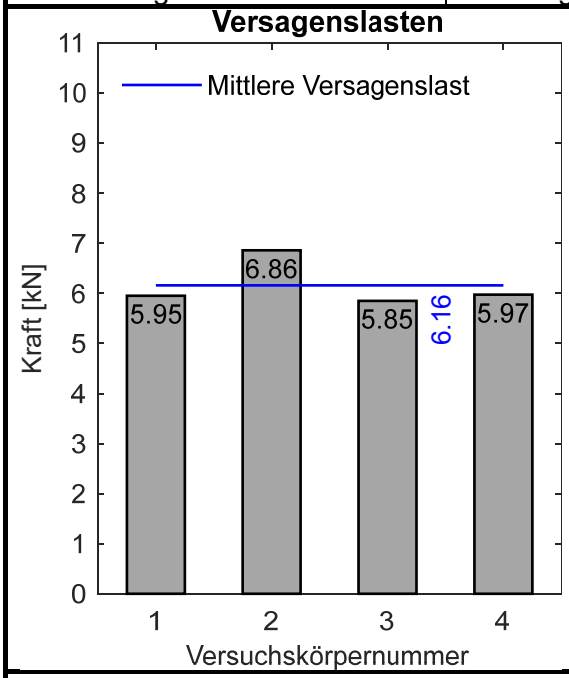
Rissbilder Prüfkörper 2

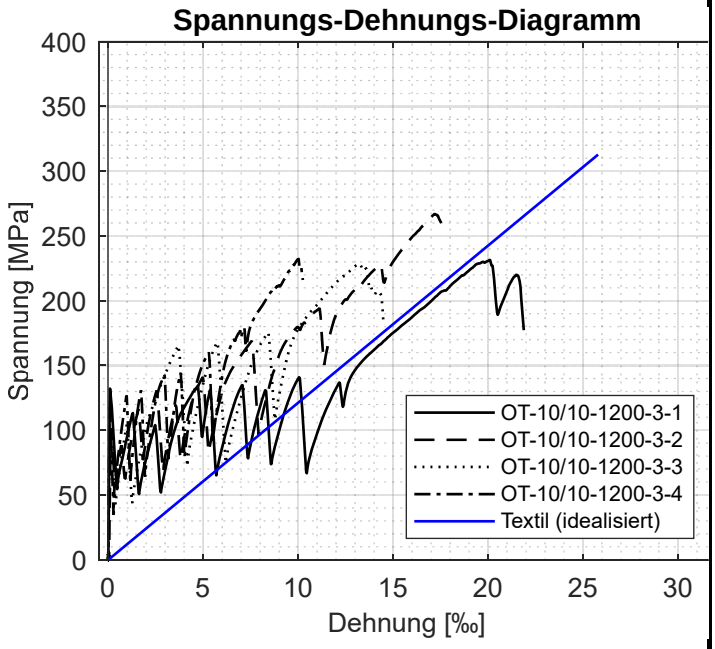
Rissbilder Prüfkörper 3



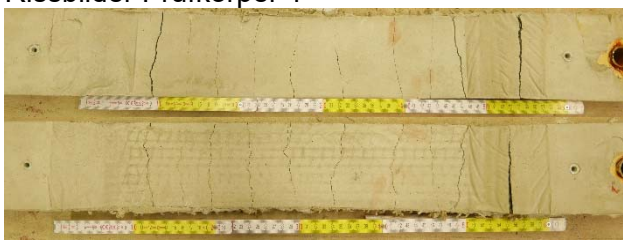
Rissbilder Prüfkörper 4

Bezeichnung	**OT-10/10-1200-3-x**
Verwendetes Textil	
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)	10/10
Feinheit Schussfäden (*tex*)	1200
Tränkung	Keine
Anzahl der Bewehrungslagen	3
Bewehrungsquerschnitt (mm^2)	25,71
Bewehrungsgehalt	1,71 %
Verwendeter Beton	Mischung C5 (gem. Tabelle 2)
Anzahl geprüfter Körper	4
Anmerkungen	Vorzeitiges Versagen im Kopfbereich (Nr. 1 und 2)



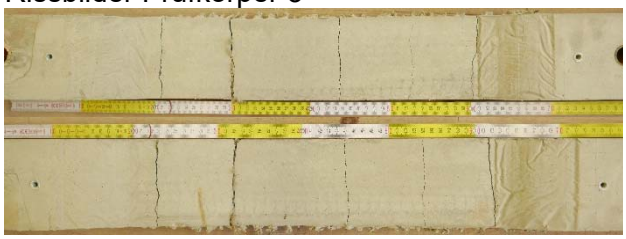


Rissbilder Prüfkörper 1



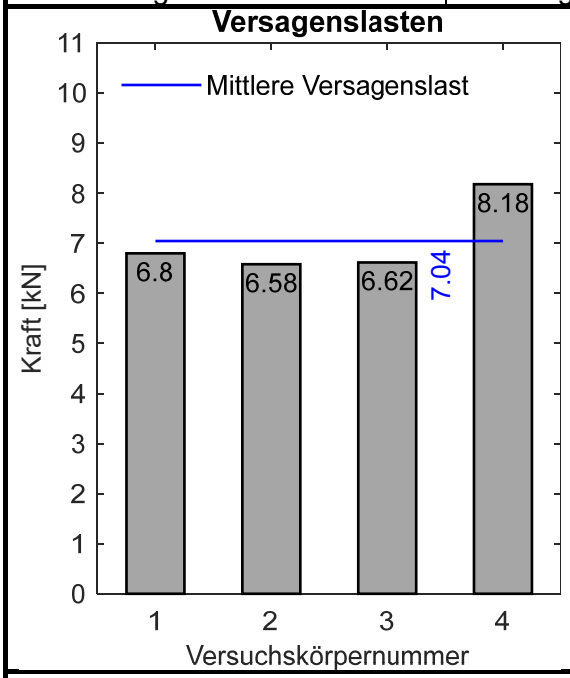
Rissbilder Prüfkörper 2

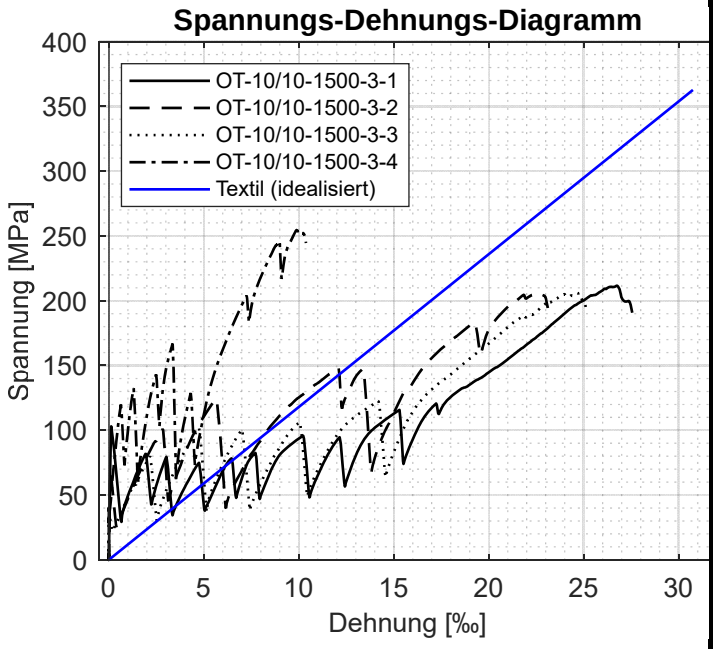
Rissbilder Prüfkörper 3



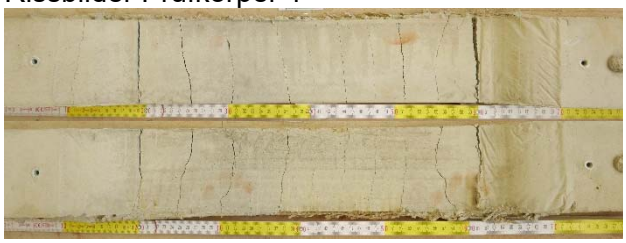
Rissbilder Prüfkörper 4

Bezeichnung	**OT-10/10-1500-3-x**
Verwendetes Textil	
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)	10/10
Feinheit Schussfäden (*tex*)	1500
Tränkung	Keine
Anzahl der Bewehrungslagen	3
Bewehrungsquerschnitt (*mm²*)	32,14
Bewehrungsgehalt	2,14 %
Verwendeter Beton	Mischung C5 (gem. Tabelle 2)
Anzahl geprüfter Körper	4
Anmerkungen	Vorzeitiges Versagen im Kopfbereich (Nr. 2)

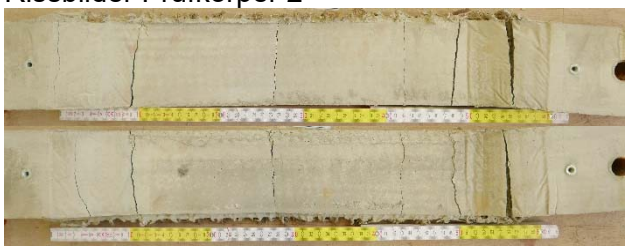




Rissbilder Prüfkörper 1



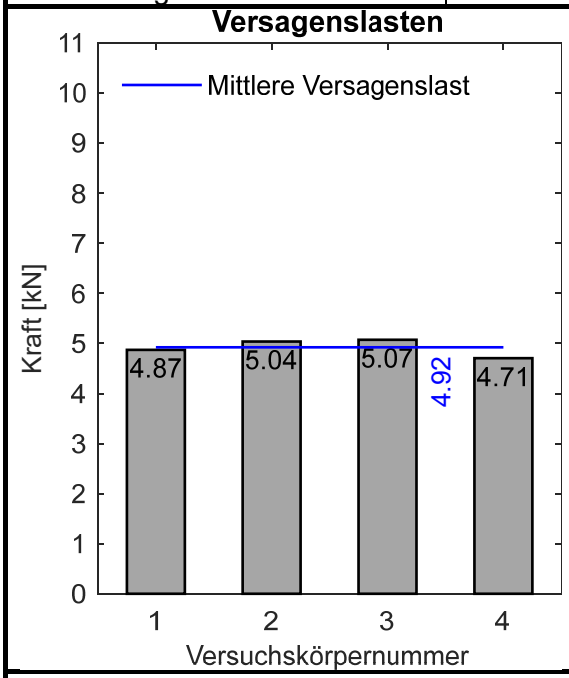
Rissbilder Prüfkörper 2

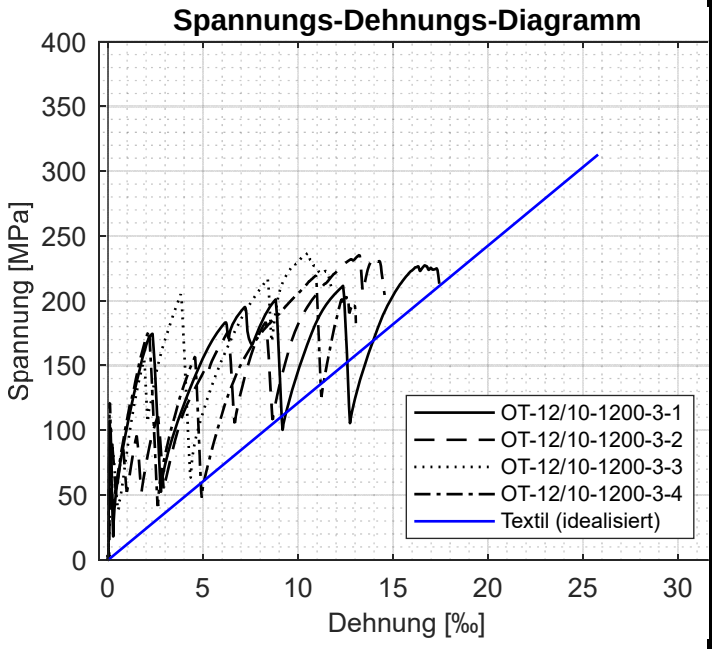


Rissbilder Prüfkörper 3

Rissbilder Prüfkörper 4

Bezeichnung	**OT-12/10-1200-3-x**
Verwendetes Textil	
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)	12/10
Feinheit Schussfäden (*tex*)	1200
Tränkung	Keine
Anzahl der Bewehrungslagen	3
Bewehrungsquerschnitt (mm^2)	25,71
Bewehrungsgehalt	1,71 %
Verwendeter Beton	Mischung C5 (gem. Tabelle 2)
Anzahl geprüfter Körper	4
Anmerkungen	

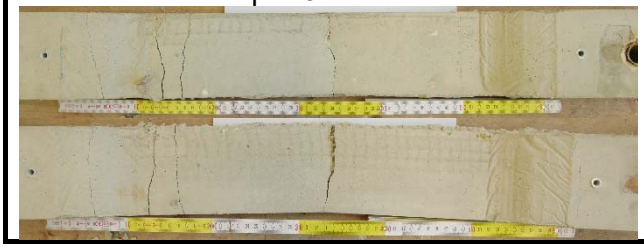




Rissbilder Prüfkörper 1

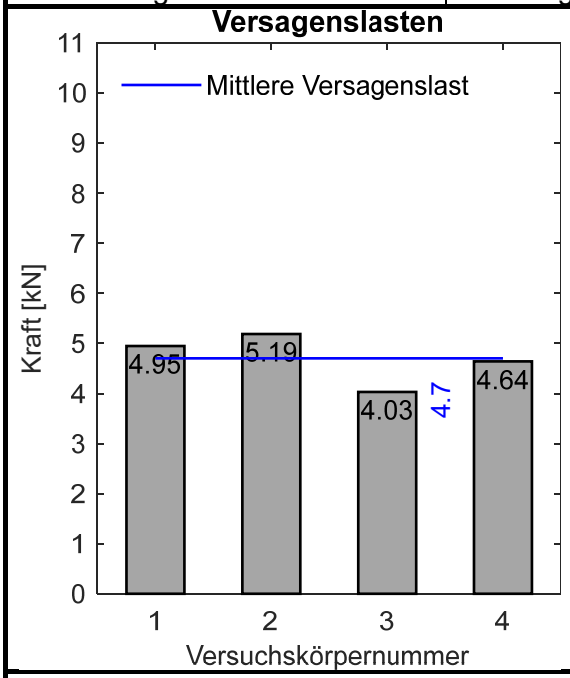
Rissbilder Prüfkörper 2

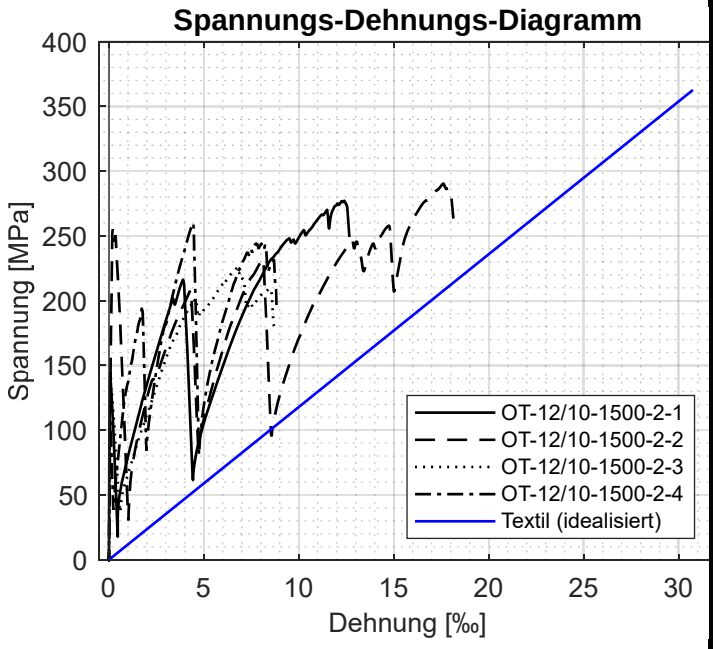
Rissbilder Prüfkörper 3



Rissbilder Prüfkörper 4

Bezeichnung	**OT-12/10-1500-2-x**
Verwendetes Textil	
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)	12/10
Feinheit Schussfäden (*tex*)	1500
Tränkung	Keine
Anzahl der Bewehrungslagen	2
Bewehrungsquerschnitt (mm^2)	17,86
Bewehrungsgehalt	1,19 %
Verwendeter Beton	Mischung C5 (gem. Tabelle 2)
Anzahl geprüfter Körper	4
Anmerkungen	Vorzeitiges Versagen im Kopfbereich (Nr. 3)

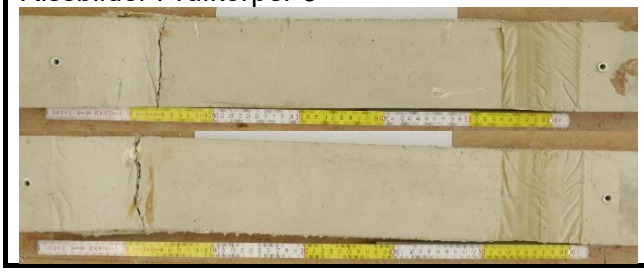




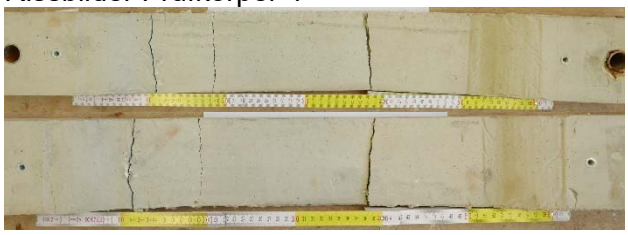
Rissbilder Prüfkörper 1

Rissbilder Prüfkörper 2

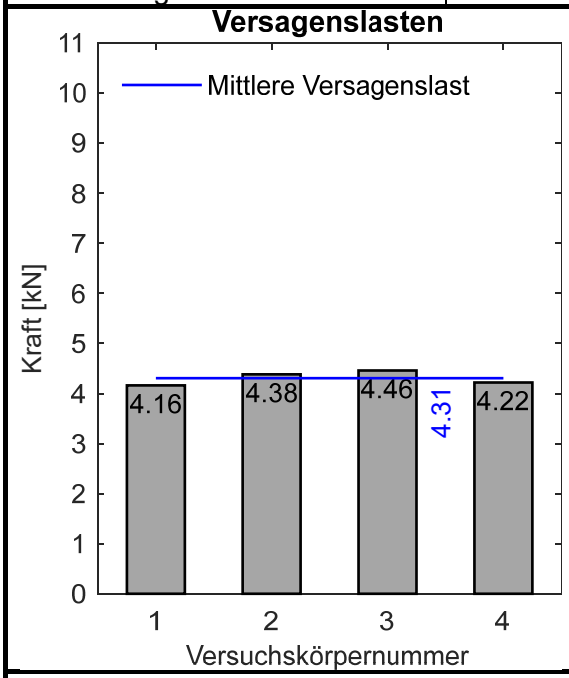
Rissbilder Prüfkörper 3

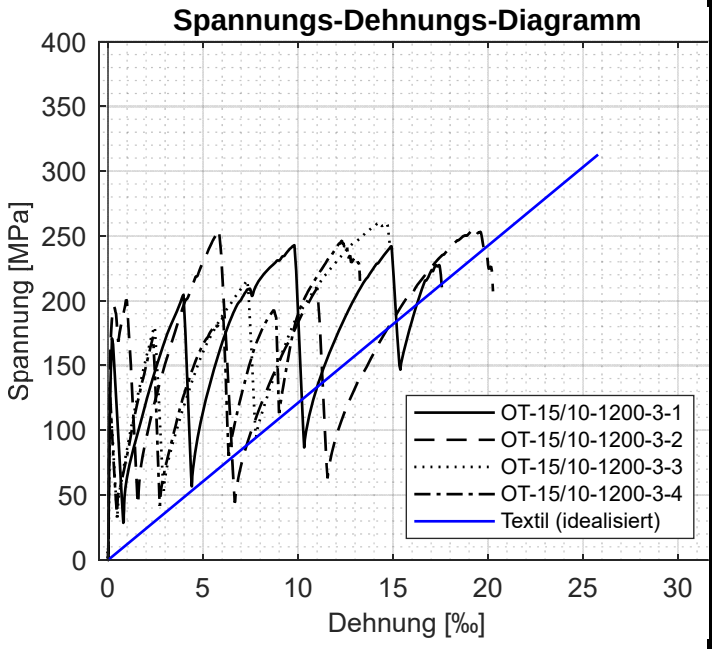


Rissbilder Prüfkörper 4

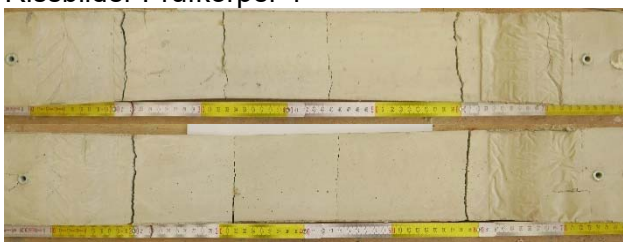


Bezeichnung	**OT-15/10-1200-3-x**
Verwendetes Textil	
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)	15/10
Feinheit Schussfäden (*tex*)	1200
Tränkung	Keine
Anzahl der Bewehrungslagen	3
Bewehrungsquerschnitt (mm^2)	17,14
Bewehrungsgehalt	1,14 %
Verwendeter Beton	Mischung C5 (gem. Tabelle 2)
Anzahl geprüfter Körper	4
Anmerkungen	





Rissbilder Prüfkörper 1

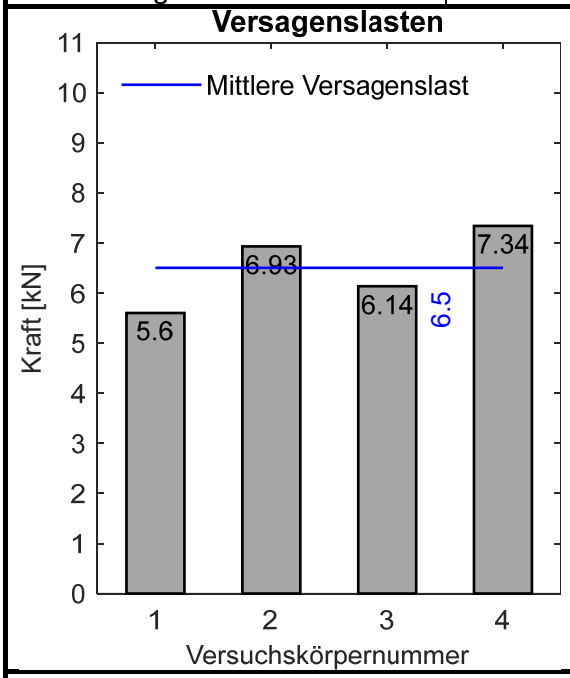


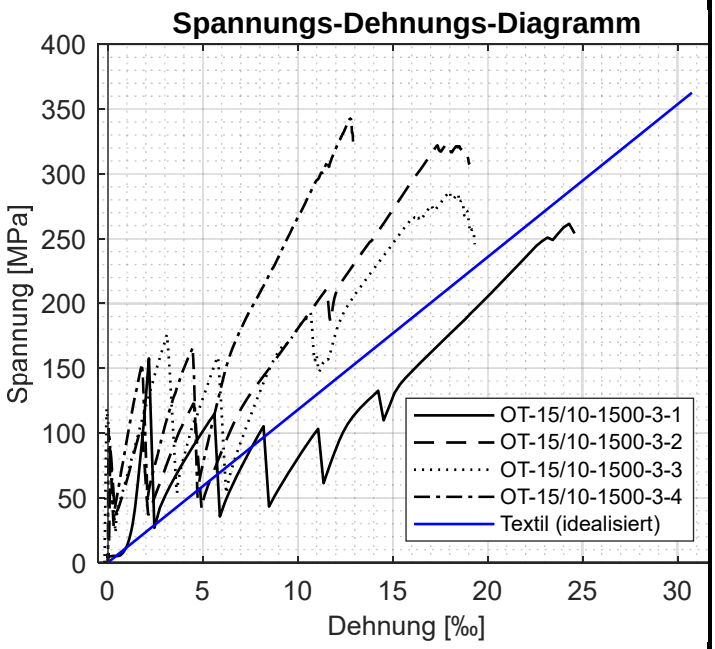
Rissbilder Prüfkörper 2

Rissbilder Prüfkörper 3

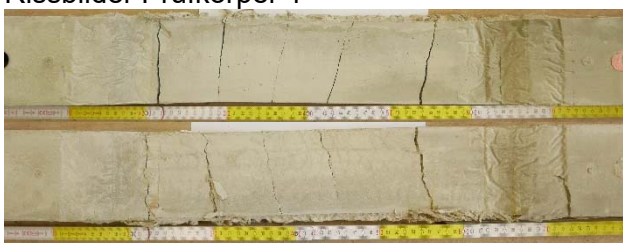
Rissbilder Prüfkörper 4

Bezeichnung	**OT-15/10-1500-3-x**
Verwendetes Textil	
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)	15/10
Feinheit Schussfäden (*tex*)	1500
Tränkung	Keine
Anzahl der Bewehrungslagen	3
Bewehrungsquerschnitt (mm^2)	21,43
Bewehrungsgehalt	1,43 %
Verwendeter Beton	Mischung C5 (gem. Tabelle 2)
Anzahl geprüfter Körper	4
Anmerkungen	Wegmessung bei Nr. 1 aus Prüfmaschine (keine Wegaufnehmer installierbar)





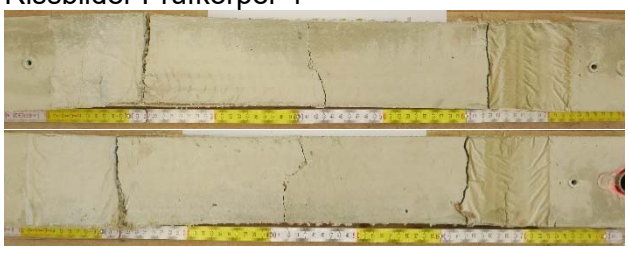
Rissbilder Prüfkörper 1



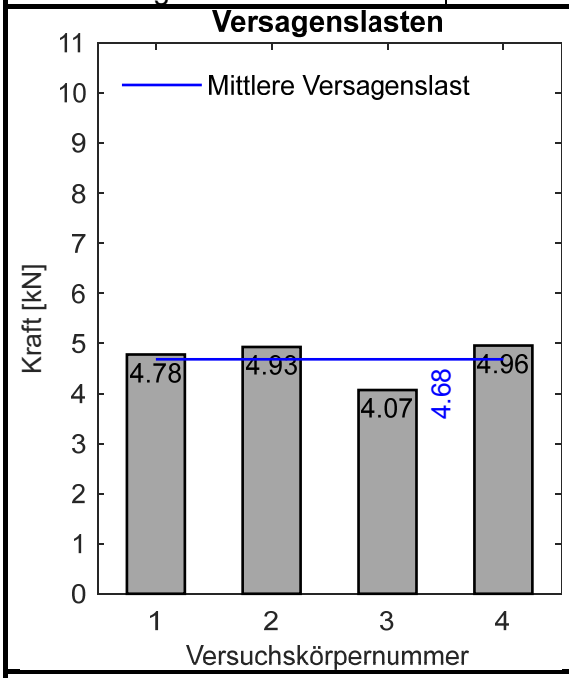
Rissbilder Prüfkörper 2

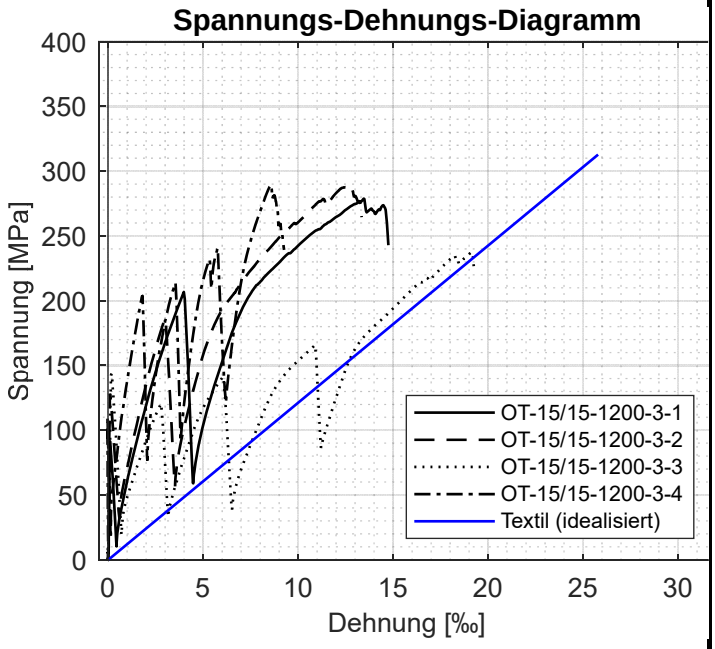
Rissbilder Prüfkörper 3

Rissbilder Prüfkörper 4



Bezeichnung	**OT-15/15-1200-3-x**	
Verwendetes Textil		
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)		15/15
Feinheit Schussfäden (*tex*)		1200
Tränkung		Keine
Anzahl der Bewehrungslagen	3	
Bewehrungsquerschnitt (mm^2)	17,14	
Bewehrungsgehalt	1,14 %	
Verwendeter Beton	Mischung C5 (gem. Tabelle 2)	
Anzahl geprüfter Körper	4	
Anmerkungen		





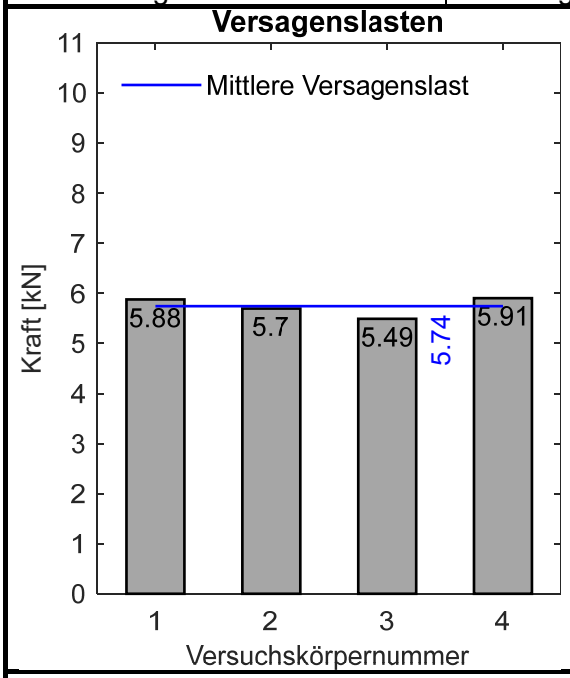
Rissbilder Prüfkörper 1

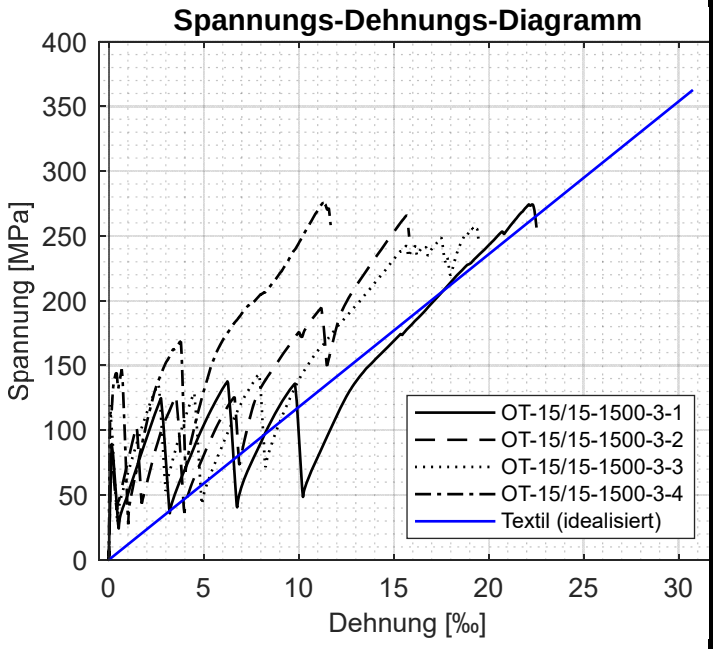
Rissbilder Prüfkörper 2

Rissbilder Prüfkörper 3

Rissbilder Prüfkörper 4

Bezeichnung	**OT-15/15-1500-3-x**
Verwendetes Textil	
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)	15/15
Feinheit Schussfäden (*tex*)	1500
Tränkung	Keine
Anzahl der Bewehrungslagen	3
Bewehrungsquerschnitt (mm^2)	21,43
Bewehrungsgehalt	1,43 %
Verwendeter Beton	Mischung C5 (gem. Tabelle 2)
Anzahl geprüfter Körper	4
Anmerkungen	Vorzeitiges Versagen im Kopfbereich (Nr. 2 und 4)





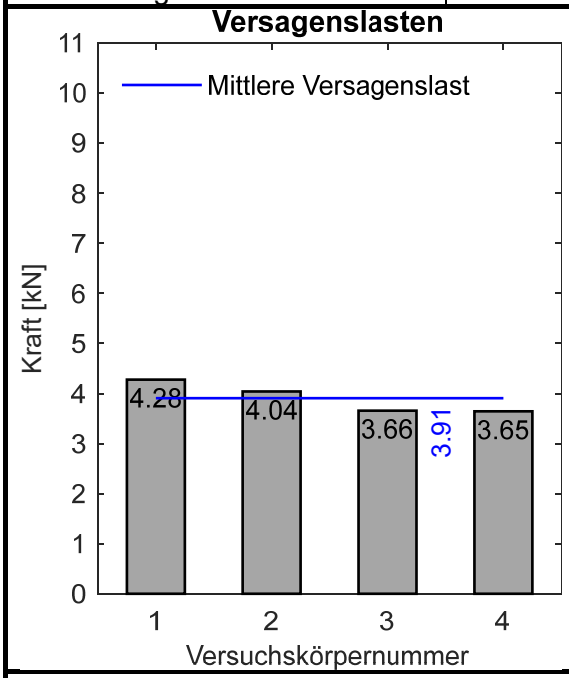
Rissbilder Prüfkörper 1

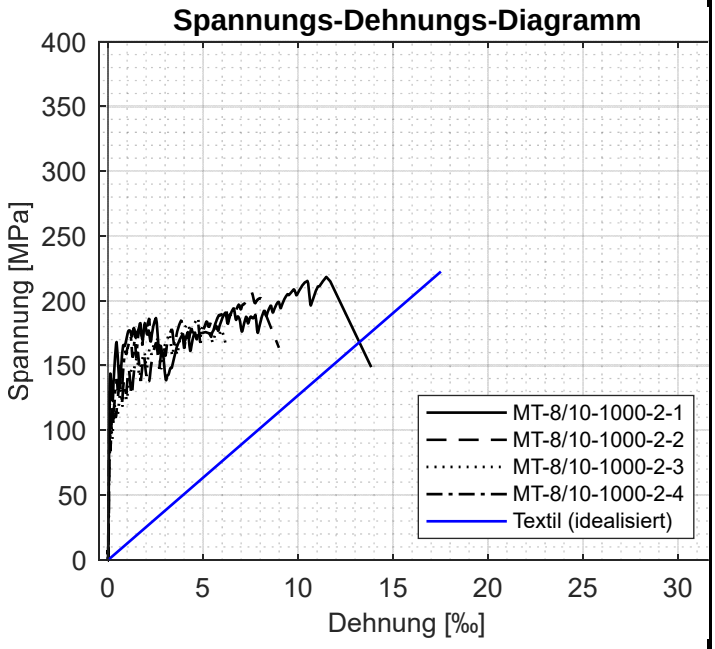
Rissbilder Prüfkörper 2

Rissbilder Prüfkörper 3

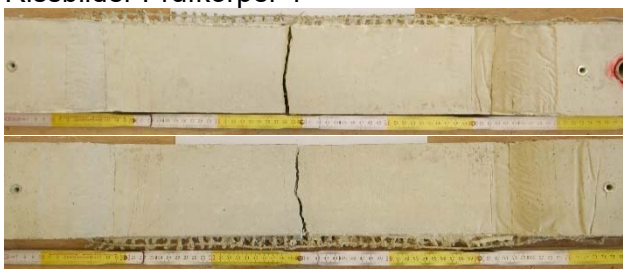
Rissbilder Prüfkörper 4

Bezeichnung	**MT-8/10-1000-2-x**
Verwendetes Textil	
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)	8/10
Feinheit Schussfäden (*tex*)	1000
Tränkung	SICOMIN GreenPoxy 56
Anzahl der Bewehrungslagen	2
Bewehrungsquerschnitt (mm^2)	19,59
Bewehrungsgehalt	1,31 %
Verwendeter Beton	Mischung C5 (gem. Tabelle 2)
Anzahl geprüfter Körper	4
Anmerkungen	

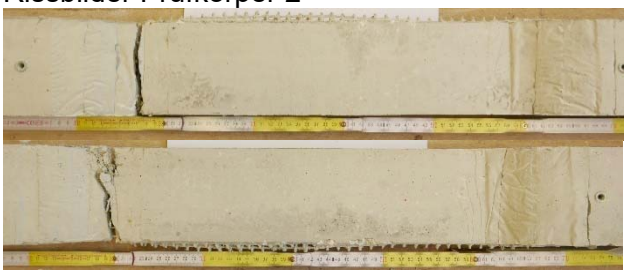




Rissbilder Prüfkörper 1

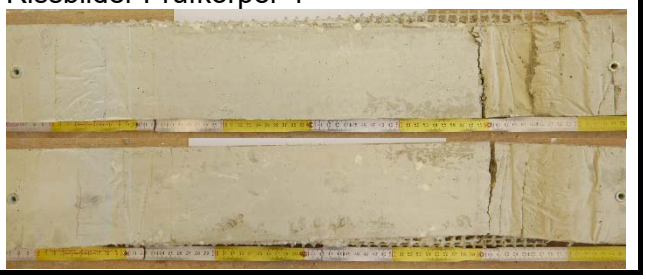


Rissbilder Prüfkörper 2

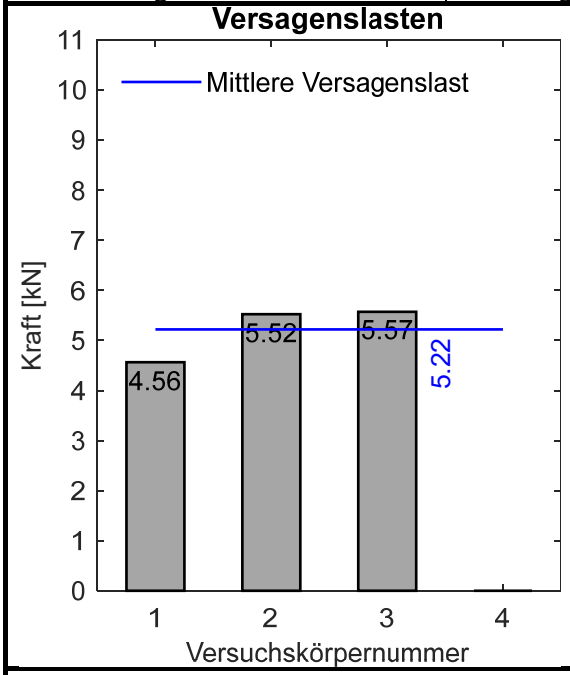


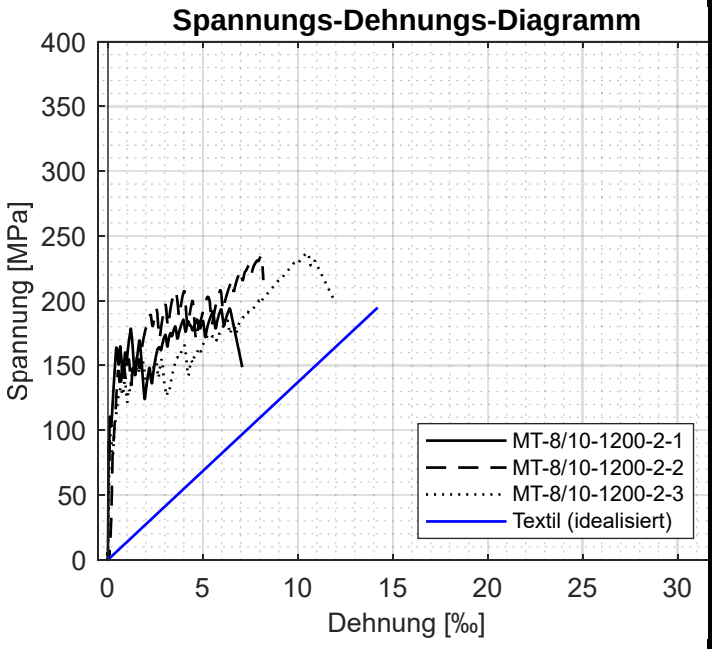
Rissbilder Prüfkörper 3

Rissbilder Prüfkörper 4



Bezeichnung	**MT-8/10-1200-2-x**
Verwendetes Textil	
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)	8/10
Feinheit Schussfäden (*tex*)	1200
Tränkung	SICOMIN GreenPoxy 56
Anzahl der Bewehrungslagen	2
Bewehrungsquerschnitt (mm^2)	23,52
Bewehrungsgehalt	1,57 %
Verwendeter Beton	Mischung C5 (gem. Tabelle 2)
Anzahl geprüfter Körper	3
Anmerkungen	Vorzeitiges Versagen im Kopfbereich (Nr. 2)

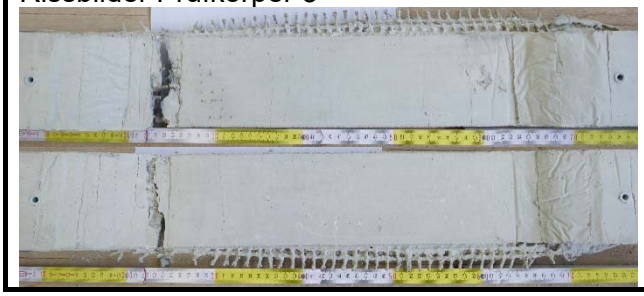




Rissbilder Prüfkörper 1

Rissbilder Prüfkörper 2

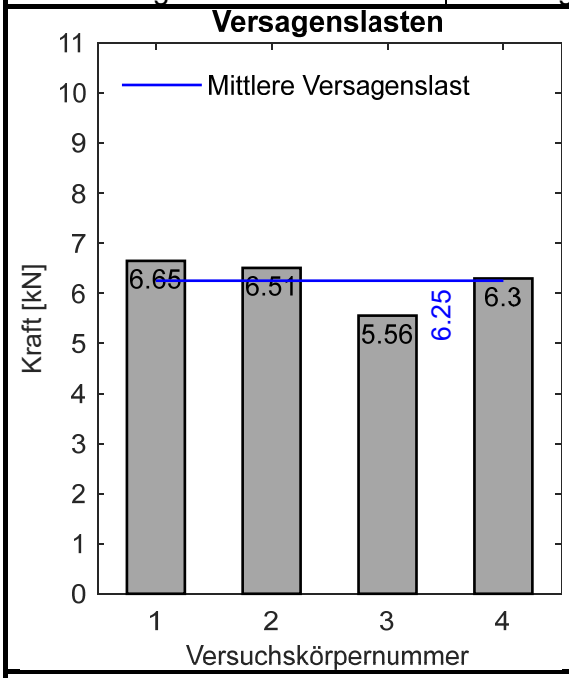
Rissbilder Prüfkörper 3

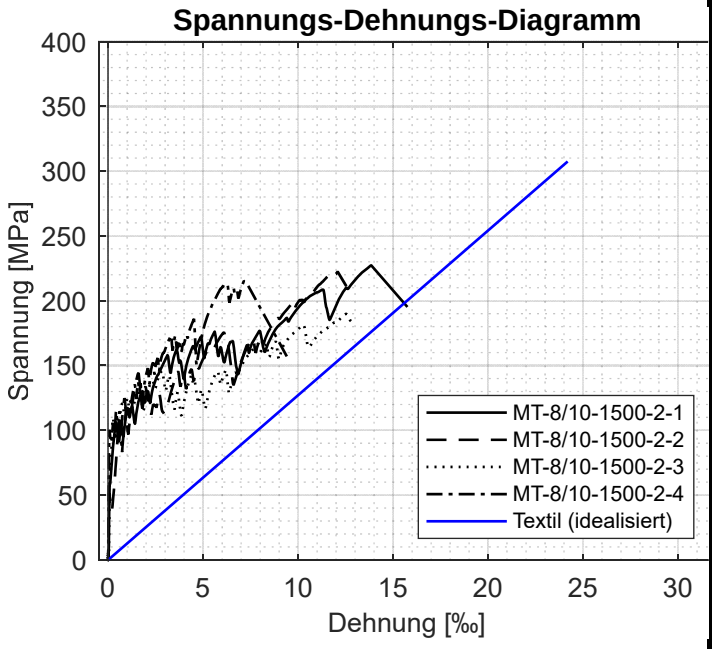


Rissbilder Prüfkörper 4

/

Bezeichnung	**MT-8/10-1500-2-x**
Verwendetes Textil	
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)	8/10
Feinheit Schussfäden (*tex*)	1500
Tränkung	SICOMIN GreenPoxy 56
Anzahl der Bewehrungslagen	2
Bewehrungsquerschnitt (mm^2)	29,26
Bewehrungsgehalt	1,95 %
Verwendeter Beton	Mischung C5 (gem. Tabelle 2)
Anzahl geprüfter Körper	4
Anmerkungen	Vorzeitiges Versagen im Kopfbereich (Nr. 2 und 3)





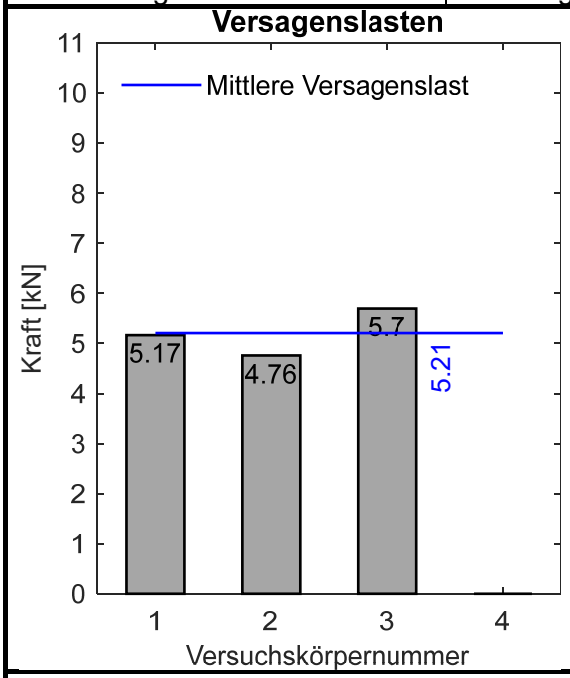
Rissbilder Prüfkörper 1

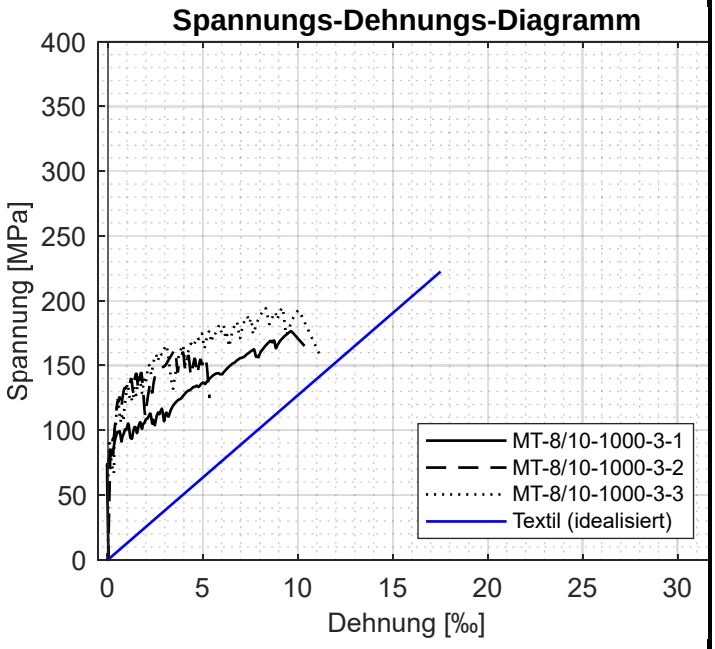
Rissbilder Prüfkörper 2

Rissbilder Prüfkörper 3

Rissbilder Prüfkörper 4

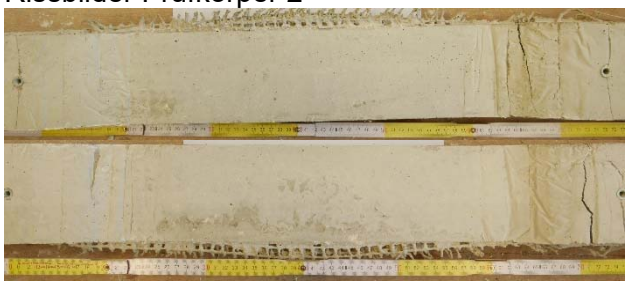
Bezeichnung	**MT-8/10-1000-3-x**
Verwendetes Textil	
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)	8/10
Feinheit Schussfäden (*tex*)	1000
Tränkung	SICOMIN GreenPoxy 56
Anzahl der Bewehrungslagen	3
Bewehrungsquerschnitt (mm^2)	29,27
Bewehrungsgehalt	1,95 %
Verwendeter Beton	Mischung C5 (gem. Tabelle 2)
Anzahl geprüfter Körper	3
Anmerkungen	Vorzeitiges Versagen im Kopfbereich (Nr. 2 und 3)



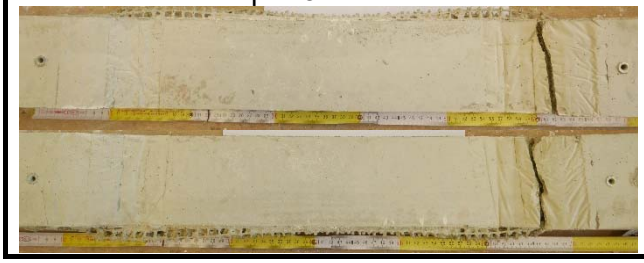


Rissbilder Prüfkörper 1

Rissbilder Prüfkörper 2



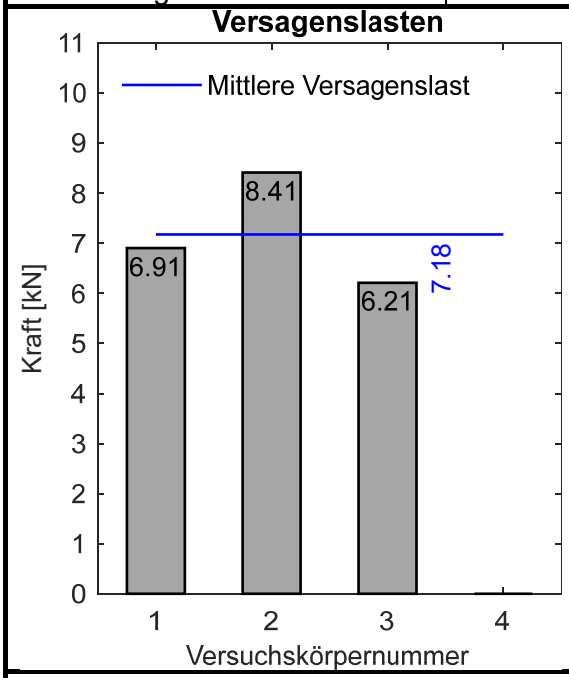
Rissbilder Prüfkörper 3

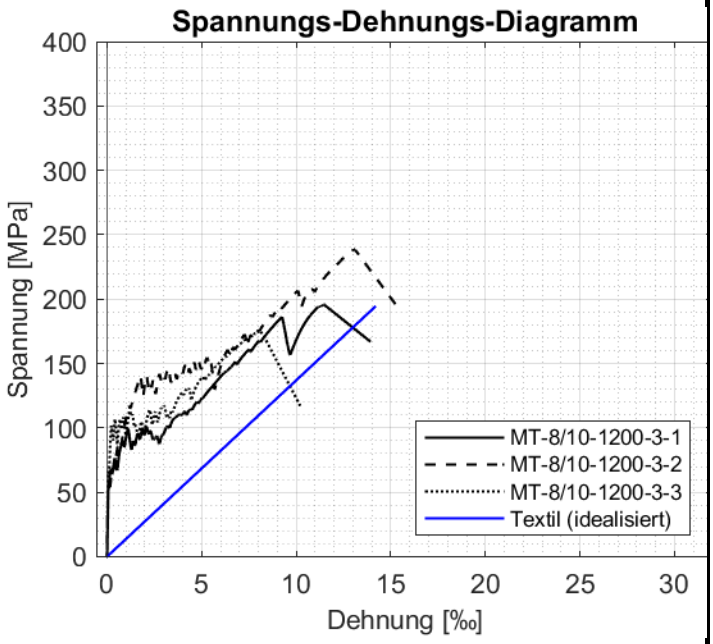


Rissbilder Prüfkörper 4

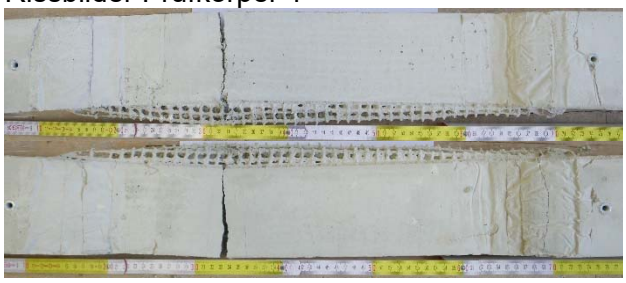
/

Bezeichnung	**MT-8/10-1200-3-x**
Verwendetes Textil	
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)	8/10
Feinheit Schussfäden (*tex*)	1200
Tränkung	SICOMIN GreenPoxy 56
Anzahl der Bewehrungslagen	3
Bewehrungsquerschnitt (mm^2)	35,26
Bewehrungsgehalt	2,35 %
Verwendeter Beton	Mischung C5 (gem. Tabelle 2)
Anzahl geprüfter Körper	3
Anmerkungen	

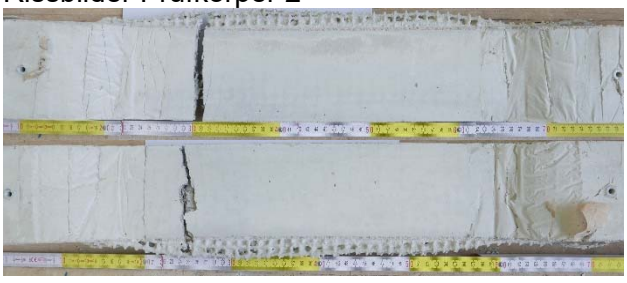




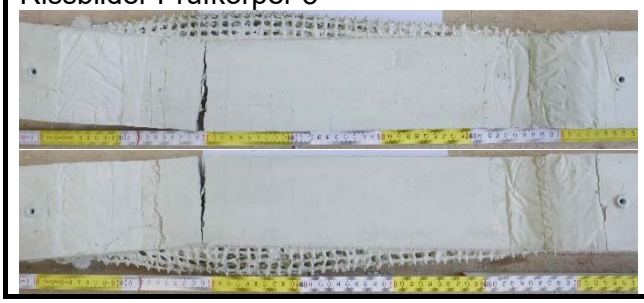
Rissbilder Prüfkörper 1



Rissbilder Prüfkörper 2



Rissbilder Prüfkörper 3

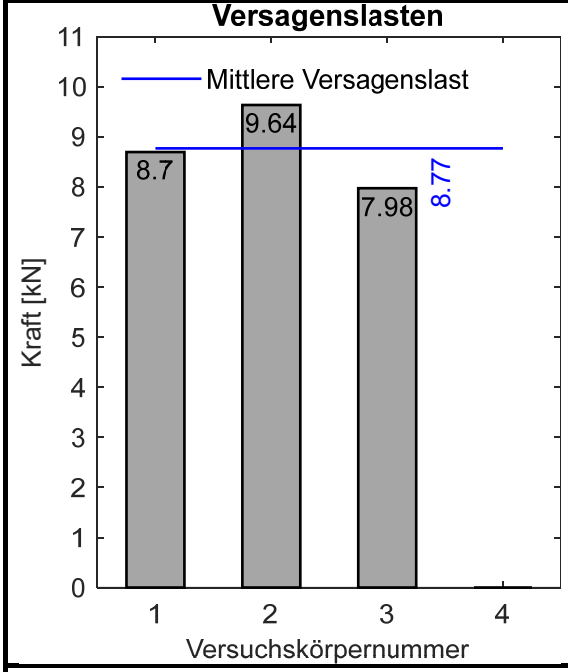


Rissbilder Prüfkörper 4

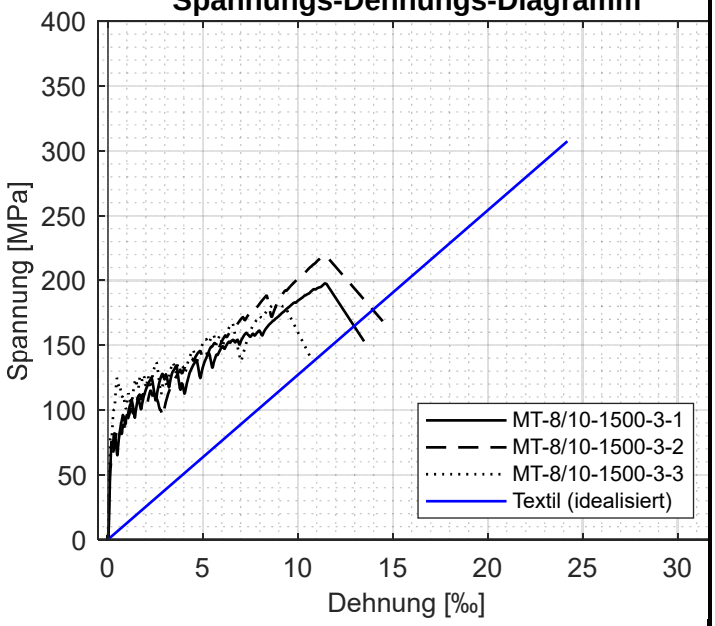
/

Bezeichnung	**MT-8/10-1500-3-x**
Verwendetes Textil	
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)	8/10
Feinheit Schussfäden (*tex*)	1500
Tränkung	SICOMIN GreenPoxy 56
Anzahl der Bewehrungslagen	3
Bewehrungsquerschnitt (mm^2)	43,98
Bewehrungsgehalt	2,93 %
Verwendeter Beton	Mischung C5 (gem. Tabelle 2)
Anzahl geprüfter Körper	3
Anmerkungen	Fehlstellen im Bereich des Steges (Nr. 2); Vorzeitiges Versagen im Kopfbereich (Nr. 2 und 3)

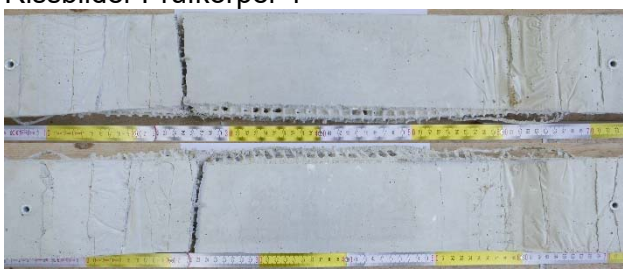
Versagenslasten



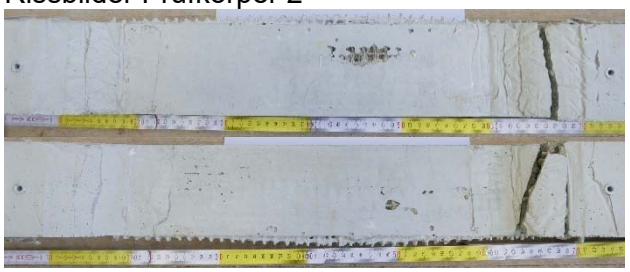
Spannungs-Dehnungs-Diagramm



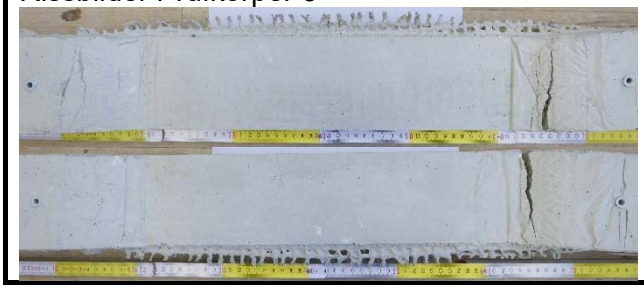
Rissbilder Prüfkörper 1



Rissbilder Prüfkörper 2



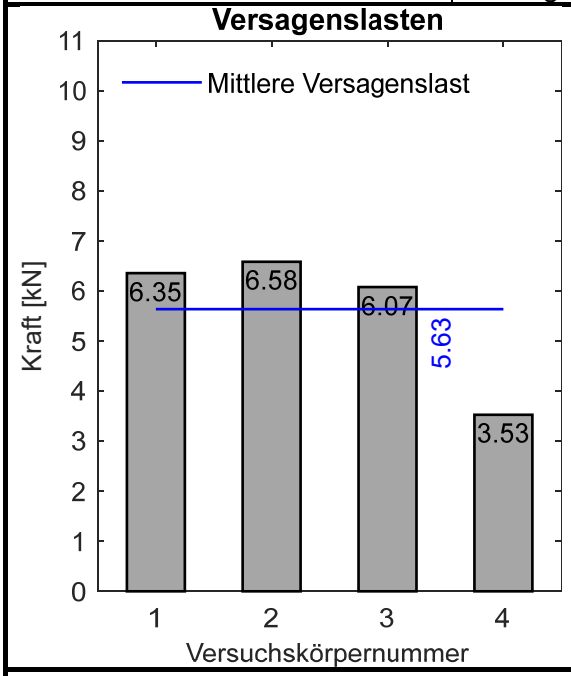
Rissbilder Prüfkörper 3

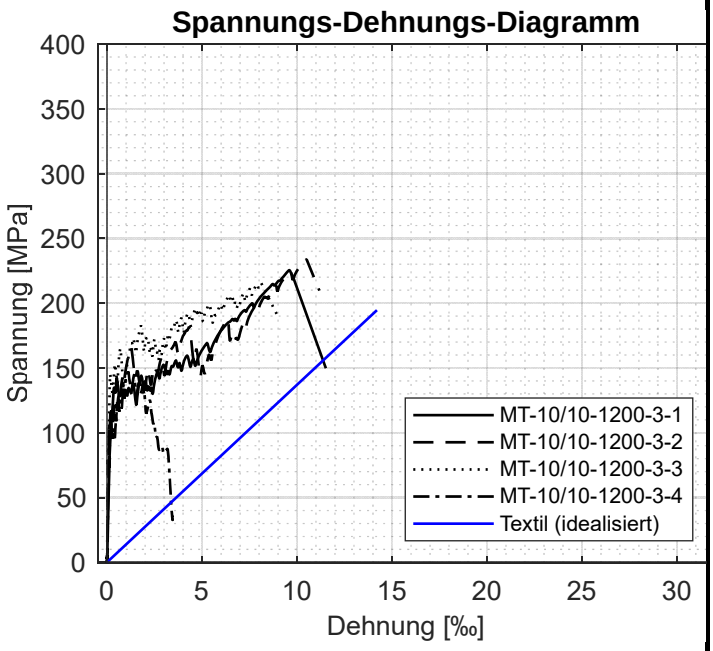


Rissbilder Prüfkörper 4

/

Bezeichnung	**MT-10/10-1200-3-x**
Verwendetes Textil	
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)	10/10
Feinheit Schussfäden (*tex*)	1200
Tränkung	SICOMIN GreenPoxy 56
Anzahl der Bewehrungslagen	3
Bewehrungsquerschnitt (mm^2)	28,17
Bewehrungsgehalt	1,88 %
Verwendeter Beton	Mischung C5 (gem. Tabelle 2)
Anzahl geprüfter Körper	4
Anmerkungen	Geringerer Textilquerschnitt Nr. 4 ($A_t \approx 24$ mm²); Vorzeitiges Versagen im Kopfbereich (Nr. 1 bis 3)





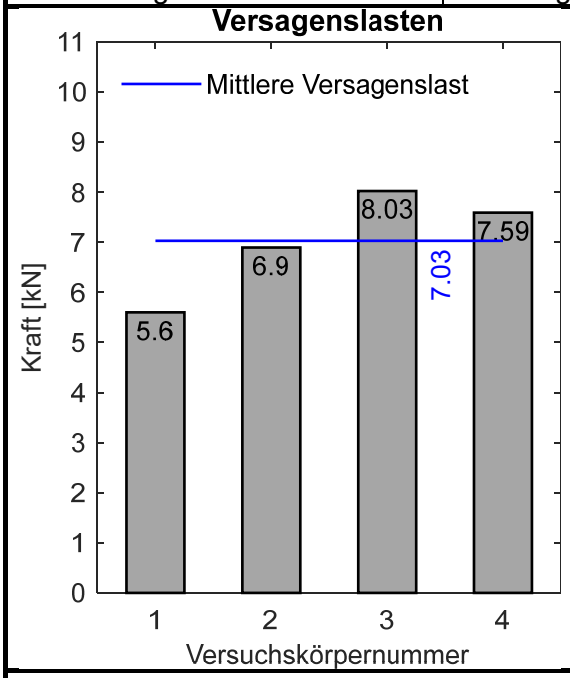
Rissbilder Prüfkörper 1

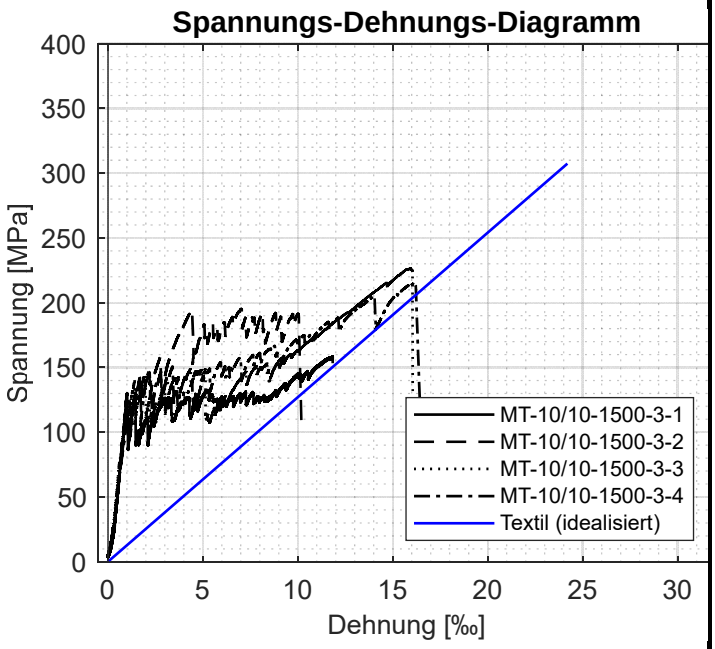
Rissbilder Prüfkörper 2

Rissbilder Prüfkörper 3

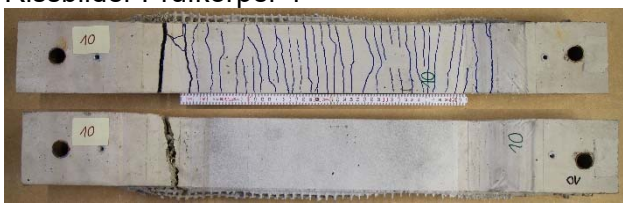
Rissbilder Prüfkörper 4

Bezeichnung	**MT-10/10-1500-3-x**
Verwendetes Textil	
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)	10/10
Feinheit Schussfäden (*tex*)	1500
Tränkung	SICOMIN GreenPoxy 56
Anzahl der Bewehrungslagen	3
Bewehrungsquerschnitt (mm^2)	35,33
Bewehrungsgehalt	2,36 %
Verwendeter Beton	Mischung C5 (gem. Tabelle 2)
Anzahl geprüfter Körper	4
Anmerkungen	Vorzeitiges Versagen im Kopfbereich (Nr. 1 und 3)



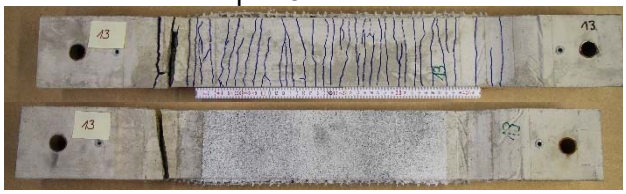


Rissbilder Prüfkörper 1



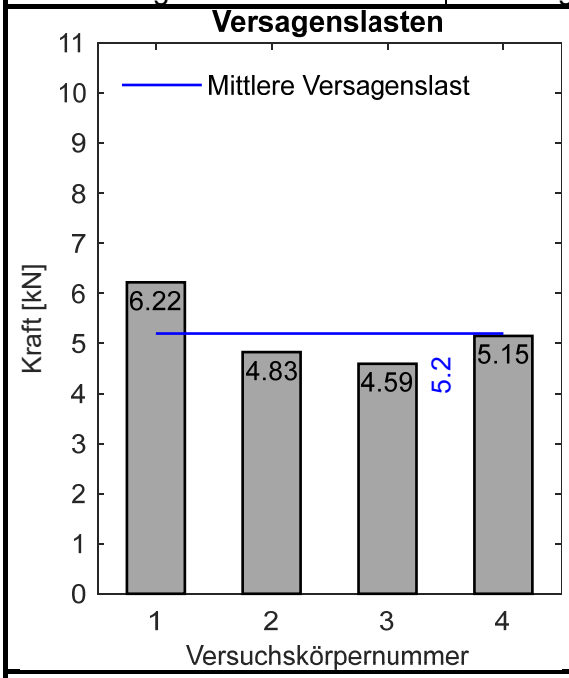
Rissbilder Prüfkörper 2

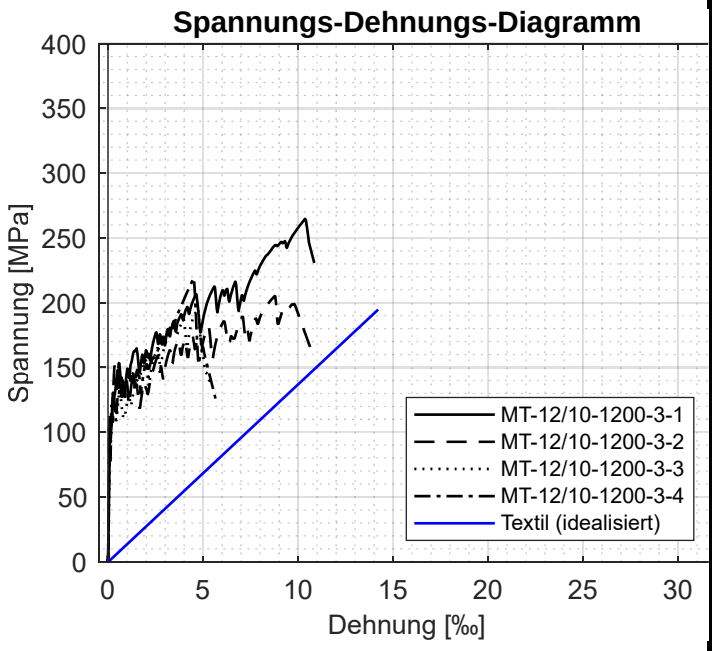
Rissbilder Prüfkörper 3



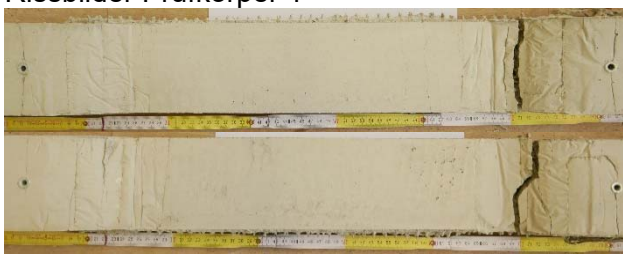
Rissbilder Prüfkörper 4

Bezeichnung	**MT-12/10-1200-3-x**
Verwendetes Textil	
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)	12/10
Feinheit Schussfäden (*tex*)	1200
Tränkung	SICOMIN GreenPoxy 56
Anzahl der Bewehrungslagen	3
Bewehrungsquerschnitt (mm^2)	23,51
Bewehrungsgehalt	1,57 %
Verwendeter Beton	Mischung C5 (gem. Tabelle 2)
Anzahl geprüfter Körper	4
Anmerkungen	Vorzeitiges Versagen im Kopfbereich (Nr. 1 bis 4)

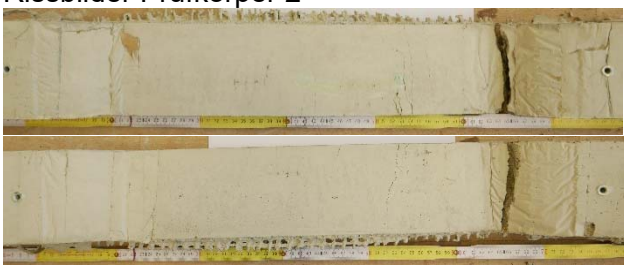




Rissbilder Prüfkörper 1

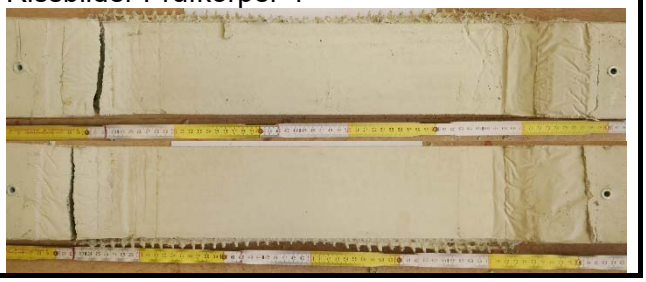


Rissbilder Prüfkörper 2

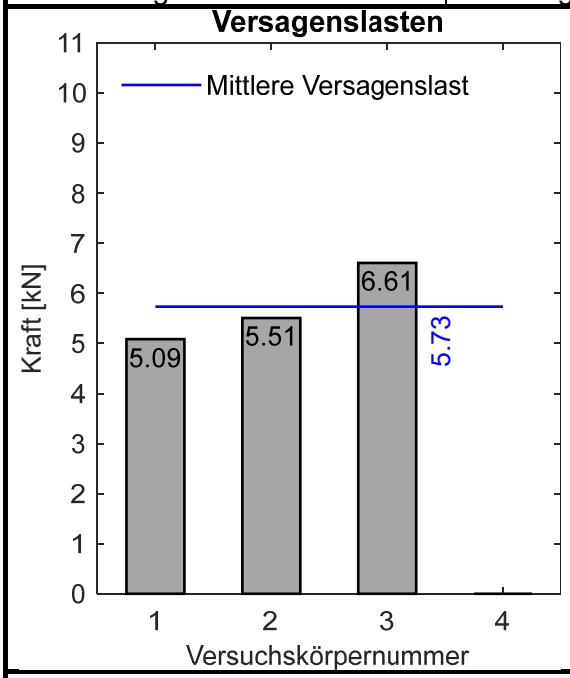


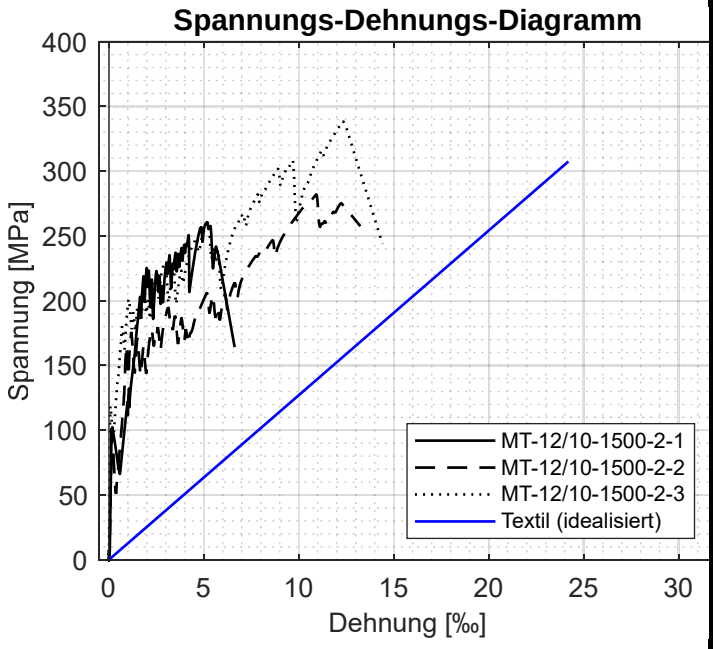
Rissbilder Prüfkörper 3

Rissbilder Prüfkörper 4



Bezeichnung	**MT-12/10-1500-2-x**
Verwendetes Textil	
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)	12/10
Feinheit Schussfäden (*tex*)	1500
Tränkung	SICOMIN GreenPoxy 56
Anzahl der Bewehrungslagen	2
Bewehrungsquerschnitt (mm^2)	19,52
Bewehrungsgehalt	1,30 %
Verwendeter Beton	Mischung C5 (gem. Tabelle 2)
Anzahl geprüfter Körper	3
Anmerkungen	Vorzeitiges Versagen im Kopfbereich (Nr. 1 und 3)





Rissbilder Prüfkörper 1

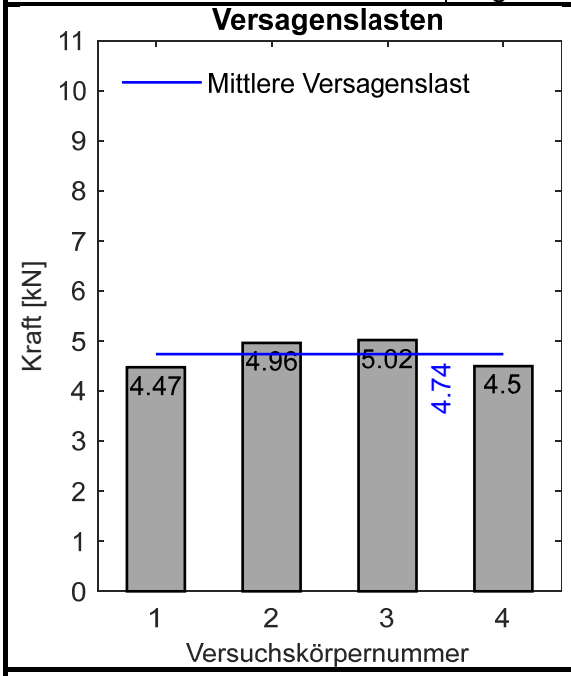
Rissbilder Prüfkörper 2

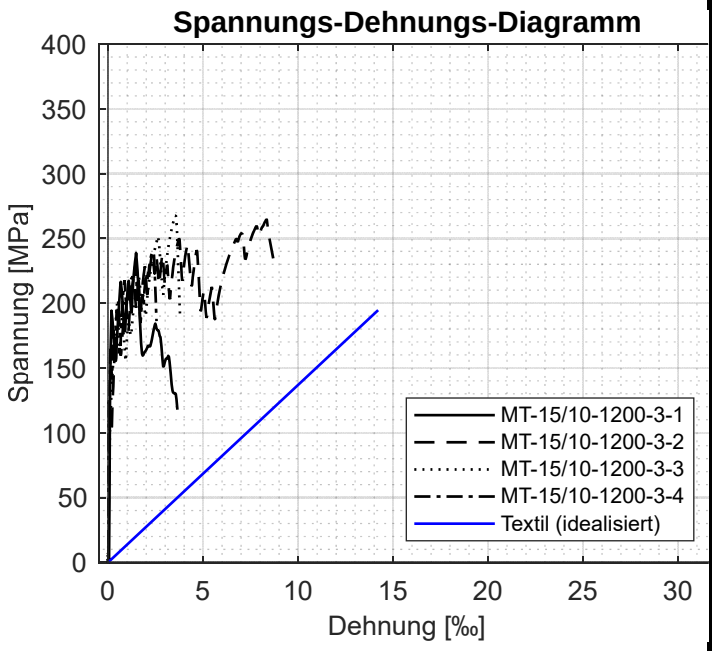
Rissbilder Prüfkörper 3

Rissbilder Prüfkörper 4

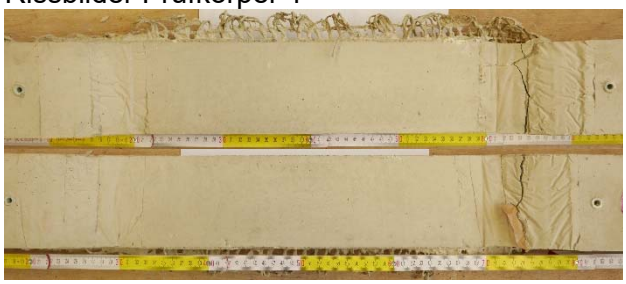
/

Bezeichnung	**MT-15/10-1200-3-x**
Verwendetes Textil	
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)	15/10
Feinheit Schussfäden (*tex*)	1200
Tränkung	SICOMIN GreenPoxy 56
Anzahl der Bewehrungslagen	3
Bewehrungsquerschnitt (mm^2)	18,75
Bewehrungsgehalt	1,25 %
Verwendeter Beton	Mischung C5 (gem. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**)
Anzahl geprüfter Körper	4
Anmerkungen	Fehlstelle im Bereich der Aufweitung (Nr. 1); Vorzeitiges Versagen im Kopfbereich (Nr. 1 und 4)





Rissbilder Prüfkörper 1

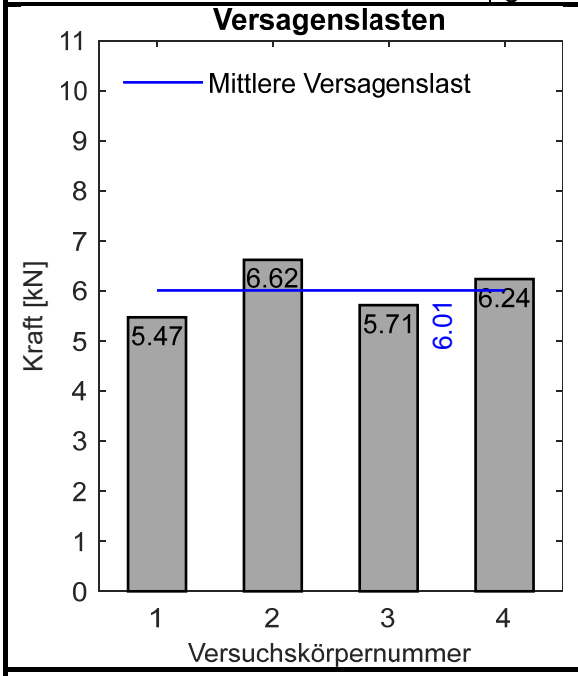


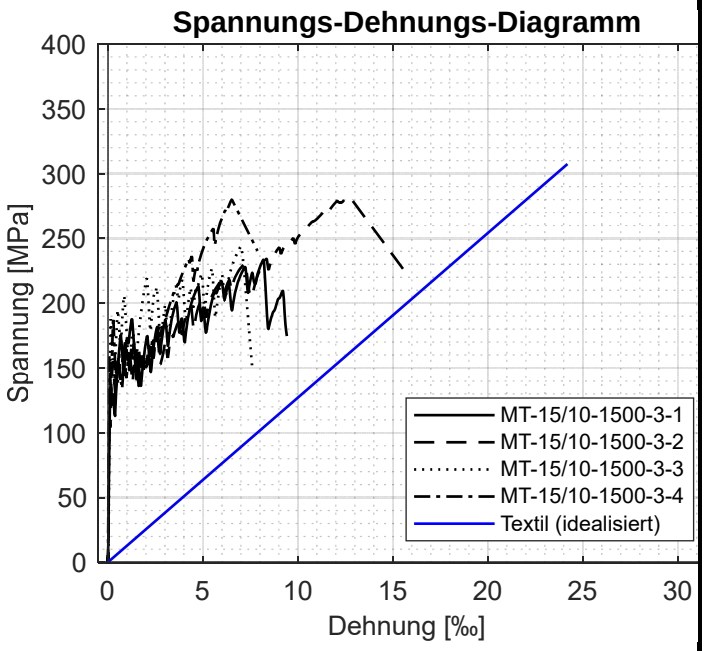
Rissbilder Prüfkörper 2

Rissbilder Prüfkörper 3

Rissbilder Prüfkörper 4

Bezeichnung	**MT-15/10-1500-3-x**
Verwendetes Textil	
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)	15/10
Feinheit Schussfäden (*tex*)	1500
Tränkung	SICOMIN GreenPoxy 56
Anzahl der Bewehrungslagen	3
Bewehrungsquerschnitt (mm^2)	23,44
Bewehrungsgehalt	1,56 %
Verwendeter Beton	Mischung C5 (gem. Tabelle 2)
Anzahl geprüfter Körper	4
Anmerkungen	Geringerer Textilquerschnitt Nr. 4 ($A_t \approx 22$ mm²); Vorzeitiges Versagen im Kopfbereich (Nr. 1 und 2)

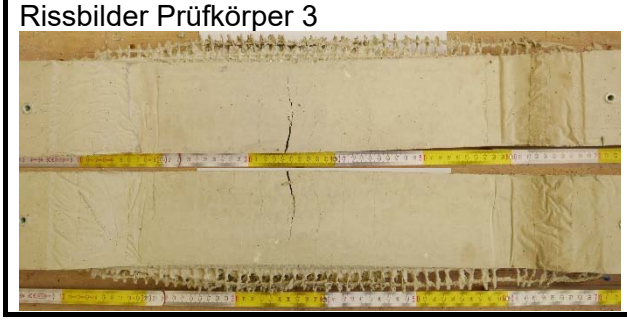




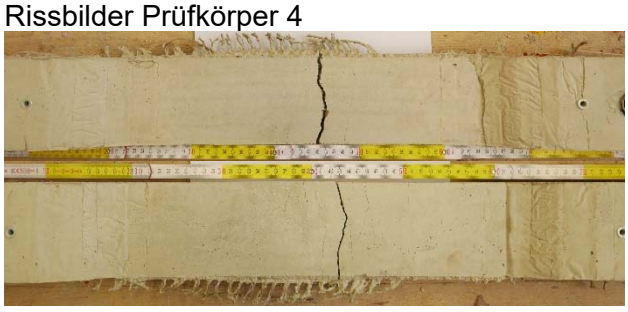
Rissbilder Prüfkörper 1

Rissbilder Prüfkörper 2

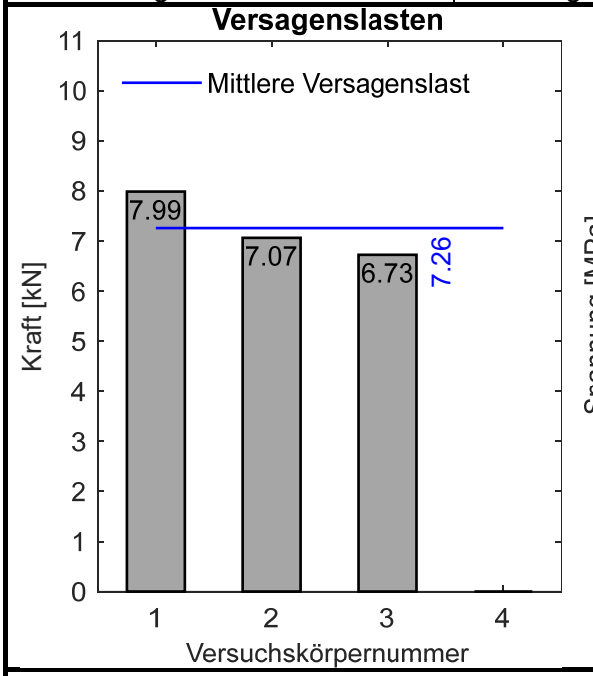
Rissbilder Prüfkörper 3

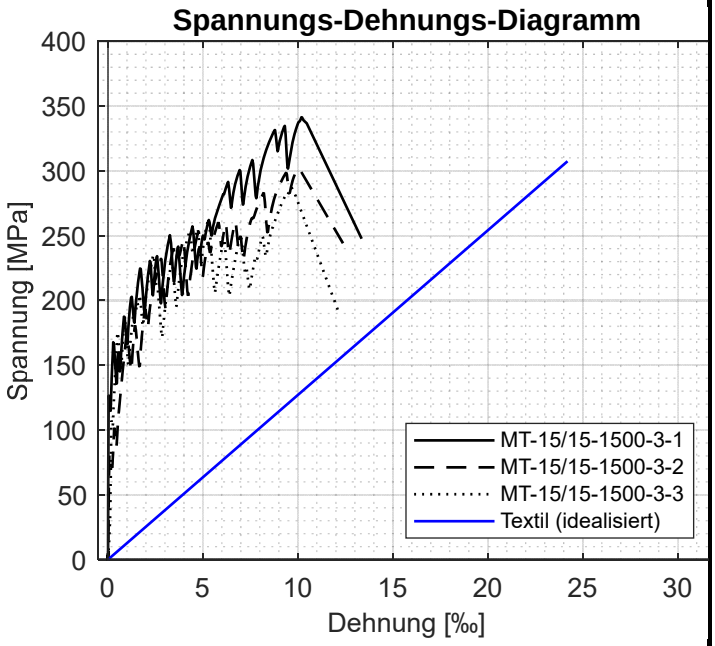


Rissbilder Prüfkörper 4



Bezeichnung	**MT-15/15-1500-3-x**
Verwendetes Textil	
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)	15/15
Feinheit Schussfäden (*tex*)	1500
Tränkung	SICOMIN GreenPoxy 56
Anzahl der Bewehrungslagen	3
Bewehrungsquerschnitt (mm^2)	23,40
Bewehrungsgehalt	1,56 %
Verwendeter Beton	Mischung C5 (gem. Tabelle 2)
Anzahl geprüfter Körper	3
Anmerkungen	Vorzeitiges Versagen im Kopfbereich (Nr. 2)

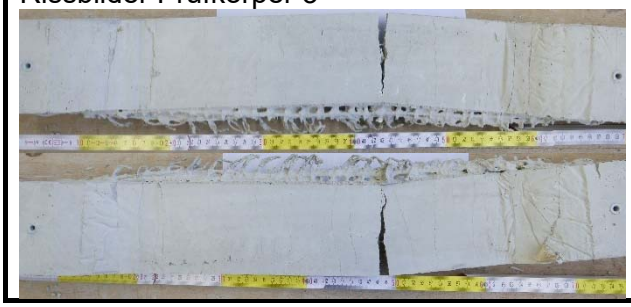




Rissbilder Prüfkörper 1

Rissbilder Prüfkörper 2

Rissbilder Prüfkörper 3



Rissbilder Prüfkörper 4

/

Anhang E Biegeversuche

E.1 Herstellung der Versuchskörper

Abbildung E-1: Plattenstreifen nach der Betonage.

E.2 Unbewehrte Referenzplattenstreifen ($A_t = 0\,mm^2$)

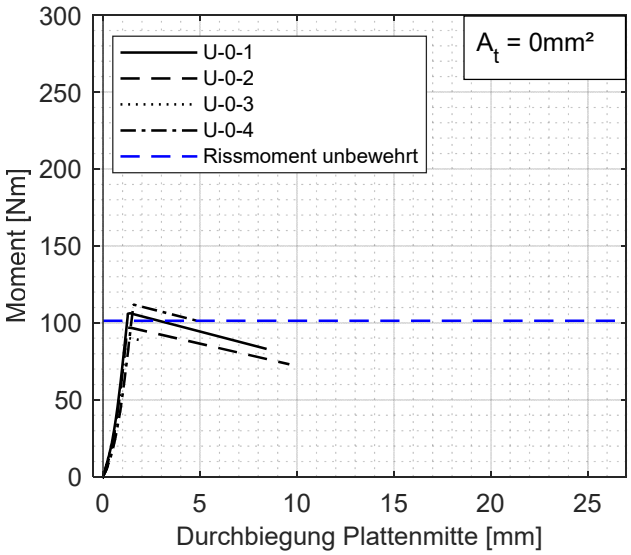


Abbildung E-2: Moment-Verformungs-Diagramm des unbewehrten Referenzplattenstreifens.

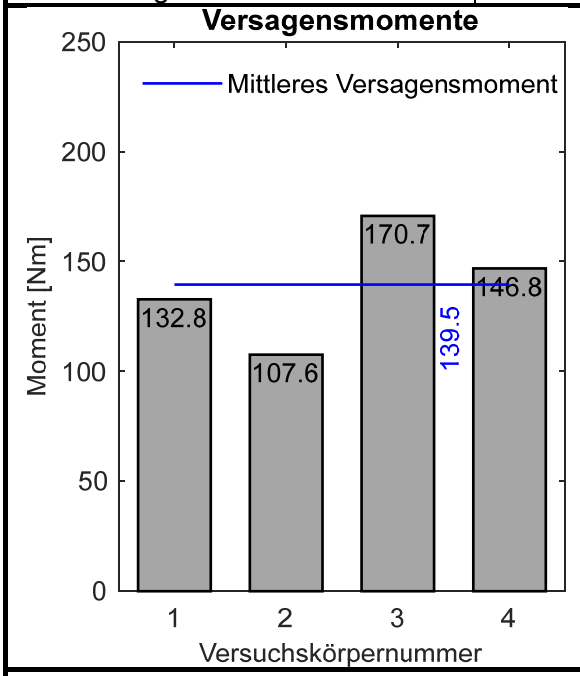
E.3 Ergebnisübersicht

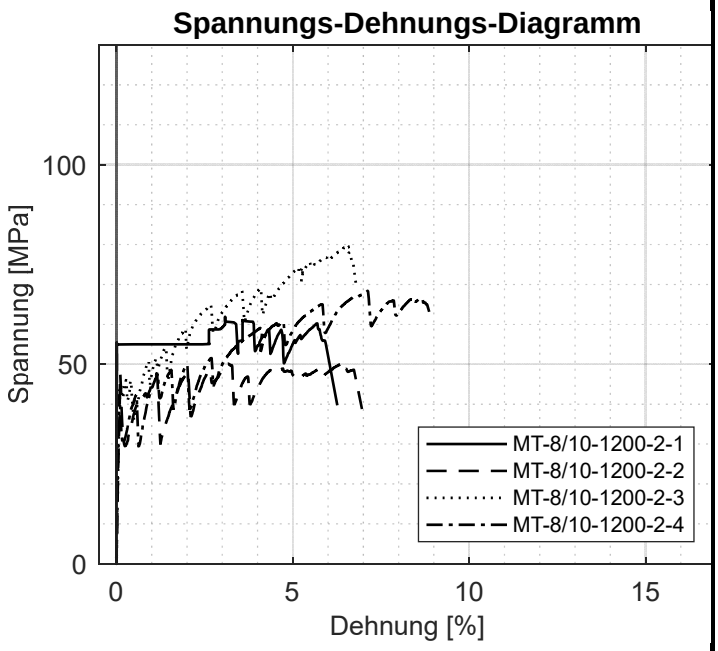
Tabelle E-1: Zusammenstellung aller Ergebnisse der Biegeversuche.

Bezeichnung	Bruch-spannung (MPa)	Bruch-Randzug-dehnung (‰)	Mittlerer Rissab-stand (mm)	Mittlere Bruch-spannung (MPa)	Mittlere Bruchdeh-nung (‰)	Mittlerer Rissab-stand (mm)
MT-8/10-1200-2-1	339,4	5,8	16,7	345,1	6,9	16,4
MT-8/10-1200-2-2	282,4	6,5	18,6			
MT-8/10-1200-2-3	384,3	6,7	15,2			
MT-8/10-1200-2-4	374,4	8,5	15,2			
MT-12/10-1200-2-1	443,6	5,1	27,8	416,6	5,1	34,1
MT-12/10-1200-2-2	407,4	8,4	33,4			
MT-12/10-1200-2-3	420,4	2,7	41,8			
MT-12/10-1200-2-4	395,0	4,0	33,4			
MT-15/10-1200-2-1	593,9	5,3	33,4	571,4	5,7	37,6
MT-15/10-1200-2-2	548,8	6,1	41,8			
MT-8/10-1000-2-1	357,1	6,6	13,9	335,2	6,4	16,0
MT-8/10-1000-2-2	315,4	5,8	15,2			
MT-8/10-1000-2-3	385,2	4,8	20,9			
MT-8/10-1000-2-4	363,1	8,2	13,9			
MT-12/10-1500-2-1	343,5	6,2	33,4	411,1	6,2	28,2
MT-12/10-1500-2-2	384,4	5,6	27,8			
MT-12/10-1500-2-3	531,9	7,2	23,9			
MT-12/10-1500-2-4	384,4	5,6	27,8			
MT-12/10-1200-3-1	447,5	8,5	12,8	428,9	9,0	15,1
MT-12/10-1200-3-2	466,9	9,1	13,9			
MT-12/10-1200-3-3	372,4	9,5	18,6			
MT-15/15-1200-2-1	465,9	2,1	167	442,3	2,2	139,2
MT-15/15-1200-2-2	521,8	1,0	167			
MT-15/15-1200-2-3	363,2	1,6	167			
MT-15/15-1200-2-4	418,3	4,0	55,7			

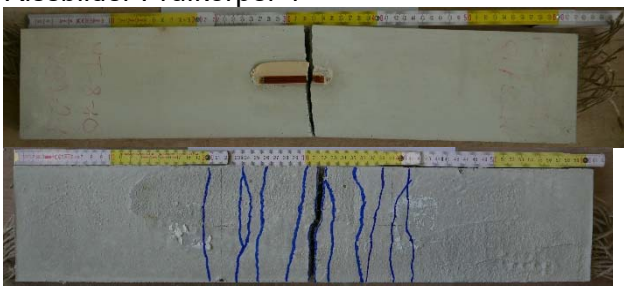
E.4 Ergebnisse Bewehrte Plattenstreifen

Bezeichnung	**MT-8/10-1200-2-x**
Verwendetes Textil	
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)	8/10
Feinheit Schussfäden (*tex*)	1200
Tränkung	SICOMIN GreenPoxy 56
Anzahl der Bewehrungslagen	2
Bewehrungsquerschnitt (*mm²*)	25,71
Bewehrungsgehalt	7,14 ‰
Verwendeter Beton	Mischung C6 (gem. Tabelle 3)
Anzahl geprüfter Körper	4
Anmerkungen	Messfehler bei horizontalem Wegaufnehmer (Prüfkörpernr. 1)

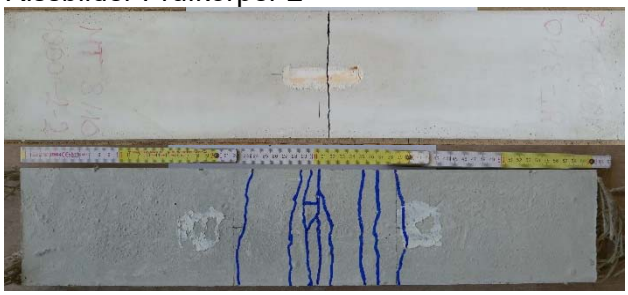




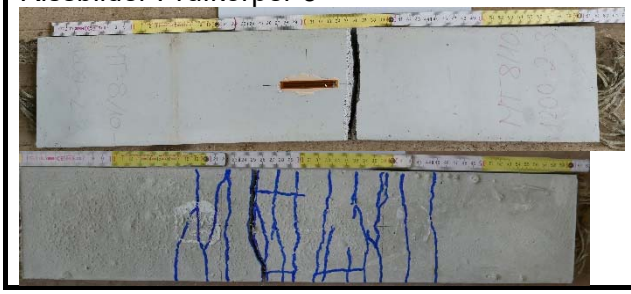
Rissbilder Prüfkörper 1



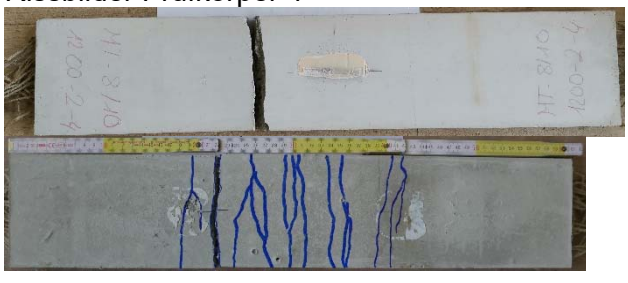
Rissbilder Prüfkörper 2



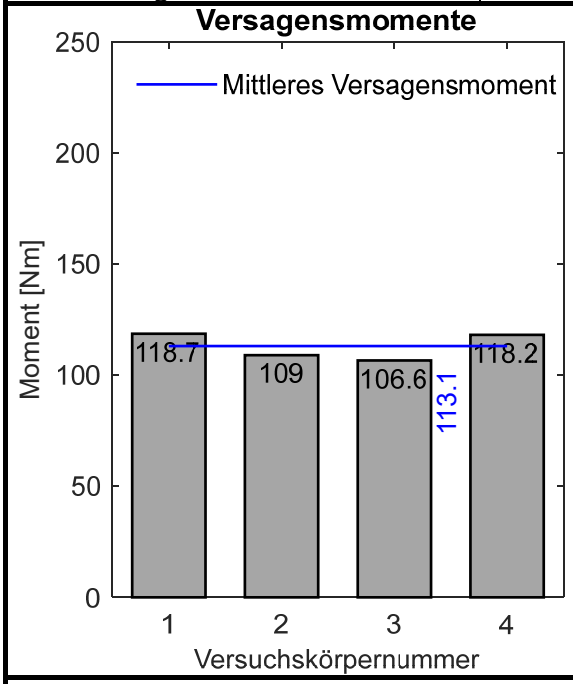
Rissbilder Prüfkörper 3

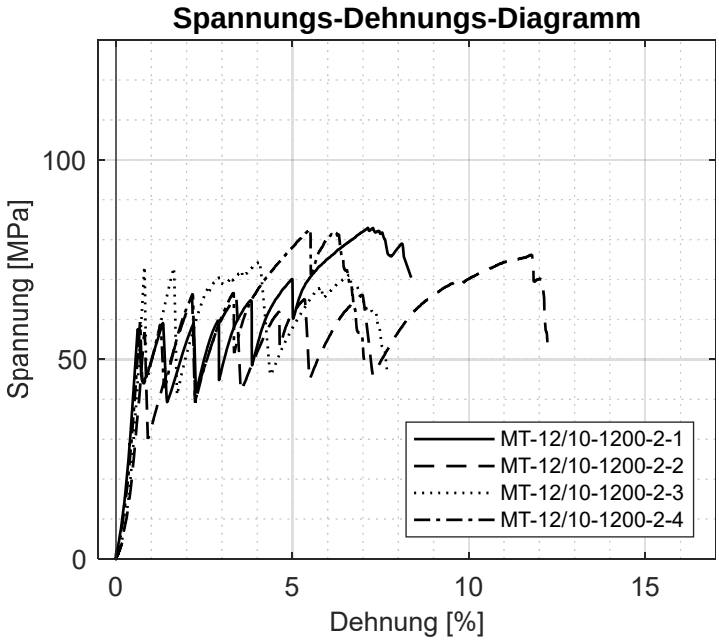


Rissbilder Prüfkörper 4



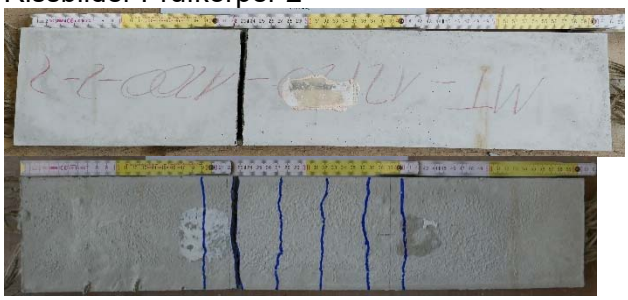
Bezeichnung	**MT-12/10-1200-2-x**
Verwendetes Textil	
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)	12/10
Feinheit Schussfäden (*tex*)	1200
Tränkung	SICOMIN GreenPoxy 56
Anzahl der Bewehrungslagen	2
Bewehrungsquerschnitt (mm^2)	17,14
Bewehrungsgehalt	4,76 ‰
Verwendeter Beton	Mischung C6 (gem. Tabelle 3)
Anzahl geprüfter Körper	4
Anmerkungen	



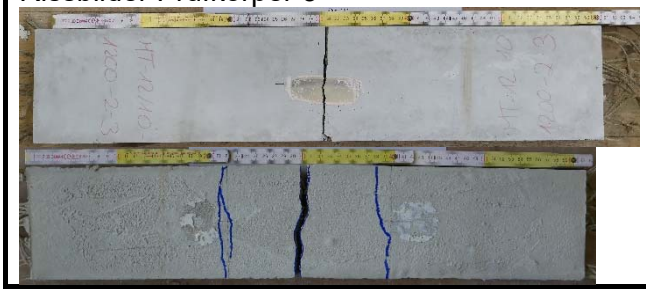


Rissbilder Prüfkörper 1

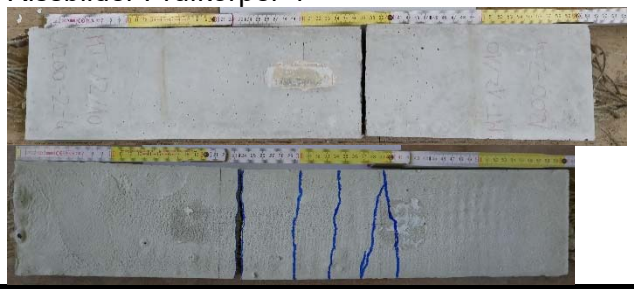
Rissbilder Prüfkörper 2



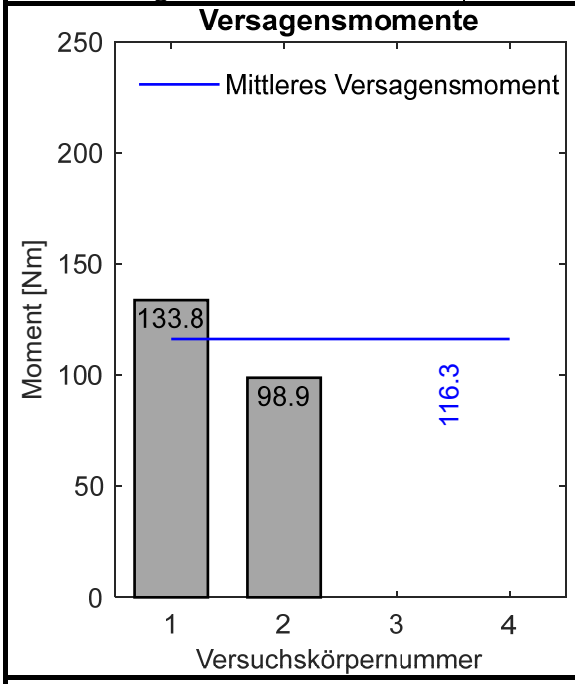
Rissbilder Prüfkörper 3

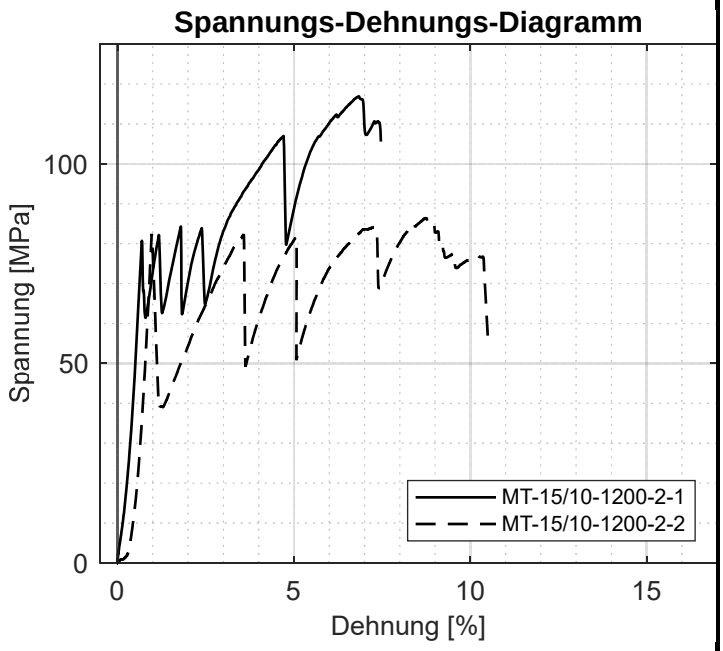


Rissbilder Prüfkörper 4

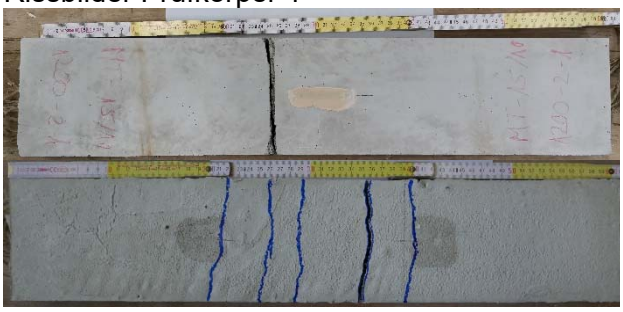


Bezeichnung	**MT-15/10-1200-2-x**
Verwendetes Textil	
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)	15/10
Feinheit Schussfäden (*tex*)	1200
Tränkung	SICOMIN GreenPoxy 56
Anzahl der Bewehrungslagen	2
Bewehrungsquerschnitt (*mm²*)	13,71
Bewehrungsgehalt	3,81 ‰
Verwendeter Beton	Mischung C6 (gem. Tabelle 3)
Anzahl geprüfter Körper	2
Anmerkungen	





Rissbilder Prüfkörper 1



Rissbilder Prüfkörper 2

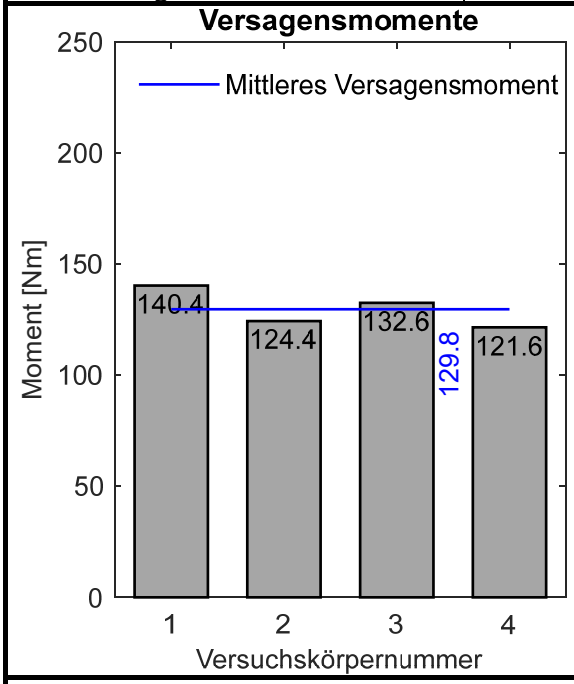
Rissbilder Prüfkörper 3

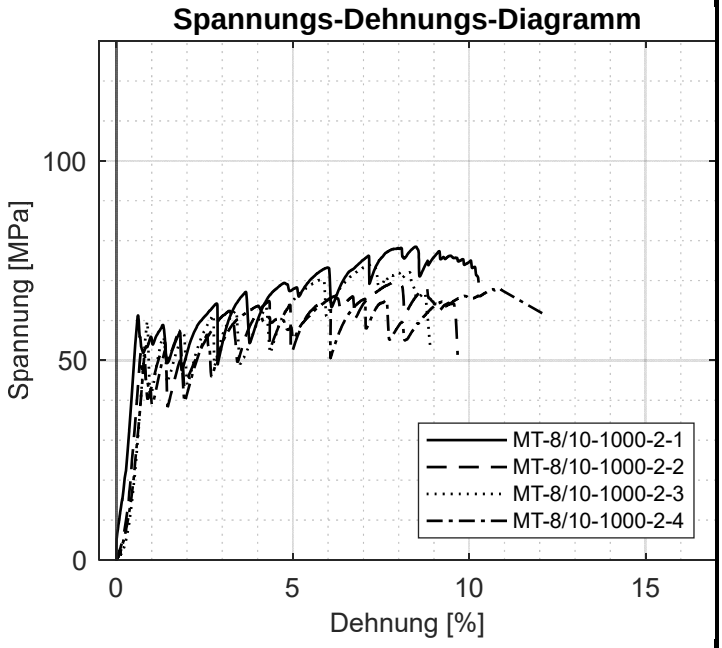
/

Rissbilder Prüfkörper 4

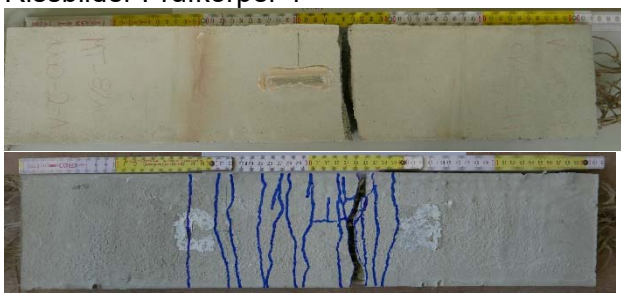
/

Bezeichnung	**MT-8/10-1000-2-x**
Verwendetes Textil	
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)	8/10
Feinheit Schussfäden (*tex*)	1000
Tränkung	SICOMIN GreenPoxy 56
Anzahl der Bewehrungslagen	2
Bewehrungsquerschnitt (mm^2)	21,43
Bewehrungsgehalt	5,95 ‰
Verwendeter Beton	Mischung C6 (gem. Tabelle 3)
Anzahl geprüfter Körper	4
Anmerkungen	

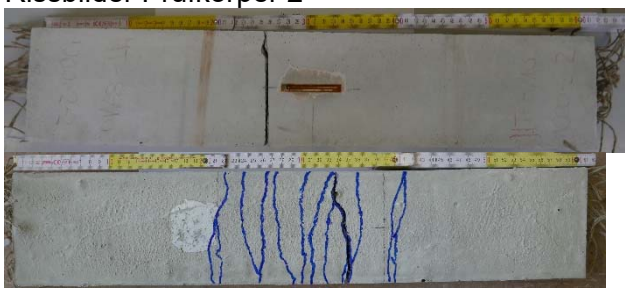




Rissbilder Prüfkörper 1

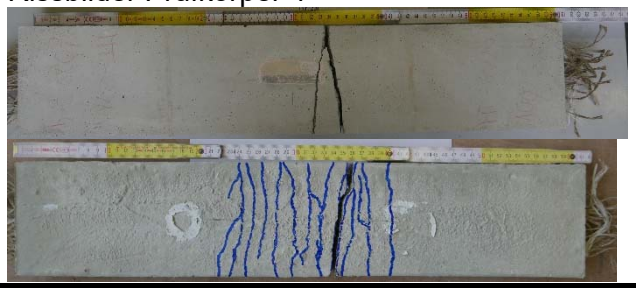


Rissbilder Prüfkörper 2

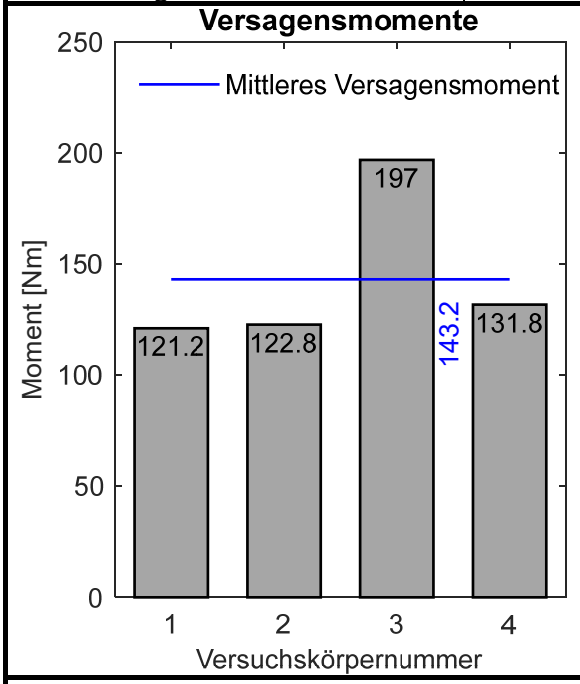


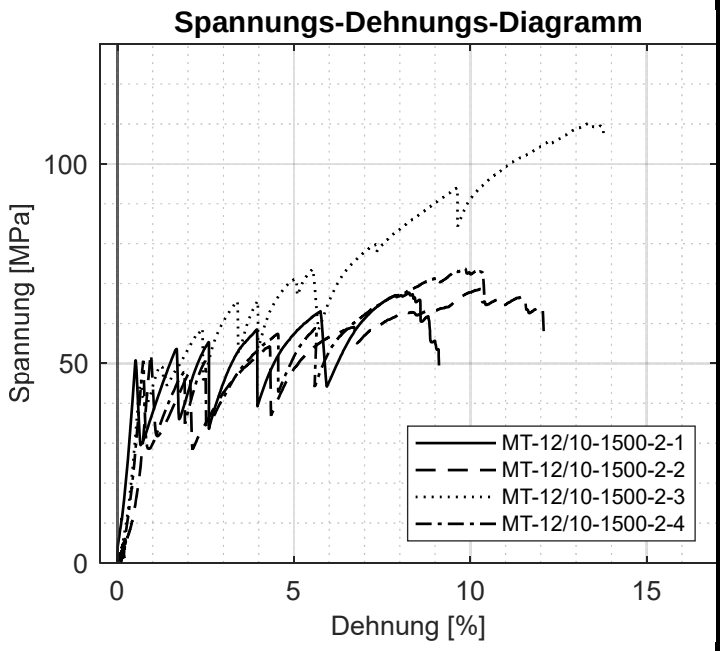
Rissbilder Prüfkörper 3

Rissbilder Prüfkörper 4

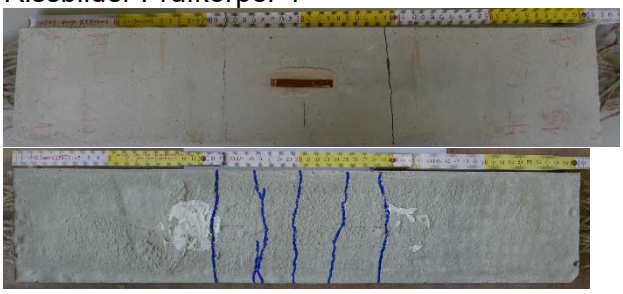


Bezeichnung	**MT-12/10-1500-2-x**
Verwendetes Textil	
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)	12/10
Feinheit Schussfäden (*tex*)	1500
Tränkung	SICOMIN GreenPoxy 56
Anzahl der Bewehrungslagen	2
Bewehrungsquerschnitt (*mm²*)	21,43
Bewehrungsgehalt	5,95 ‰
Verwendeter Beton	Mischung C6 (gem. Tabelle 3)
Anzahl geprüfter Körper	4
Anmerkungen	

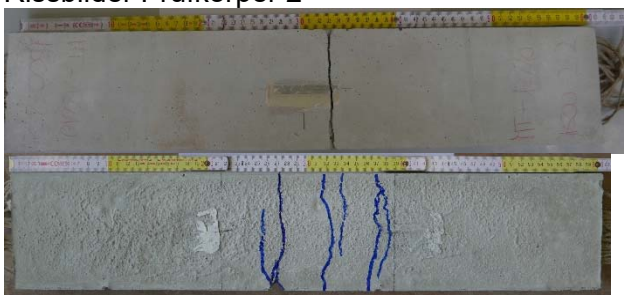




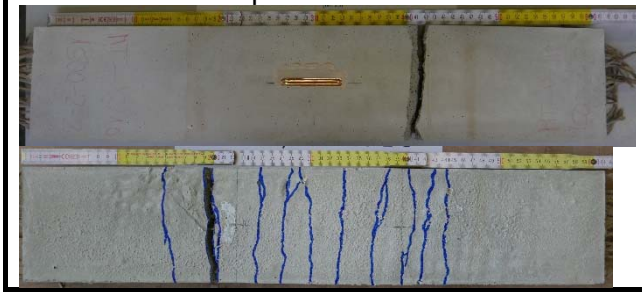
Rissbilder Prüfkörper 1



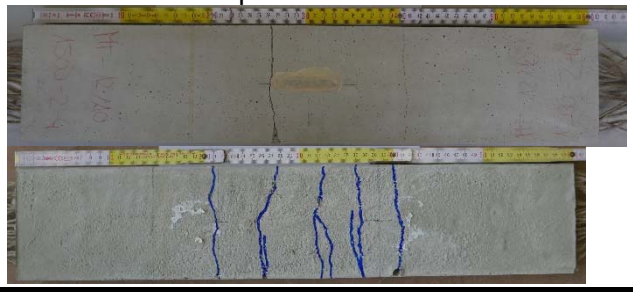
Rissbilder Prüfkörper 2



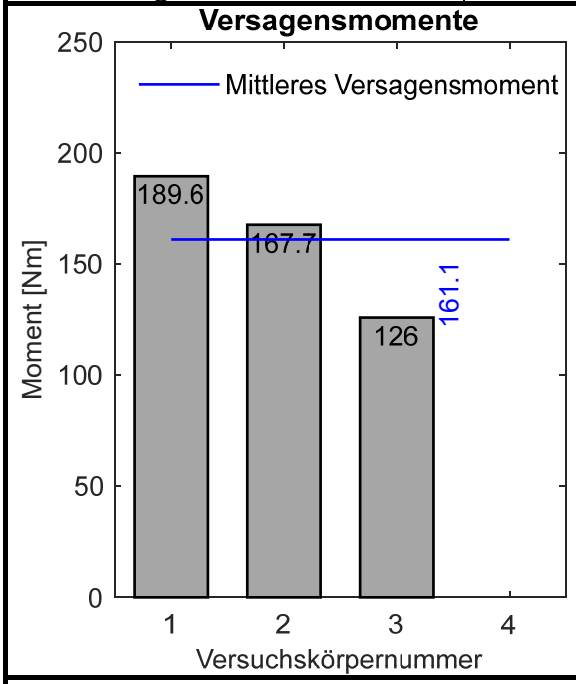
Rissbilder Prüfkörper 3

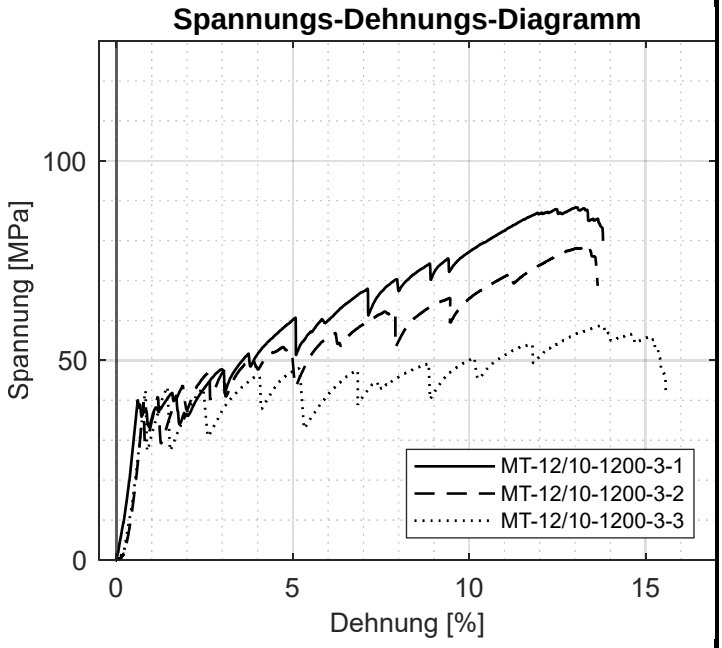


Rissbilder Prüfkörper 4

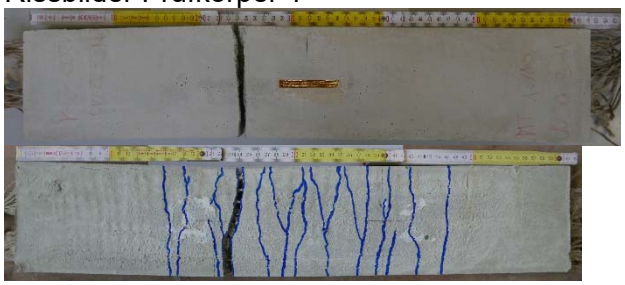


Bezeichnung	**MT-12/10-1200-3-x**
Verwendetes Textil	
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)	12/10
Feinheit Schussfäden (*tex*)	1200
Tränkung	SICOMIN GreenPoxy 56
Anzahl der Bewehrungslagen	3
Bewehrungsquerschnitt (mm^2)	25,71
Bewehrungsgehalt	7,14 ‰
Verwendeter Beton	Mischung C6 (gem. Tabelle 3)
Anzahl geprüfter Körper	3
Anmerkungen	

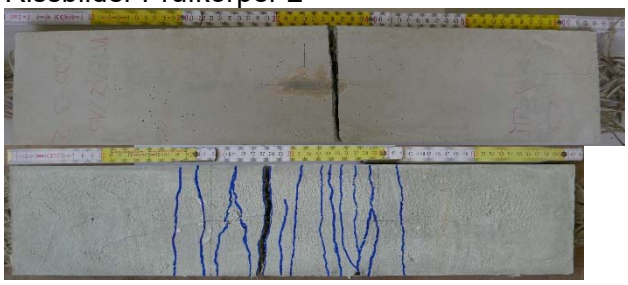




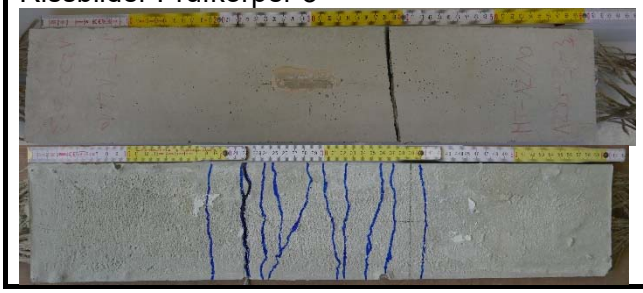
Rissbilder Prüfkörper 1



Rissbilder Prüfkörper 2



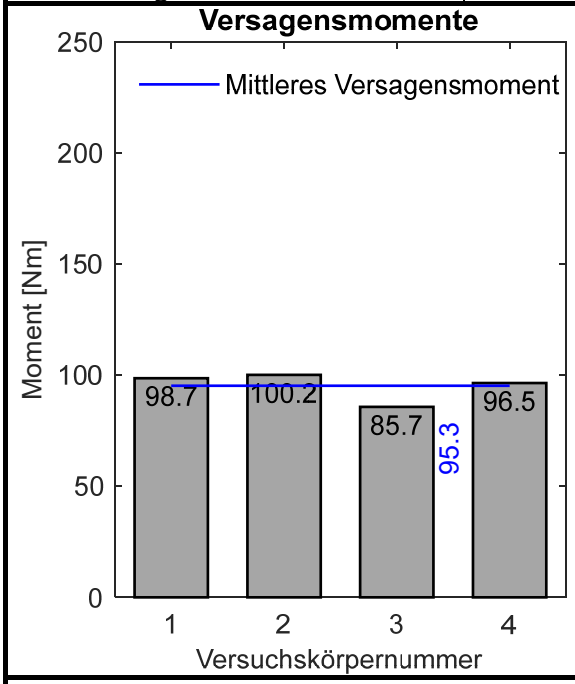
Rissbilder Prüfkörper 3

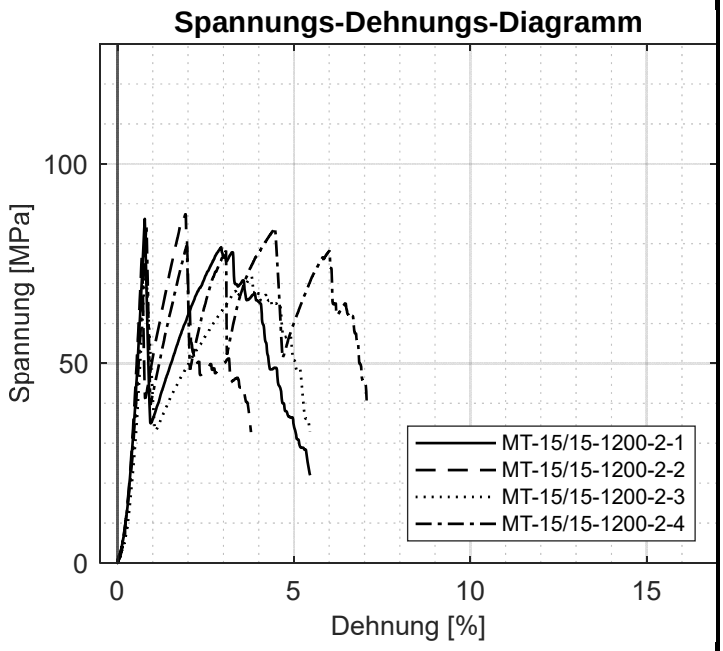


Rissbilder Prüfkörper 4

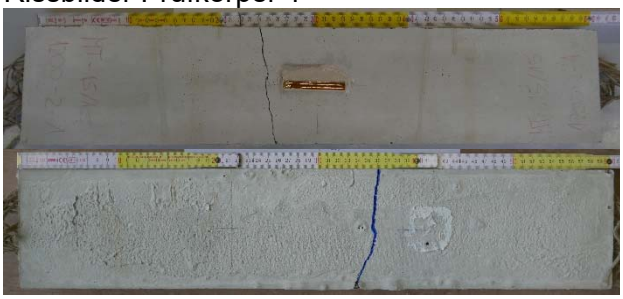
/

Bezeichnung	**MT-15/15-1200-2-x**
Verwendetes Textil	
Abstand Schussfäden / Kettfäden (*mm*)	15/15
Feinheit Schussfäden (*tex*)	1200
Tränkung	SICOMIN GreenPoxy 56
Anzahl der Bewehrungslagen	2
Bewehrungsquerschnitt (mm^2)	13,71
Bewehrungsgehalt	3,81 ‰
Verwendeter Beton	Mischung C6 (gem. Tabelle 3)
Anzahl geprüfter Körper	4
Anmerkungen	

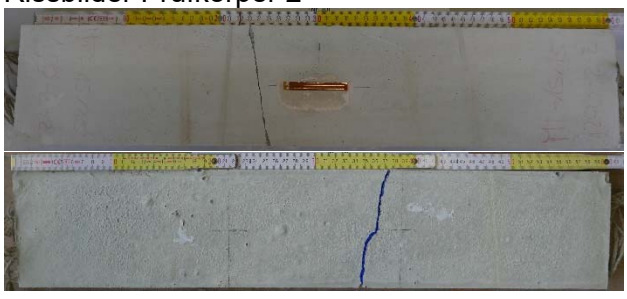




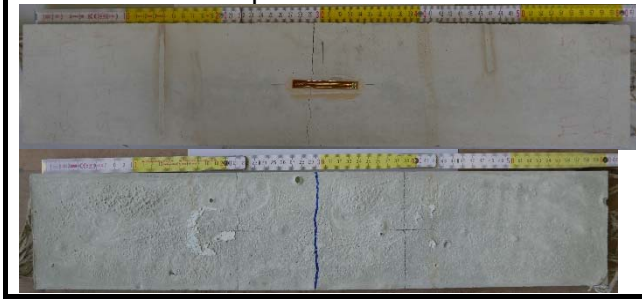
Rissbilder Prüfkörper 1



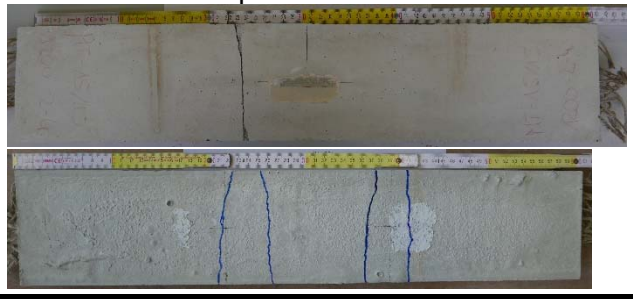
Rissbilder Prüfkörper 2



Rissbilder Prüfkörper 3

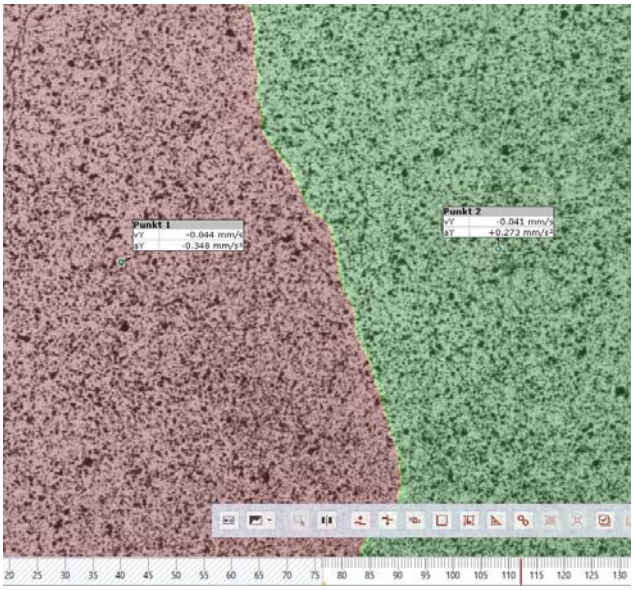


Rissbilder Prüfkörper 4

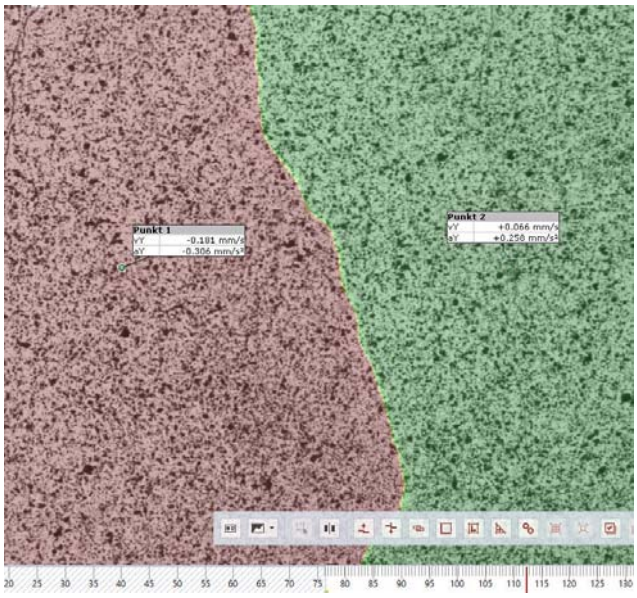


Anhang F Optisches Messsystem zur Rissdetektion

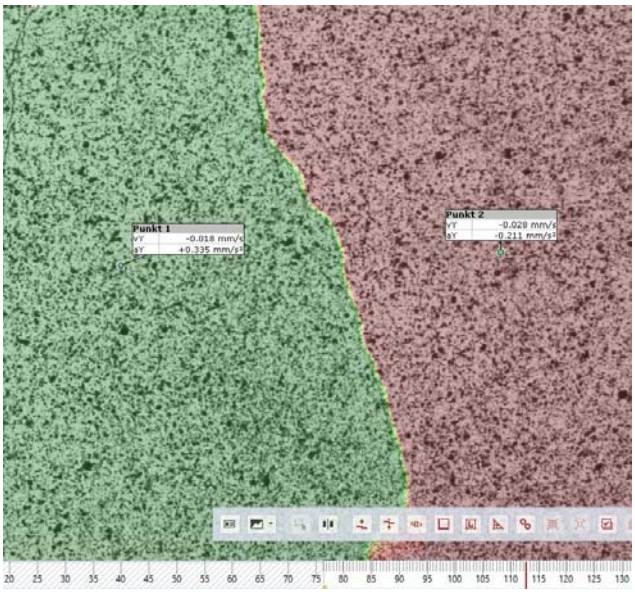
(a)



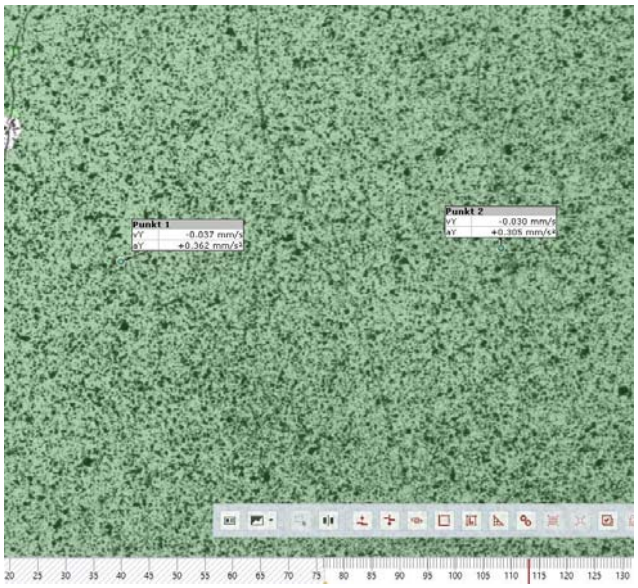
(b)



(c)



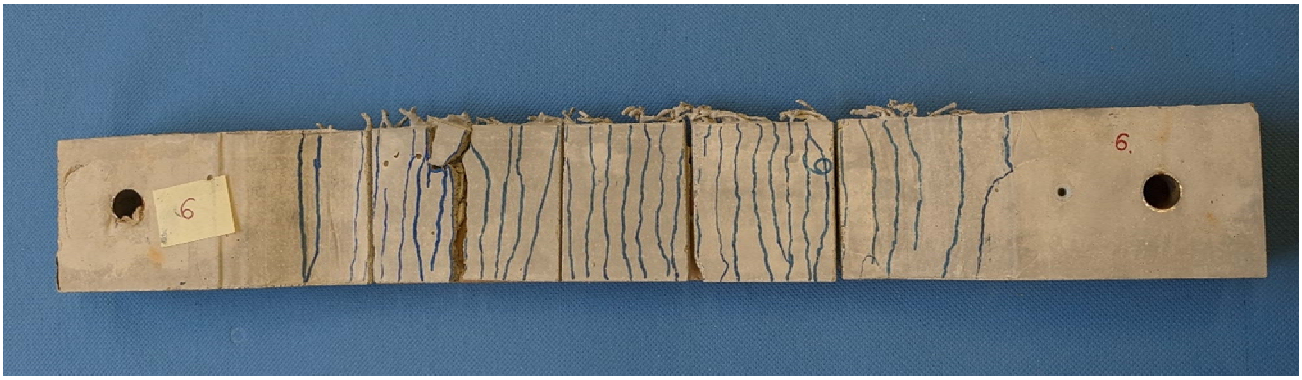
(d)



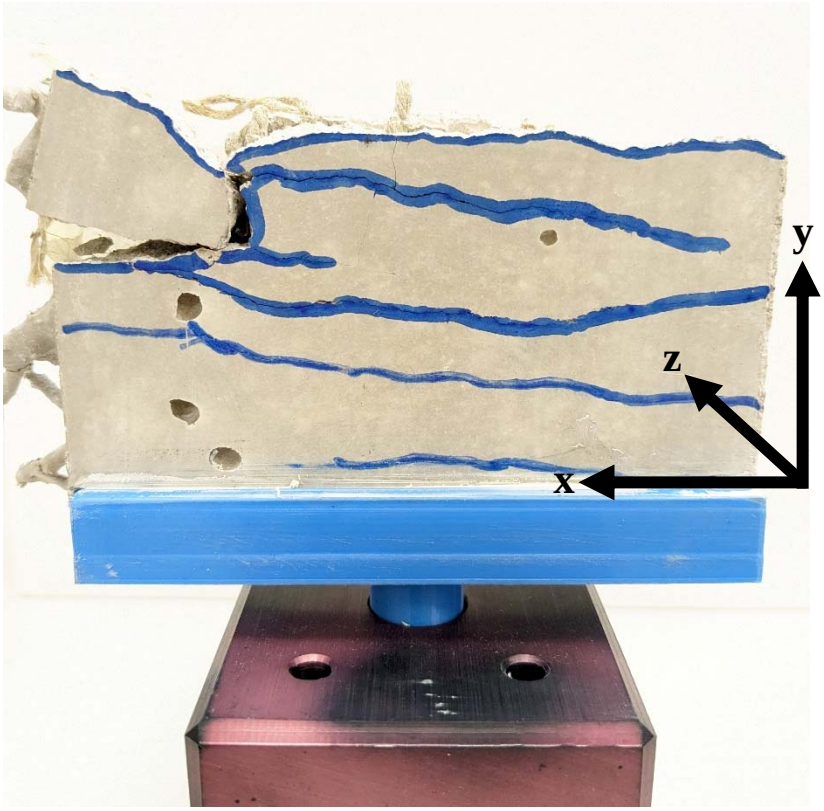
(e)

Abbildung F-1: Rissdetektion über die gemessenen Beschleunigungen. Ungerissener Querschnitt mit ähnlicher Beschleunigung und Geschwindigkeit in den Messpunkten (a); Umkehrung der Beschleunigungsrichtung in den Messpunkten (b); Beschleunigung und Geschwindigkeit in unterschiedliche Richtungen mit erkennbarem Riss (c); Annäherung der Geschwindigkeiten in den Messpunkten (d); abgeschlossene Rissbildung, Beschleunigung und Geschwindigkeit wieder in ähnlicher Größenordnung und gleicher Richtung (e).

Anhang G CT-Scans

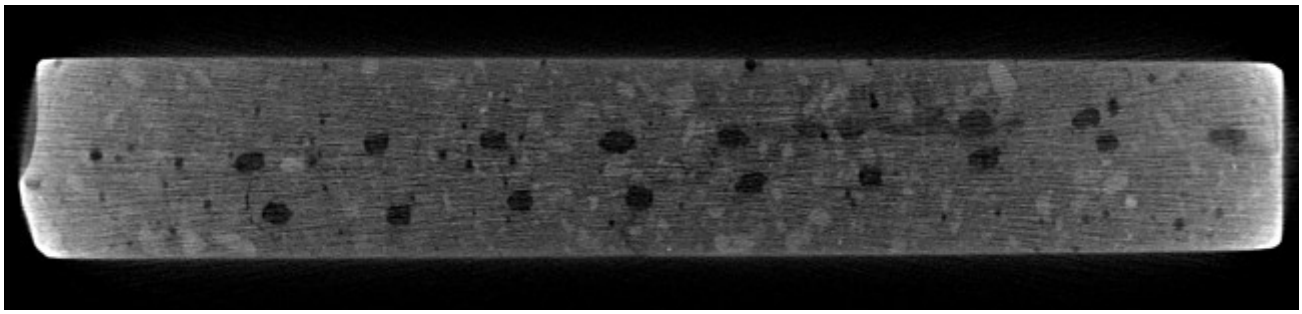


(a)

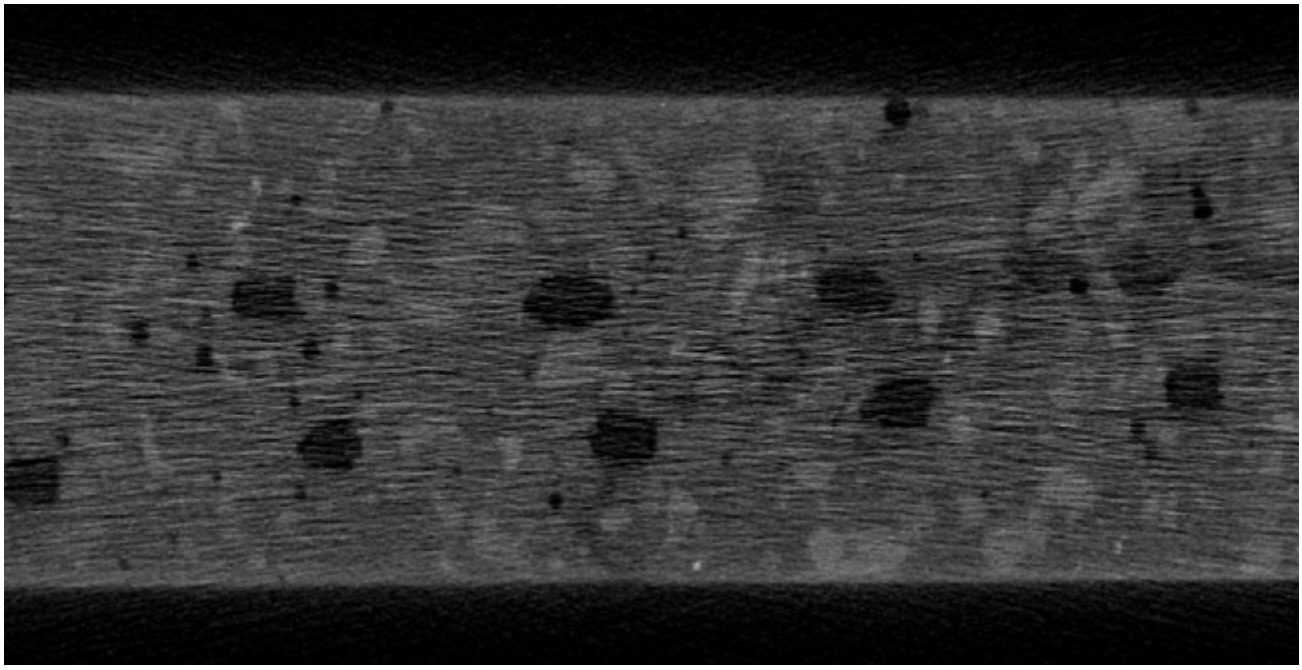


(b)

Abbildung G-1: Gesamtansicht des untersuchten Prüfkörpers (a) und daraus herausgetrennte Probe für CT-Untersuchung mit definierten Achsen (b).

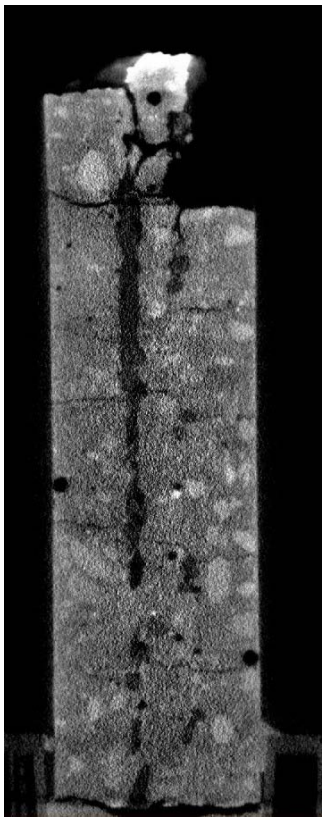


(a)

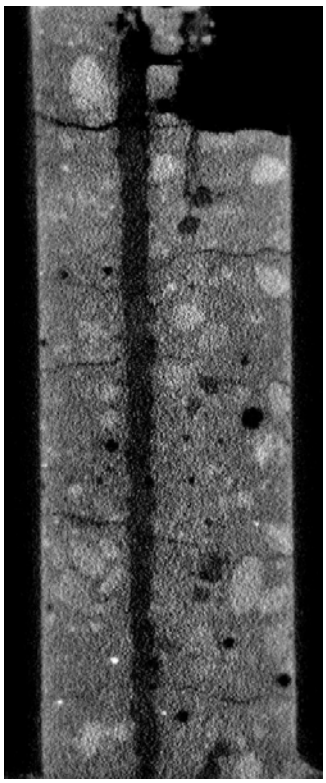


(b)

Abbildung G-2: Gesamtansicht Scan senkrecht zur bewehrten Richtung (x-z-Ebene) (a) und Detailaufnahme (b).

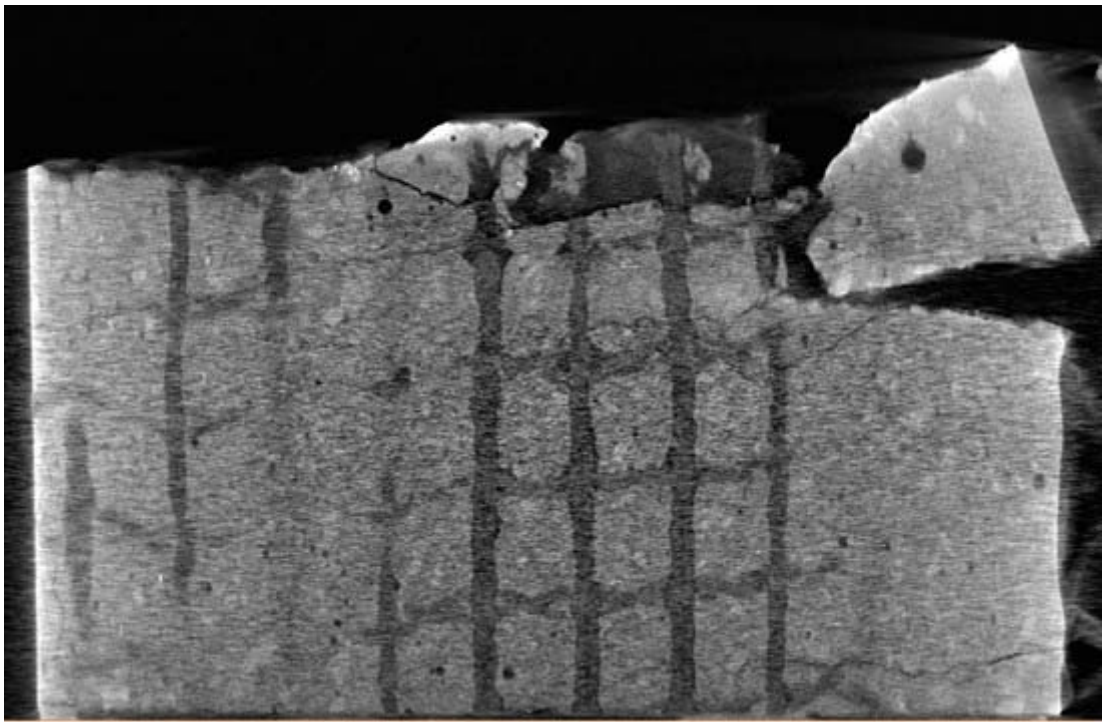


(a)

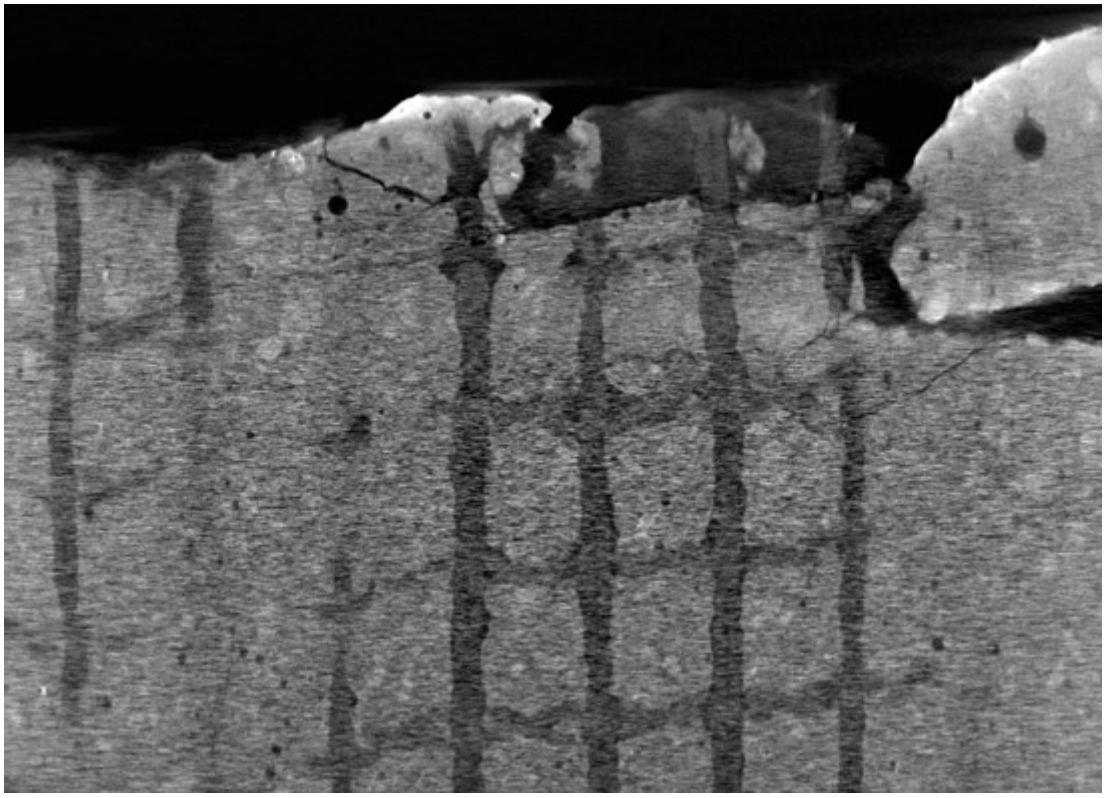


(b)

Abbildung G-3: Gesamtansicht Scan parallel zur bewehrten Richtung (y-z-Ebene) (a) und Detailaufnahme (b).



(a)



(b)

Abbildung G-4: Gesamtansicht Scan parallel zur bewehrten Richtung (x-y-Ebene) (a) und Detailaufnahme (b).

Anhang H Kalibrierung erster Modelle

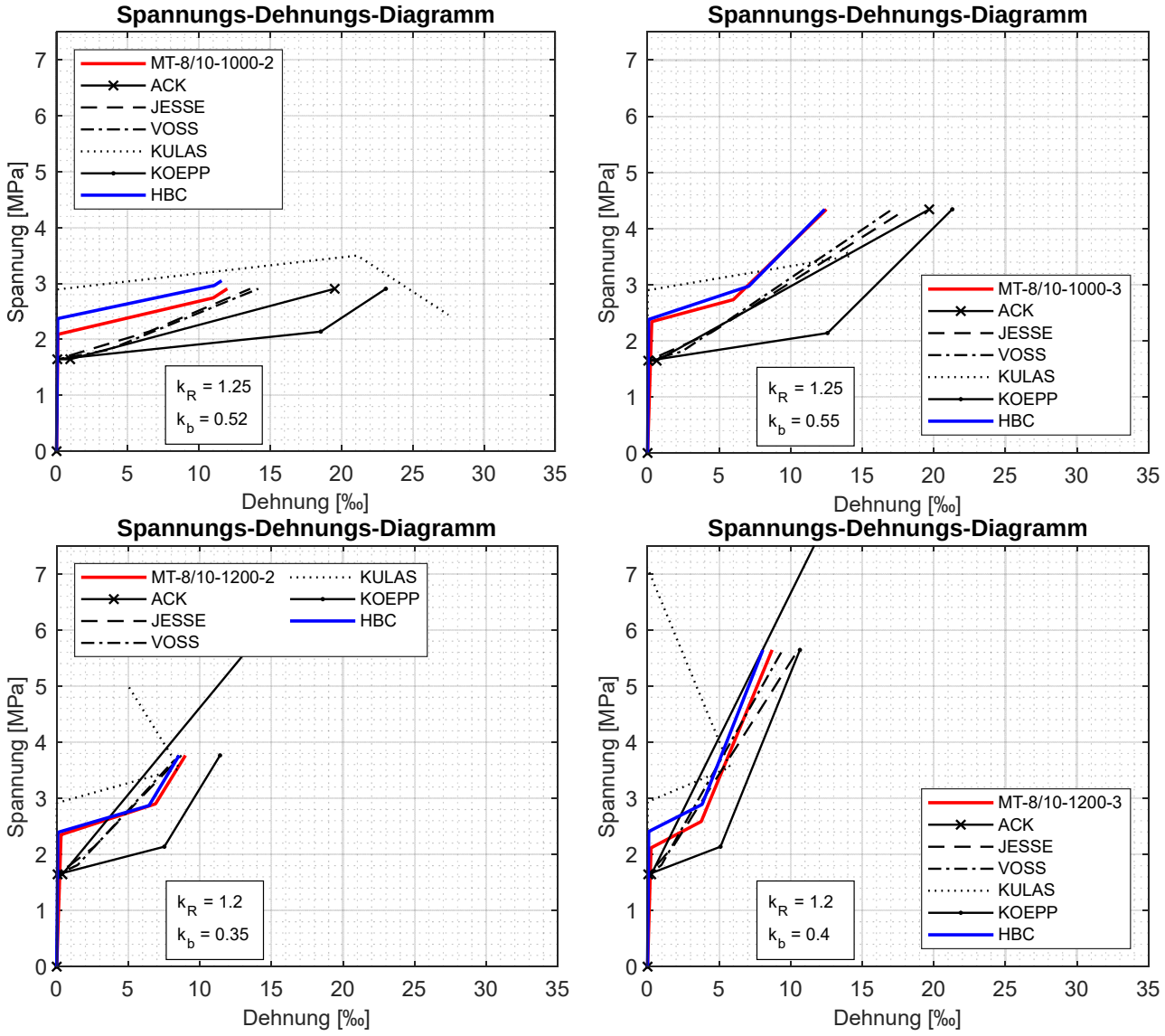


Abbildung H-1: Spannungs-Dehnungs-Diagramme der verschiedenen Ansätze bei Variation der Faktoren k_R und k_b (Teil 1).

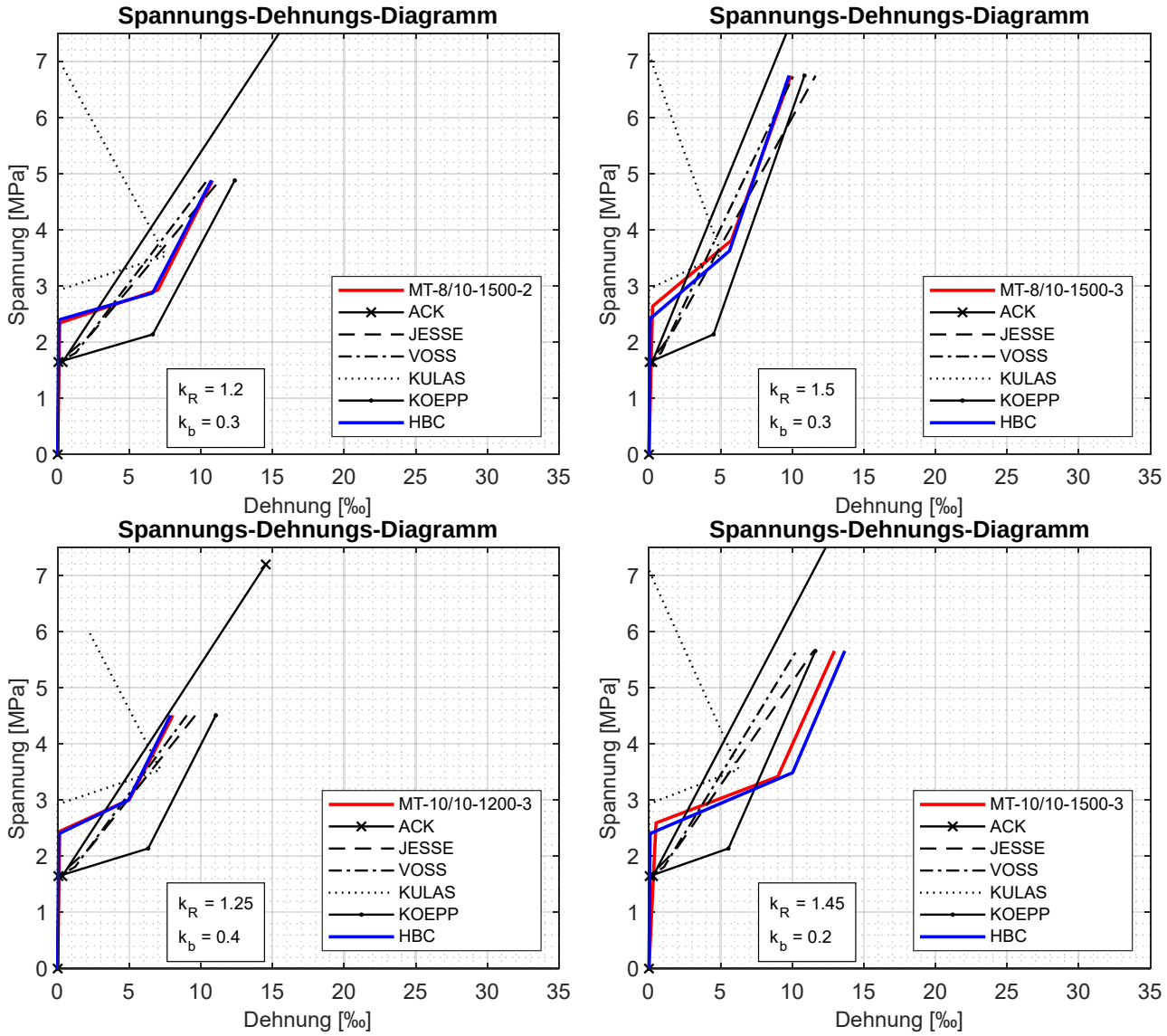


Abbildung H-2: Spannungs-Dehnungs-Diagramme der verschiedenen Ansätze bei Variation der Faktoren k_R und k_b (Teil 2).

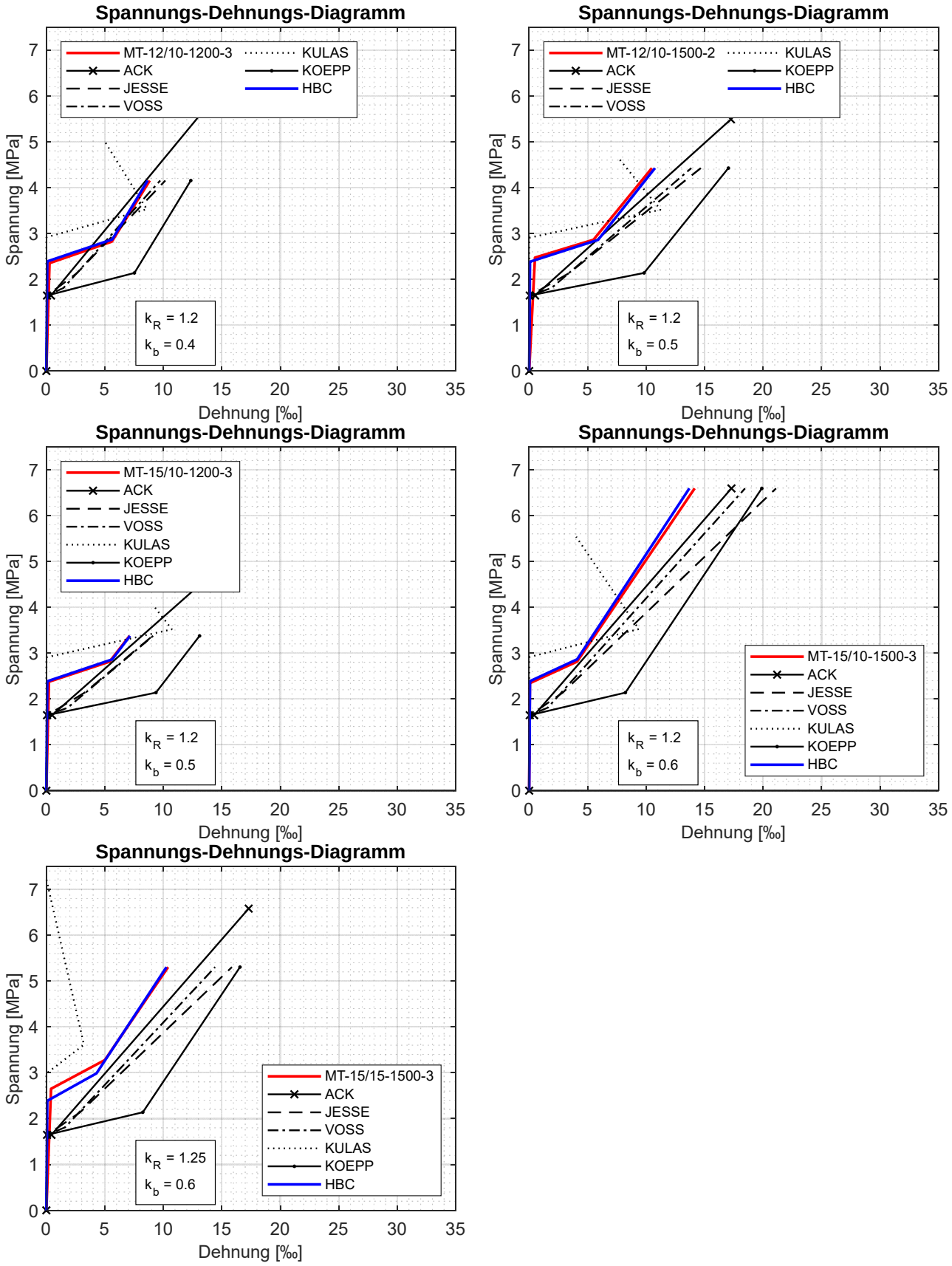


Abbildung H-3: Spannungs-Dehnungs-Diagramme der verschiedenen Ansätze bei Variation der Faktoren k_R und k_b (Teil 3).

Anhang I Demonstratorbau

I.1 Fassadenplatte

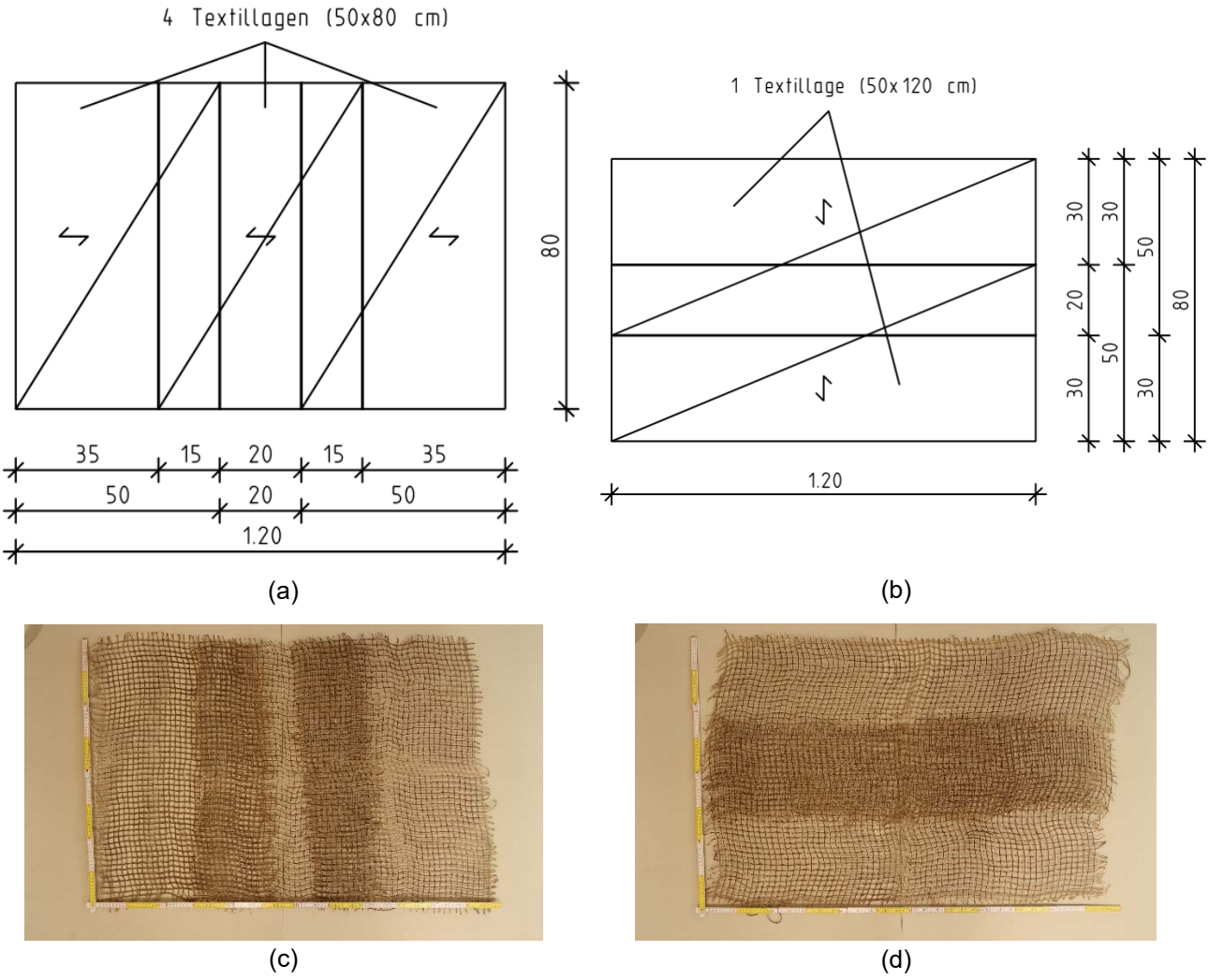
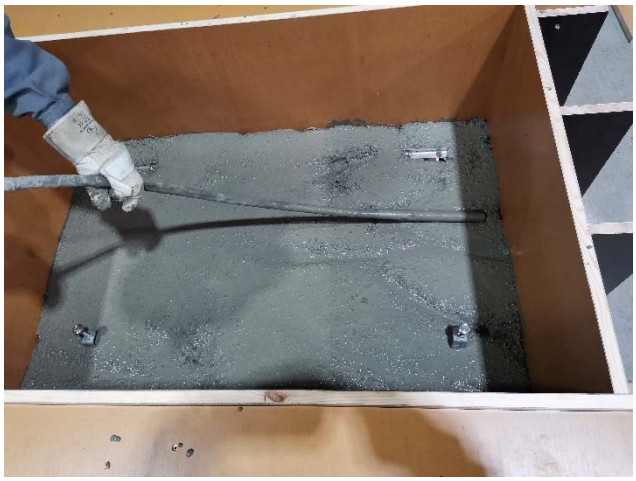


Abbildung I-1: Bewehrungsskizze der Fassadenplatte in Längsrichtung (Schussfaden parallel zu eingezeichneter Spannrichtung) (a) und Querrichtung (b); Textile Bewehrungslagen in Längsrichtung (c) und Querrichtung (d).

(a)

(b)



(c)

(d)

Abbildung I-2: Betonage der Fassadenplatte: Vorbereiten der Bewehrung sowie der Einbauteile (a), lagenweises Einbringen des Betons und der Bewehrung (b), Verdichten des Betons nach der letzten Lage (c) und fertige Platte vor dem Aushärten (d).

I.2 Industriefußboden

(a) (b)

Abbildung I-3: Fixierungspunkt mit Flachsfasergarn (a) und vorbereitete beschichtete Textilbewehrung für den Randeinbau (b).

Anhang J Technische Datenblätter

J.1 SICOMIN GreenPoxy 56

Sicomin Epoxy Systems

TECHNISCHES DATENBLATT

TIME OUT Composite oHG

GREENPOXY 56/SDSC
ED 1495
Seite 1 / 4
Version vom 06/09/2016

GREENPOXY 56
Epoxid-Harzsystem mit hohem Kohlenstoff-Anteil aus Bioresourcen

Das **GREENPOXY 56** -System entstammt unserer letzten Innovation in der "Grüner Chemie" und ist ein Produkt mit einem hohen Kohlenstoff-Anteil aus pflanzlicher Herkunft.

Der "grüne" Kohlenstoff-Anteil ist durch ein unabhängiges Labor anhand von Carbon 14-Messungen zertifiziert worden.

Mit **GREENPOXY 56** ist ein signifikanter technologischer Fortschritt hinsichtlich folgender Aspekte gelungen: Klarheit, Färbung und Leistungsfähigkeit, gleichzeitig wird die Verfügbarkeit großer industrieller Tonnagen garantiert.

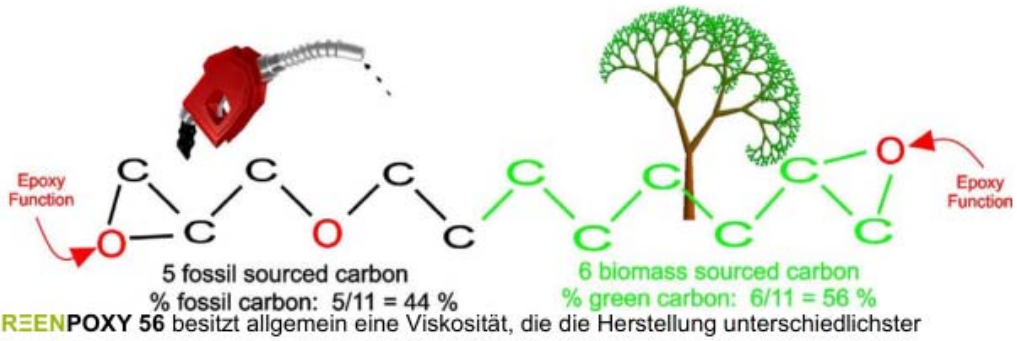
Mit der Verbindung von SR **GREENPOXY 56** und Härter SD GP505v2 ist es SICOMIN gelungen, mit der Rezeptur einen 56%igen Anteil an pflanzlicher Molekularstruktur zu erreichen.

Zusätzlich sind mittels der "SDxxxx" Härter und **GREENPOXY 56** auch andere Mischungen möglich (siehe dazu die entsprechende Tabelle Seite 4). Der finale "grüne" Kohlenstoffanteil hängt hierbei von der Auswahl des Härters ab.

SR **GREENPOXY 56** ist ein Epoxidharz, dessen Molekularstruktur zu 56% aus Planzen abstammen. Dieser Prozentanteil ist abhängig von der Herkunft des im Molekül enthaltenen Kohlenstoffs.

Unten, wie in dem aus 11 Kohlenstoffen bestehenden hypothetischen Molekül gezeigt, kommen 6 aus "grüner Chemie", was einem Anteil von 56% an grünem Kohlenstoff entspricht.

Härter SD GP 505 v2 folgt derselben Logik und enthält ebenso das Maximum an Biomasse-Kohlenstoff.



GREENPOXY 56 besitzt allgemein eine Viskosität, die die Herstellung unterschiedlichster Produkte ermöglicht.

TIME OUT COMPOSITE oHG
Ottostrasse 119
D-53332 Bornheim-Sechtem
Tel.: +49 (0) 22 27 / 90 81 0
Fax: +49 (0) 22 27 / 90 81 29
http://www.timeout.de
Email: service@timeout.de

TECHNISCHES DATENBLATT

Das System SR GREENPOXY 56 / SD Surf Clear ist ein klares, wasserfestes Laminier-Epoxidsystem, was speziell für die Herstellung von maßgefertigten Segel- und Surfboards entwickelt wurde.

Die Rezeptur, bestehend aus SR GREENPOXY 56 und SD Surf Clear liefert eine harte, strapazierfähige und glänzende Bewschichtung für Windsurf- und Waverriding-Bretter. Diese vereinigt dabei hohe mechanische Eigenschaften mit einer klaren und nicht vergilbenden Ansicht.

SR GREENPOXY 56 Harz

Farbe / Erscheinen		**Gelb / flüssig**
Chemische Herkunft		Epoxy
Lagerfähigkeit		2 Jahre, kristallisations-frei
Viskosität (mPa.s)	15°C	2500 ± 500
Rheometer CP 50 mm	20°C	1400 ± 280
Scherrate 10 s^{-1}	25°C	800 ± 160
	30°C	500 ±100
	40°C	250 ±50
%-Anteil an Grünem Kohlenstoff		56 ± 2
Farbe (Gardner) ISO 4630		2 max
Dichte NF EN ISO 2811-1	20°C	1.198 ± 0.005
Refraktiv-Index DIN 514423-2	25°C	1.535 + 0.002

SD Surf Clear Härter

Farbe, Erscheinung		Farblos, flüssig
Reaktivitäts-Type		Standard
Viskosität (mPa.s)	15°C	80 ± 15
Rheometer CP 50 mm	20°C	60 ± 10
Scherrate 10 s^{-1}	25°C	40 ± 8
	30°C	30 ± 5
	40°C	
%-Anteil an Grünem Kohlenstoff		0
Farbe (Gardner) ISO 4630		1 max
Dichte NF EN ISO 2811-1	20°C	0.958 ± 0.005

TIME OUT COMPOSITE oHG
Ottostrasse 119
D-53332 Bornheim-Sechtem
Tel.: +49 (0) 22 27 / 90 81 0
Fax: +49 (0) 22 27 / 90 81 29
http://www.timeout.de
Email: service@timeout.de

Misch-Eigenschaften
SR GREENPOXY 56 / SD Surf Clear Härter

Mischungsverhältnis Nach Gewicht		100 / 37 g
Nach Volumen		100 / 47 ml
%-Anteil an Grünem Kohlenstoff		41%
Mischviskosität (mPa.s) Rheometer CP 50 mm Scherrate 10 s^{-1}	20°C 30°C 40°C	 900 ± 180 330 ± 65 330 ± 40

Bitte beachten Sie:
Gültig bei allen von uns oder / und durch SICOMIN EPOXY SYSTEMS zur Verfügung gestellten und auf bestem Wissen und Gewissen beruhenden Informationen (egal, ob mündlicher oder schriftlicher Natur), können wir für deren Richtigkeit keine Haftung übernehmen.
Darum weisen wir unsere Kunden darauf hin, dass Sie sich vor endgültiger Anwendung als Verwender der SICOMIN-Produkte und Systeme unbedingt selbst von der Anwendbarkeit überzeugen müssen und dass die Verwendung ausschließlich Ihrer Verantwortlichkeit unterliegt.
Sollten von unserer oder von Herstellerseite her dennoch berechtigte Ansprüche erfüllt werden, so bezieht sich deren Erfüllung lediglich auf den Wert der gelieferten und von Ihnen verwendeten Produkte.
Der Hersteller wiederum garantiert die ständige Qualitätskontrolle laut seinen allgemeinen Geschäfts- und Lieferbedingungen.

TIME OUT COMPOSITE oHG
Ottostrasse 119
D-53332 Bornheim-Sechtem
Tel.: +49 (0) 22 27 / 90 81 0
Fax: +49 (0) 22 27 / 90 81 29
http://www.timeout.de
Email: service@timeout.de

TECHNISCHES DATENBLATT

Andere "grüne" Harz / SD-Härter Misch-Alternativen

	Mischung Nach Gewicht	Grüner C-%-Anteil	Tg 1 max oder Onset (°C) mit	Beste Eignung für
SR GREENPOXY 56 / SD Surf Clear	100 / 37	41	SD SC (75)	Klare Laminate
SR GREENPOXY 56 / SD Glass One	100 / 42	40	SD GO (69)	Klare Laminate
SR GREENPOXY 56 / SD GP 505	100 / 47	56	DP 505 (71)	Vielzweck-Anwendungen
SR GREENPOXY 56 / SD 1213	100 / 50	37	SD1213 (43)	Große klare Vergüsse
SR GREENPOXY 56 / SD 280x	100 / 37	41	SD2806 (66) ..2803 (72) ..2801 (80)	Vielzweck-Anwendungen
SR GREENPOXY 56 / SD 477x	100 / 29	43	SD4775 (80) ..4771 (74)	Vielzweck-Anwendungen
SR GREENPOXY 56 / SD 550x	100 / 37	41	SD5505 (78) ..5503 (85) ..5502 (84)	Vielzweck-Anwendungen
SR GREENPOXY 56 / SD 597.20	100 / 21	46	SD597.20 (100)	Sehr große Verguss-Anwendungen
SR GREENPOXY 56 / SD 720x	100 / 37	41	SD7206 (84) ..7203 (82) ..7201 (80)	Vielzweck-Anwendungen
SR GREENPOXY 56 / SD 860x	100 / 37	41	SD8605 (67) ..8601 (56)	Vielzweck-Anwendungen
SR GREENPOXY 56 / SD 882x	..8824 100 / 21 ..8822 100 / 31	46 43	SD8824 (90) ..8822 (71)	Infusion

TIME OUT COMPOSITE oHG
Ottostrasse 119
D-53332 Bornheim-Sechtem
Tel.: +49 (0) 22 27 / 90 81 0
Fax: +49 (0) 22 27 / 90 81 29
http://www.timeout.de
Email: service@timeout.de