

Diplomarbeit

# Untersuchungen an gestickten, biogen getränkten textilen Bewehrungsstrukturen aus Basaltfasern für den Einsatz in Beton

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads  
Diplom-Ingenieurin  
eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

---

Diploma Thesis

# Investigations on embroidered textile reinforcement structures composed of basalt fibers impregnated with a bio-based resin for use in concrete

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of  
Diplom-Ingenieurin  
of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

von

**Leah Lioba Helm**

Matr.Nr.: 01604422

Betreuung: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. **Johann Kollegger**  
Dipl.-Ing. Dr.techn. **Philipp Preinstorfer**  
Institut für Tragkonstruktionen/ Betonbau  
Forschungsbereich Stahlbeton- und Massivbau  
Technische Universität Wien,  
Karlsplatz 13/Stiege 2, 1040 Wien, Österreich

Wien, im Monat Oktober 2023

---



# Danksagung

Ich bedanke mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-techn. Johann Kollegger für die Möglichkeit meine Diplomarbeit an seinem Institut zu verfassen. Auch bedanke ich mich bei meinem Betreuer Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Philipp Preinstorfer, für die Möglichkeit an einem solch interessanten Thema zu forschen. Während der Ausarbeitung der Arbeit waren seine fachliche Expertise und die wertvollen Ratschläge sehr hilfreich.

Ich bedanke mich bei meinen Eltern und meinem Bruder, die mich auf meinem Weg immer unterstützt haben und an mich glauben.

Meinen Freunden, und meinem Partner David, möchte ich für ihre Geduld und den emotionalen Rückhalt danken.

# Kurzfassung

Durch die Verwendung von Textilbeton lassen sich dünne und leichte Betonkonstruktionen realisieren. Im Gegensatz zum Stahlbeton kommen hierbei textile Strukturen als Bewehrung zum Einsatz. Die Tränkung von textilen Bewehrungsstrukturen ist heutzutage unabdingbar, um einen wirtschaftlichen Einsatz des Verbundwerkstoffes zu gewährleisten. Der Hauptfokus der vorliegenden Arbeit liegt auf der Untersuchung gestickter getränkter textiler Bewehrungsstrukturen aus Basaltfasern, welche im Unterschied zu üblichen Textilbewehrungen nicht mit Epoxidharz, sondern einem biogenen Tränkungsmittel getränkt sind. Dies geschieht vor dem Hintergrund einer verbesserten Nachhaltigkeit. Ob die Leistungsfähigkeit von Betonprobekörpern bewehrt mit biogen getränkten Textilstrukturen mit jener von mit Epoxidharz getränkten textilen Bewehrungsstrukturen vergleichbar ist, wird durch experimentelle Untersuchungen analysiert. Um eine umfassende Beurteilung des verwendeten biogenen Tränkungsmittels vornehmen zu können, wurden im Zuge dieser Arbeit auch digitalmikroskopische und rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen inklusive energiedispersiver Röntgenmikroanalyse an getränkten Basaltrovings durchgeführt.

Laboruntersuchungen zum Zugtragverhalten haben gezeigt, dass die maximale Spannung bei Auftreten des Erstrisses durch die Anwendung einer biogen getränkten Bewehrungsstruktur höher war als an Probekörpern mit Epoxidharz-Tränkung. Die durch die Zugversuche ermittelte Bruchspannung sowie die Untersuchungen hinsichtlich des Verbundverhaltens haben gezeigt, dass durch die Anwendung des biogenen Tränkungsmittels eine geringere Leistungsfähigkeit als mit einem konventionellen Epoxidharz zu erwarten ist. In den elektronenmikroskopischen Untersuchungen an einem Einzelroving wurde eine unzureichende Haftung des jeweiligen Tränkungsmittels an den einzelnen Fasern festgestellt. Diese sind mit digitalmikroskopischen Untersuchungen in Zusammenhang zu sehen, wo eine nicht gleichmäßige Durchtränkung der Fasern eines Einzelrovings beobachtet wurde. Die Bestimmung der erforderlichen Verankerungslänge der Bewehrung wiederum hat aufgezeigt, dass bereits kurze Längen ausreichen, um das Ausziehen des Rovings zu vermeiden.

# Abstract

Thin and lightweight concrete structures can be realized by using textile concrete. In contrast to steel reinforced concrete, textile structures are used as reinforcement. The impregnation of textile reinforcement structures is nowadays indispensable to ensure an economical use of the composite material. The main focus of the present work is the investigation into embroidered impregnated textile reinforcement structures composed of basalt fibers, which, in contrast to conventional textile reinforcements, are not impregnated with epoxy resin but with a biogenic impregnating agent. This takes place with special focus on the aspect of improved sustainability. Whether the performance of concrete specimens reinforced with biogenically impregnated textile structures is comparable to that of textile reinforcement structures impregnated with epoxy resin is analyzed by experimental investigations. In order to make a comprehensive assessment of the biogenic impregnant used, digital microscopic and scanning electron microscopic investigations including energy dispersive X-ray microanalysis were also carried out on impregnated basalt rovings in the course of this work.

Laboratory tests on the tensile behavior have shown that the maximum stress at the occurrence of the initial crack was higher by the application of a biogenic impregnated reinforcement structure than on specimens with epoxy resin impregnation. The failure stress determined through tensile tests, as well as the investigations regarding the bond behavior, showed that the application of the biogenic impregnant is expected to result in a lower performance than with a conventional epoxy resin. In the electron microscopic investigations on a single roving, insufficient adhesion of the respective impregnating agent to the individual fibers was found. These are visible in connection with digital microscopic investigations, where a non-uniform impregnation of the fibers of a single roving can be observed. The determination of the required anchorage length of the reinforcement, in turn, has shown that even short lengths are sufficient to prevent the roving from pulling out.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation.....	1
1.2	Aufgabenstellung und Methodik der Arbeit .....	1
1.3	Aufbau der Arbeit .....	2
2	Textile Bewehrung in Betontragwerken .....	4
2.1	Allgemeines zum Baustoff Textilbeton .....	4
2.1.1	Anforderungen an den Beton.....	5
2.2	Textile Fasern zur Herstellung von Bewehrung .....	6
2.2.1	Einteilung textiler Fasern .....	6
2.2.2	Basaltfasern.....	8
2.2.3	Begrifflichkeiten .....	10
2.2.4	Anforderungen an Fasern und textile Bewehrungsstrukturen .....	11
2.2.5	Herstellung textiler Flächengebilde .....	12
3	Sticktechnologie.....	14
3.1	Allgemeines.....	14
3.2	Tailored-Fibre-Placement (TFP) .....	15
4	Tränkung textiler Bewehrungsstrukturen .....	17
4.1	Allgemeines zur Tränkung.....	17
4.1.1	Begrifflichkeiten .....	18
4.2	Tränkungsmittel.....	19
4.2.1	Herkömmliche Tränkungsmittel .....	20
4.2.2	Biogene Tränkungsmittel .....	21
4.2.3	Anforderungen an das Tränkungsmittel .....	25
4.3	Tränkungsprozess .....	27
4.3.1	Foulard-Verfahren.....	27
5	Mikroskopische Untersuchungen.....	29
5.1	Digitalmikroskopische Untersuchungen.....	29
5.1.1	Prinzip der Digitalmikroskopie.....	29
5.1.2	Versuchsaufbau.....	30
5.1.3	Versuchsdurchführung.....	30

5.1.4	Versuchsbeobachtung.....	31
5.1.5	Interpretation .....	33
5.2	Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen .....	35
5.2.1	Prinzip der Rasterelektronenmikroskopie.....	35
5.2.2	Versuchsaufbau.....	35
5.2.3	Versuchsdurchführung.....	36
5.2.4	Versuchsbeobachtung.....	37
5.2.5	Interpretation .....	47
5.2.6	Energiedispersive Röntgenmikroanalyse (EDX) .....	49
6	Experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten.....	51
6.1	Materialien .....	51
6.1.1	Feinbeton.....	51
6.1.2	Getränkte Bewehrungstextilien .....	52
6.1.3	Prüfkörperherstellung.....	53
6.2	Betonkennwerte.....	53
6.2.1	Geometrie der Probekörper, Versuchsdurchführung.....	53
6.2.2	Versuchsergebnisse .....	54
6.3	Zugversuche.....	56
6.3.1	Allgemeines zum Zugtragverhalten.....	56
6.3.2	Geometrie der Probekörper, Versuchsdurchführung.....	57
6.3.3	Versuchsergebnisse .....	60
6.3.4	Diskussion der Ergebnisse .....	62
6.4	Verbundversuche.....	63
6.4.1	Allgemeines zum Verbundverhalten.....	63
6.4.2	Geometrie der Probekörper, Versuchsdurchführung.....	64
6.4.3	Versuchsergebnisse .....	65
6.4.4	Diskussion der Versuchsergebnisse.....	67
6.5	Verankerungsversuche .....	67
6.5.1	Geometrie der Probekörper, Versuchsdurchführung.....	67
6.5.2	Versuchsergebnisse .....	69
6.5.3	Diskussion der Ergebnisse .....	70
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	71
	Literaturverzeichnis .....	73
	Abbildungsverzeichnis .....	75
	Tabellenverzeichnis.....	78
	Anhang A: Linienprofile der EDX-Analyse.....	79

Anhang B: Dehnkörperversuche.....	81
Anhang C: Verbundversuche .....	87
Anhang D: Verankerungsversuche .....	89





# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Stahlbeton ist in der modernen Bauindustrie hinsichtlich seiner hohen Leistungsfähigkeit und vielseitigen Anwendbarkeit als Verbundwerkstoff unersetzlich. Jedoch ist durch die energieintensive Herstellung von Stahl, und die mit einem Anteil von 6-8% an den weltweiten Kohlenstoffdioxid-Emissionen beteiligte Zementherstellung, die Verwendung des Verbundwerkstoffes hinsichtlich ökologischer Aspekte kritisch zu betrachten [1]. Um das Ziel des Pariser Klimaübereinkommens, eine CO<sub>2</sub>-neutrale Europäische Union bis 2050 zu erreichen, ist ein Umdenken in der Bauindustrie notwendig, um nachhaltigeres Bauen zu fördern, und somit einen Beitrag zur Reduzierung der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen zu leisten.

Ein Schritt in diese Richtung wurde zum Beispiel durch Forschung an Textilbeton getätigt. Hierbei kommen textile Bewehrungsstrukturen aus Hochleistungsfasern anstelle von traditionellen Stahlbewehrungen zum Einsatz. Unterschiedliche Herstellungsmethoden wie beispielsweise das Weben, Stricken oder Sticken erlauben es, die einzelnen Fasern zu textilen Flächengebilden zu fertigen. Textilbeton zeichnet sich durch höhere Zugfestigkeiten und Beständigkeit gegenüber Korrosion im Vergleich zu Stahlbeton aus. Durch den Einsatz von Textilbewehrung gelingt es leichtere und schlankere Betonbauwerke zu realisieren. Um die textilen Bewehrungsstrukturen wirtschaftlich einsetzen zu können, werden diese mit einer Polymermatrix getränkt. In [2] wurde das Tragverhalten von Carbonfasern getränkt mit Epoxidharz und Styrol-Butadien erstmals systematisch untersucht. Die Ergebnisse von mit Epoxidharz getränkten Carbonfasern zeigten eine ausgezeichnete Leistung hinsichtlich des Tragverhaltens. Doch auch der Einsatz von Carbonfasern und Epoxidharz kann unter Aspekten der Nachhaltigkeit kritisch betrachtet werden. Das aus fossilen Rohstoffen gewonnene Epoxidharz ist auf Grund der Vernetzung der Harze biologisch nicht abbaubar und wieder verarbeitbar [3]. Die energieintensive Herstellung von Kohlenstofffasern, insbesondere von getränkten Carbonfasern stellt kein recyclinggerechtes Material dar [4]. Der Einsatz von Faserstrukturen natürlichen Ursprungs kann zu einer umweltfreundlicheren Bauweise des Textilbetons beitragen. Das Tränken der textilen Bewehrungsstrukturen ist jedoch essenziell, um den Einsatz in Betonkonstruktionen wirtschaftlich zu ermöglichen. Um Textilbeton auch zukunftsorientiert und ressourcenschonend anwenden zu können, wurden biogene Tränkungsmitel natürlichen Ursprungs intensiv erforscht.

## 1.2 Aufgabenstellung und Methodik der Arbeit

Die vorliegende Arbeit fokussiert sich auf die Thematik der biogenen Tränkungsmitel zum Tränken von gestickten textilen Bewehrungsstrukturen aus Basaltfasern. In der Arbeit werden Forschungstätigkeiten der letzten Jahre in Zusammenhang mit dieser Thematik vorgestellt. Im Zuge von experimentellen Untersuchungen wird die Leistungsfähigkeit eines biogenen

Tränkungsmittels an textilbewehrten Betonprobekörpern untersucht. Mit der vorliegenden Arbeit soll damit folgende Fragestellung beantwortet werden:

**Ist die Leistungsfähigkeit eines biogenen Tränkungsmittels zur Tränkung gestickter textiler Bewehrungsstrukturen aus Basaltfasern vergleichbar oder sogar besser als mit einem konventionellen Epoxidharz?**

Anhand von experimentellen Untersuchungen wurde das Zugtragverhalten und das Verbund- sowie das Verankerungsverhalten von biogen getränkten textilen Bewehrungsstrukturen aus Basaltfasern an Betonprobekörpern untersucht. Durch einen Vergleich der Ergebnisse an mit Epoxidharz getränkten textilen Bewehrungsstrukturen aus Basaltfasern konnte eine Aussage zur Leistungsfähigkeit des biogenen Harzes getroffen werden. Um mögliche Abweichungen der Ergebnisse von mit konventionellem Epoxidharz und der biogenen Alternative zu deuten, wurden diverse mikroskopische Untersuchungen an den im jeweiligen Tränkungsmittel eingebetteten Fasern durchgeführt. Neben digitalmikroskopischen Untersuchungen an Einzelrovings, waren dies auch elektronenmikroskopische Untersuchungen an textilen Flächengebilden.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Zu Beginn der Arbeit werden in Kapitel 2- Textile Bewehrung in Betontragwerken- die Eigenschaften von Textilbeton und die Unterschiede zum Stahlbeton aufgezeigt. Ebenfalls wird hier die Zusammensetzung des Betons zur Anwendung als Matrix für textile Bewehrungsstrukturen und die Vielzahl an unterschiedlichen Fasermaterialien aufgezeigt. Mechanische und chemische Eigenschaften von Basaltfasern werden im Zuge dessen näher beleuchtet und übliche Begriffe bei der Anwendung von textilen Bewehrungsstrukturen definiert. Weiters werden Anforderungen an textile Flächengebilde, damit sie für die Anwendung in einer Betonmatrix geeignet sind, aufgezeigt. Abschließend wird die Herstellung einer textilen Bewehrungsstruktur ausgehend von einem Einzelroving beschrieben.

Im darauffolgenden Kapitel 3- Stickttechnologie- wird das Tailored-Fibre-Placement-Verfahren als Methode der Textilstickerei erklärt. Darauf aufbauend wird die Methodik der Einkopfstick- sowie Mehrkopfstickmaschinen und die Soutache-Schiffchen Methode vorgestellt.

In Kapitel 4- Tränkung textiler Bewehrungsstrukturen- wird die Sinnhaftigkeit einer Tränkung in Zusammenhang mit der Leistungsfähigkeit der textilen Bewehrung erläutert. Die mit der Tränkung in Verbindung stehenden Begriffe werden ebenfalls definiert. Nach Aufzeigen der Grundlagen zur Thematik der Tränkung werden konventionelle, nicht biogene Tränkungsmittel sowie biogene Alternativen vorgestellt. Hierzu wird der aktuelle Stand der Forschung dargestellt, und Ergebnisse aus experimentellen Untersuchungen an getränkten textilen Bewehrungsstrukturen wiedergegeben. Anschließend werden Anforderungen an Tränkungsmittel aufgezeigt, um die Kriterien bei der Wahl eines Tränkungsmittels nachvollziehen zu können. Abschließend wird das Foulard-Verfahren zur Tränkung textiler Bewehrungsstrukturen beschrieben.

Das Kapitel 5- Mikroskopische Untersuchungen- beschreibt die im Zuge der Arbeit durchgeführten digitalmikroskopischen und rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen inklusive energiedispersiver Röntgenmikroanalyse. Ebenso werden die Versuchsaufbauten und die Probenpräparation zur Vorbereitung der Versuchsdurchführung ausführlich erläutert.

In Kapitel 6- Experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten- werden die durchgeführten Untersuchungen hinsichtlich des Zug-, Verbund- und Verankerungsverhaltens von textilen biogen getränkten Bewehrungsstrukturen vorgestellt. Zunächst werden hierbei die für die Versuche benötigten Materialien aufgezeigt und die Versuchsaufbauten beschrieben. Anschließend werden die Ergebnisse der jeweiligen Versuche an mit Epoxidharz getränkten textilen Bewehrungsstrukturen verglichen, um eine Aussage hinsichtlich der Leistungsfähigkeit des biogenen Tränkungsmediums tätigen zu können.

Den Abschluss der Arbeit bildet das Kapitel 7- Zusammenfassung und Ausblick. Hier werden die relevanten Erkenntnisse aus den jeweiligen Versuchen aufgezeigt und ein Ausblick auf mögliche weitere Forschungsschritte gegeben.

## 2 Textile Bewehrung in Betontragwerken

Um eine Einführung in die Thematik des Textilbetons zu erhalten, werden zunächst allgemeine Informationen zu diesem Baustoff gegeben. Nach einer kurzen Begriffsdefinition werden Gemeinsamkeiten und Unterschiede zum üblichen Stahl- und Faserbeton aufgezeigt. Hierbei werden explizit auch Anforderungen an den Beton, welcher zum Einsatz mit Textilbewehrung kommt, näher beschrieben. Ein weiterer Fokus dieses Kapitels bezieht sich auf die Fasern, welche zur Herstellung textiler Bewehrungsstrukturen notwendig sind. Zunächst wird ein Überblick unterschiedlicher Faserarten gegeben und eine Kategorisierung vorgenommen. Das Hauptaugenmerk wird dann auf Basaltfasern gelegt, da diese in den nachfolgend beschriebenen Laboruntersuchungen als Bewehrung im Beton verwendet wurden. Neben der chemischen Zusammensetzung von Basalt und der Herstellung von Fasern aus dem Gestein werden auch chemische, physikalische und thermische Eigenschaften des Werkstoffes aufgezeigt. Zum Einsatz von Fasern als textile Flächengebilde werden einige Begrifflichkeiten benötigt, die in diesem Kapitel ebenfalls erläutert werden. Um als fertiges Flächengebilde zur Bewehrung von Beton geeignet zu sein, haben die textilen Bewehrungsstrukturen spezielle Anforderungen zu erfüllen. Dazu werden im Folgenden, neben Voraussetzungen für die Fasern zur Anwendung als textile Bewehrungsstrukturen, auch baupraktische und wirtschaftliche Anforderungen an diese Strukturen thematisiert. Schließlich wird die Prozesskette zur Herstellung textiler Bewehrung dargestellt und erläutert, um den Weg von einem Roving zu einer zweidimensionalen Bewehrungsstruktur ersichtlich zu machen.

### 2.1 Allgemeines zum Baustoff Textilbeton

Der Begriff Textilbeton setzt sich aus den zwei unterschiedlichen Komponenten Beton und textile Bewehrung zusammen. Textilien bestehen aus einzelnen Garnen, die wiederum aus unzähligen Fasern gebildet werden. Dennoch ist Textilbeton kein Faserbeton. Letzterer besteht aus Kurzfasern, beispielweise Glasfasern mit einer Länge von 5 bis 25 mm, welche dem Beton beigemischt werden, und eine weitestgehend zufällige Verteilung aufweisen. Faserzugabe zielt darauf ab, eine bessere Rissverteilung zu gewährleisten. Hingegen werden im Textilbeton Endlosfasern zu Gitterstrukturen zusammengesetzt. Dieses Flächengebilde hat den Vorteil eines ausgerichteten Bewehrungseinbaus im Beton und der effizienten Aufnahme von Zugkräften. Eine weitere Charakteristik, welche den Unterschied zwischen Faserbeton und Textilbeton verdeutlicht, ist der Versagensmechanismus. Dieser äußert sich beim Faserbeton in der Regel durch den Auszug der Fasern, hingegen beim Textilbeton durch das Erreichen der Materialfestigkeit der Bewehrung [5], [6].

Die Kombination von Beton und Textil erzeugt einen hochfesten Verbundwerkstoff. Die Beständigkeit gegen Korrosion und die höheren Zugtragfähigkeiten im Vergleich zum Stahl rechtfertigen den Einsatz von textilen Fasermaterialien im Beton [2], [7]. Die Anwendungsbereiche dieses Verbundwerkstoffes umfassen neben Sanierung und Verstärkung auch den Neubau. Eine Auflistung durchgeführter Projekte ist in [6] zu finden.

Vergleicht man Textilbeton mit Stahlbeton können offensichtliche Gemeinsamkeiten im Tragverhalten, wie der Aufnahme von Druckkräften durch den Beton und die Aufnahme von Zugkräften durch die Bewehrung, genannt werden. Auch Versagen von Textilbeton macht sich wie beim Stahlbeton durch Erreichen der Materialfestigkeit der Bewehrung bemerkbar. Geometrisch werden jedoch wesentliche Unterschiede deutlich. Denn im Vergleich zum Stahlbeton ist beim Textilbeton das Größtkorn, der Bewehrungsdurchmesser, die Stababstände und somit auch die Dimension des Bauteils, besonders die Bauteildicke kleiner [5]. In Tabelle 2.1 sind Bereiche der jeweiligen Größenordnungen angegeben.

**Tab. 2.1:** Vergleich der Dimensionen zwischen Textilbeton und Stahlbeton, Zahlenwerte aus [5]

	<b>Textilbeton</b>	<b>Stahlbeton</b>
<b>Größtkorn [mm]</b>	1-4	8-32
<b>Durchmesser der Bewehrung [mm]</b>	0,6-2,5	6-32
<b>Stababstände [mm]</b>	5-25	50-250

Ob sich durch den Einsatz von Textilbeton anstelle Stahlbeton bessere Bauwerke realisieren lassen, ist eine in diesem Zusammenhang häufig gestellte Frage. Die Beantwortung kann nicht ohne Beachtung des Einsatzbereiches erfolgen. Wird bei der Ausführung von Bauwerken in Stahlbetonweise, viel Beton verwendet, um den verhältnismäßig geringen Anteil an Bewehrungsstahl vor Korrosion zu schützen, so stellt Textilbeton eine vielversprechende Alternative dar. In diesem Fall kann nämlich die hohe Betondeckung stark reduziert werden. Gilt es jedoch hohe Beanspruchungen abzutragen und ist diesbezüglich eine große Menge an Beton erforderlich, überwiegen weiterhin die Vorteile der Ausführung in Stahlbetonweise [5].

### 2.1.1 Anforderungen an den Beton

Betone die in Kombination mit textiler Bewehrung zum Einsatz kommen, sind grundsätzlich keine neuen Entwicklungen. Dennoch ist die Zusammensetzung der einzelnen Komponenten abhängig von der Anwendung und muss für die jeweilige Bewehrung geeignet sein. Für Textilbetone werden in Regel feinkörnige Mischungen verwendet, weshalb sich in der Literatur die Bezeichnung Feinbeton durchgesetzt hat. Diese Betone können als Hochleistungsbetone kategorisiert werden, die eine gute Kompatibilität mit dem engmaschigen Netz aus Hochleistungsfasern aufweist [8].

Um als Beton für textile Bewehrung geeignet zu sein muss der Feinbeton folgende Anforderungen aufweisen [8]:

- Aufweisen guter Verbund- und Verarbeitungseigenschaften
- Mindestwerte für Druck- und Zugfestigkeiten müssen erfüllt sein
- Je nach Anwendungsort muss der Beton eine hohe Dauerhaftigkeit gegen äußere Einwirkungen aufweisen

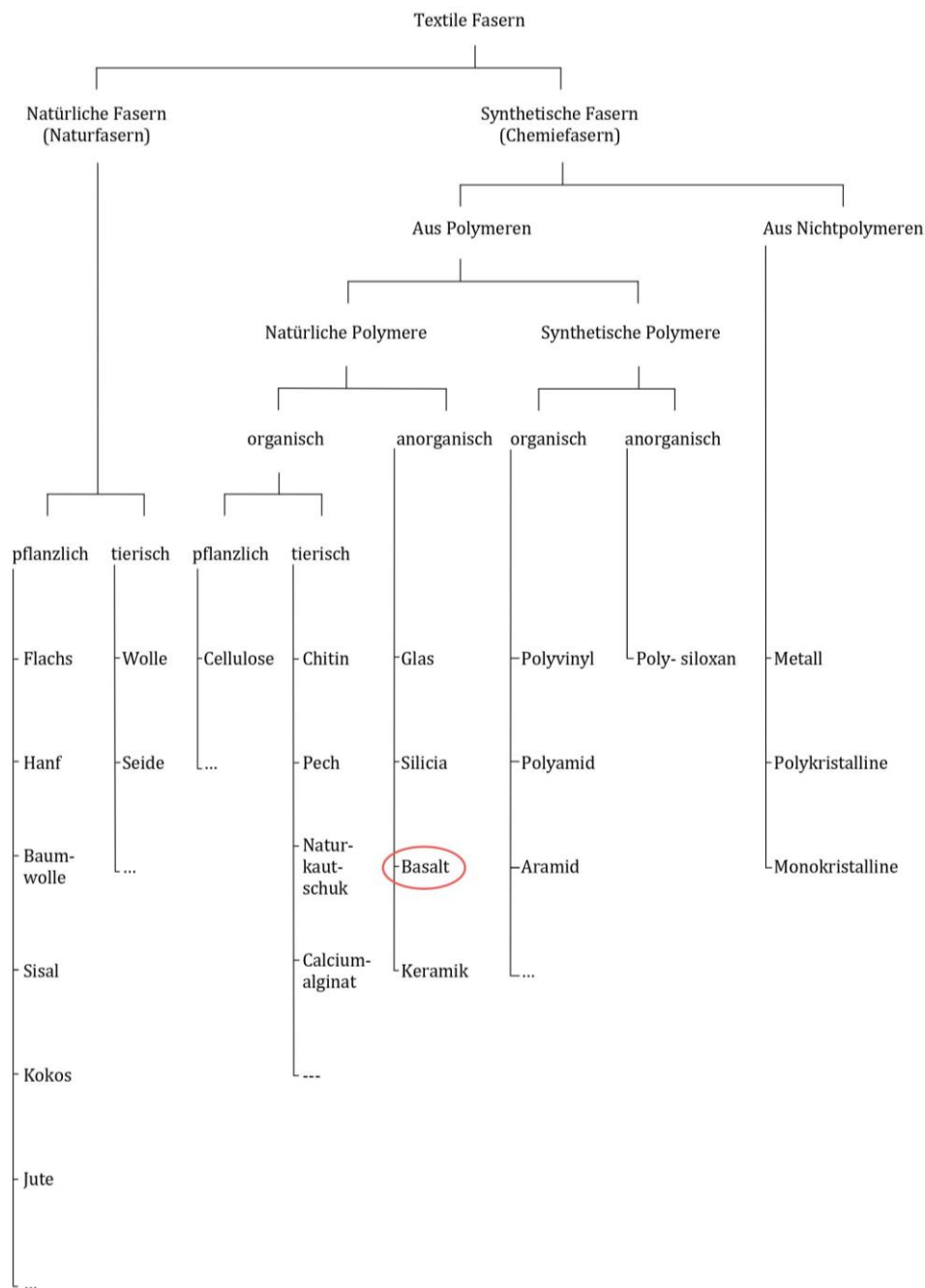
Hauptaugenmerk bei der Herstellung des Feinbetons liegt wohl bei der Verträglichkeit zu den textilen Bewehrungsfasern. Da die Maschenweite textiler Bewehrungsgelege mit 10 mm bis 30 mm sehr gering ist, und auch die Abstände bei mehrlagiger Bewehrung wenige Millimeter betragen, sollte die Wahl des Größtkorn dementsprechend auch um einiges kleiner sein als bei

der Verwendung von Stahlbeton üblich. Der Wertebereich des Größtkorns ist in Tabelle 2.1 ersichtlich. Um dennoch hohe Festigkeiten und gutes Verbundverhalten bei gleichzeitig guten Verarbeitungseigenschaften zu erreichen, sind hohe Bindemittelgehalte notwendig. Der Anteil des Bindemittels setzt sich in der Regel aus einer Mischung verschiedener Zementtypen sowie Flugasche und Mikrosilika zusammen. Die Art der Faser bestimmt die Auswahl der Zementart. Beispielsweise werden für Glasfasern aufgrund der Anfälligkeit gegenüber Alkalität ausschließlich die Zementarten CEM III und CEM II verwendet. Bei Carbonfasern hingegen spielt das Vorhandensein einer alkalischen Umgebung keine Rolle. Weitere Informationen dazu sind in [8] enthalten. Durch Zugabe von Mikrosilika und Flugasche werden unter anderem die Alkalien gebunden und die Verarbeitbarkeit verbessert sich. Um hohe Festigkeiten zu gewährleisten, liegt der Wasser-Bindemittelwert  $w/b$  in der Regel zwischen 0,30 bis 0,40. Dieser geringe  $w/b$ - Wert macht die Zugabe eines Fließmittels zur Erreichung der entsprechenden Konsistenz notwendig. Meist kommen hierbei Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatether (PCE) zum Einsatz [6], [8].

## 2.2 Textile Fasern zur Herstellung von Bewehrung

### 2.2.1 Einteilung textiler Fasern

Die Vielzahl textiler Faserstoffe lässt sich in einem ersten Schritt grob unterteilen zwischen Natur- und Chemiefasern. Als Naturfasern bezeichnet man solche, die aus pflanzlichem oder tierischem Material ohne chemische Veränderung gewonnen werden. Hingegen werden Chemiefasern synthetisch hergestellt. Wie in Abbildung 2.1 ersichtlich, erfolgt eine weitere Unterteilung der Naturfasern hinsichtlich dem Vorhandensein von Kohlenstoffverbindungen (organisch-anorganisch). Hierbei werden organische Verbindungen in pflanzliche-, wie beispielsweise Flachs und Hanf, und tierische Quellen, zum Beispiel Wolle oder Seide gegliedert. Als Vertreter anorganischer Verbindungen seien hier Asbestfasern genannt. Die synthetischen Fasern lassen sich nach Polymeren (natürliche oder synthetische) und Nichtpolymeren klassifizieren. Die natürlichen Polymere lassen sich wiederum anhand eines organischen oder anorganischen Ursprungs unterscheiden. Ein typischer Vertreter pflanzlichen Ursprungs sind Cellulosefasern, hingegen ist Chitin tierischen Ursprungs. Das in dieser Arbeit verwendete Material Basalt gehört zu der Gruppe der natürlichen Polymere anorganischen Ursprungs und ist in der Abbildung rot umrandet. Als Vertreter der synthetischen Polymere organischen Ursprungs kann Polyvinyl und anorganischen Ursprungs Polysiloxan genannt werden. Zur Klasse der synthetischen Fasern aus Nichtpolymeren gehören neben Metallfasern auch polykristalline und monokristalline Fasern.



**Abb. 2.1:** Einteilung der textilen Faserstoffe, Bild erstellt in Anlehnung an [9]

Um als textile Bewehrung im Beton verwendet werden zu können, müssen die Fasern technologische Voraussetzungen erfüllen sowie baupraktischen und wirtschaftlichen Anforderungen genügen. Dies wird in Kapitel 2.2.4 näher erläutert. Zunächst wird im nächsten Unterkapitel aber der Fokus auf Basaltfasern gelegt, da diese im praktischen Teil der Arbeit als Bewehrungsmaterial zum Einsatz kommen. Weiters werden einige Begrifflichkeiten erläutert die bei der Verwendung von textilen Fasern als Bewehrung notwendig sind.



## 2.2.2 Basaltfasern

Wie in Abbildung 2.1 ersichtlich, gehören Basaltfasern zu der Gruppe der Chemiefasern aus natürlichen Polymeren anorganischen Ursprungs. Basalt ist ein Gestein vulkanischen Ursprungs. Es besteht aus unterschiedlichen Metalloxiden, wie Siliziumdioxid  $\text{SiO}_2$ , Aluminiumoxid  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Eisenoxid  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , Magnesiumoxid  $\text{MgO}$ , Calciumoxid  $\text{CaO}$ , Natriumoxid  $\text{Na}_2\text{O}$ , Kaliumoxid  $\text{K}_2\text{O}$  und Titandioxid  $\text{TiO}_2$ . Die Massenanteile der genannten metallischen Oxidverbindungen variieren auf Grund des natürlichen Vorkommens. Tabelle 2.2 veranschaulicht die Massenanteile der Komponenten wie sie in zwei unterschiedlichen Publikationen, [10] und [11], identifiziert wurden.

**Tab. 2.2:** Zusammensetzung von Basaltfasern, Vergleich der Massenanteile aus [10] und [11]

Oxide	Massenanteile in [%] aus [10]	Massenanteile in [%] aus [11]
$\text{SiO}_2$	43,3 - 47,0	42,43 - 55,69
$\text{Al}_2\text{O}_3$	11,0 - 13,0	14,21 - 17,97
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	<5,0	10,80 - 11,68
$\text{MgO}$	8,0 - 11,0	4,06 - 9,45
$\text{CaO}$	10,0 - 12,0	7,43 - 8,88
$\text{Na}_2\text{O}$	<5,0	2,38 - 3,79
$\text{K}_2\text{O}$	<5,0	1,06 - 2,33
$\text{TiO}_2$	<5,0	1,10 - 2,55

Zur Herstellung von Endlosfasern bzw. Rovings aus Basaltfasern eignen sich nicht alle Basaltgesteine. Zur Qualifizierung der Eignung werden Aciditätsmodul sowie Viskositätsmodul bestimmt. Ersterer sollte im Bereich zwischen 3,0 - 6,5 liegen, hingegen sollte der Wertebereich des Viskositätsmodul zwischen 2,0 und 3,0 liegen. Die beiden Module werden anhand der Massenanteile der unterschiedlichen Oxide ermittelt. Nähere Informationen dazu sind in [12] enthalten. In Tabelle 2.3 sind minimale und maximale Werte der Metalloxidverbindungen von Basaltfasern angegeben, wie sie auch in [12] dargestellt werden, damit das Basaltgestein zur weiteren Verarbeitung zu Fasern prinzipiell geeignet ist.

**Tab. 2.3:** Bereiche der Massenanteile der Oxide von Basaltfasern für die Endlosfaserherstellung (Roving), mit Änderungen entnommen aus [12]

Bereich	Massenanteile der Oxide in [%]							
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{TiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$
<b>Minimum</b>	47,5	14,0	7,0	7,0	3,0	0,5	2,5	0,5
<b>Maximum</b>	55,0	20,0	13,5	11,0	8,5	2,0	7,5	2,5

Die Herstellung der Basaltendlosfasern geschieht im Anschluss an die Schmelze der Basaltsteine in einem Spinnprozess. Als Produkt dieses entstehen mehrere hundert Monofilamente, die die Rovings bilden. Nur mit einem hohen Anteil an Siliziumdioxid, wie in Tabelle 2.1 ersichtlich, ist es möglich die Basaltsteine rückstandsfrei zu schmelzen, sowie eine für die Faserbildung ausreichende Viskosität zu erhalten. Die Herstellung von Basaltfasern lässt sich grob in folgende Bereiche unterteilen: Aufbereitung der Rohstoffe, Schmelzen der Steine bei 1450°C, Homogenisieren der Schmelze, das Spinnen der Fasern bei 1350 - 1420°C und schließlich das Abkühlen und Auftragen der Schlichte [13]. Nähere Informationen zur Herstellung der Basaltfasern können in [11], [13] nachgelesen werden. Das Auftragen der Schlichte ist ein sehr wichtiger Punkt, um die guten mechanischen Eigenschaften von Basaltfasern zu erhalten und wird daher eigens in Kapitel 4 in Zusammenhang mit der Tränkung behandelt.

Basalt ist in seiner ursprünglichen Form als Gestein nicht flexibel oder elastisch. Bevor es plastische Eigenschaften aufweist, zerbricht es bei Raumtemperatur. Hingegen weisen Basaltfasern bis zu einem gewissen Grad gute elastische Eigenschaften auf. Verantwortlich dafür sind die geringen Faserdurchmesser, in der Regel zwischen 9 und 12  $\mu\text{m}$ , sowie das nicht Vorhandensein kristalliner Bereiche und dem Einsatz der Schlichte. Unter mechanischer Beanspruchung brechen sie jedoch leicht, weshalb sie bei Verarbeitungsprozessen wie dem Weben oder Stricken sorgfältig behandelt werden müssen [13]. Die mechanischen Eigenschaften sind in Tabelle 2.4 zusammengefasst. Zum Vergleich werden äquivalente Kennwerte für Glasfasern angegeben.

**Tab. 2.4:** mechanische Eigenschaften der Basalt- und Glasfasern, Werte entnommen aus [2]

Parameter	Basaltfaser	Glasfaser
Dichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	2,6	2,7
E-Modul [GPa]	64 ... 89	21 ... 74
Zugfestigkeit [MPa]	990 ... 4800	1300 ... 2000
Bruchdehnung [%]	1,5 ... 3,2	2,0 ... 4,3

Weiters sind Basaltfasern sehr hitzebeständig. Sie sind nicht brennbar und schmelzen erst ab Temperaturen zwischen 1350 - 1450°C. Im Vergleich dazu sind synthetische Fasern aus natürlichen Polymeren brennbar, und schmelzen beziehungsweise zersetzen sich bereits ab Temperaturen über 300°C [13]. Neben diesen besseren chemischen und mechanischen Eigenschaften bieten sich Basaltfasern auch deshalb zum Einsatz faserverstärkten Verbundkunststoffen an, da sie auf Grund ihres natürlichen Ursprungs nachhaltiger sind. Bereits seit einiger Zeit werden Basaltfasern in unterschiedlichen Bereichen der Industrie eingesetzt. Beispielsweise als Korrosionsschutzmaterial in der chemischen Industrie, Verschleiß- und Reibungsmaterial in der Automobilindustrie, sowie bei der Temperaturisolierung von Autokatalysatoren und auch im Brandschutz [14]. Im Bausektor werden Basaltfasern schon als Bewehrung in Beton oder nachträgliche Verstärkung angewandt [6]. Wie bereits in vorherigen Kapiteln erwähnt, führt das alkalische Milieu des Betons bei zahlreichen Fasermaterialien zu einer Degradierung der Faser. Dies betrifft auch Basaltfasern. In [15] wurden Carbon-, Glas- und Basaltfasern für einen längeren Zeitraum in Natriumhydroxid gelegt und anschließend

elektronenmikroskopisch untersucht. Eine starke Abnahme des Volumens und der Festigkeit nach 28 Tagen in diesem alkalischen Milieu war für Glas- und Basaltfasern deutlich erkennbar. Einzig Carbonfasern erweisen sich als sehr resistent in dieser alkalischen Umgebung, da nur eine geringe Abnahme des Volumens und der Festigkeit beobachtet wurde. In einer weiteren Untersuchung in [16] wurde deshalb die Oberfläche der Basaltfasern mit Zirconiumoxid behandelt, was dazu führte, dass die Basaltfasern eine gute Resistenz in alkalischer Umgebung aufwiesen. Dies ist insbesondere für die Verwendung als Bewehrung in Beton von Bedeutung.

### 2.2.3 Begrifflichkeiten

#### Textile Faserstoffe:

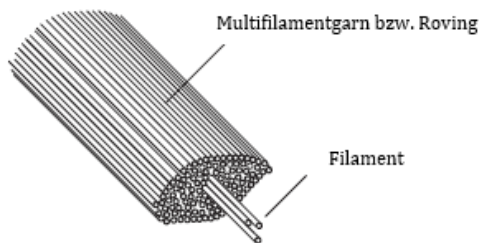
Wie bereits beschrieben umfasst der Begriff textile Fasern eine Vielzahl unterschiedlicher Materialien, die nach Abbildung 2.1 kategorisiert werden können. Diese linienförmigen Gebilde stellen die Grundlage zur Bildung von Garnen, Vliesstoffen und Flächengebilden dar [9].

#### Filamente:

Textile Fasern lassen sich weiters in Spinnfasern und Endlosfasern unterteilen. In ihrer Länge begrenzte Fasern nennt man Spinnfasern. Dazu zählen Naturfasern und auf eine gewünschte Stapellänge geschnittene Fasern, sowie gerissene Endlosfasern. Als Endlosfasern beziehungsweise Filamente werden Fasern, praktisch unbegrenzter Länge bezeichnet. Als Filamente bezeichnet man in der Praxis Endlosfasern ab einer Mindestlänge von 1000 mm. Alle Chemiefasern werden als Filamente bezeichnet, es sei denn sie sind auf eine Stapellänge zugeschnitten [9].

#### Roving:

Der Begriff Roving bezeichnet ein Bündel aus einer Vielzahl unverdrehter Filamente. Der Begriff Multifilamentgarn wird synonym verwendet. Allerdings hat sich im Bereich des Textilbetons der Begriff Roving (zu Deutsch: Faserbündel) durchgesetzt. Zur Konkretisierung der Rovinggröße finden in der Literatur weitere Begriffe Einklang. Bis einschließlich 24.000 Filamenten werden Garne als „low tow“ bezeichnet. Ab 50.000 Filamenten spricht man von „heavy tow“ [8]. In der vorliegenden Arbeit wird lediglich der Begriff Roving verwendet. In Abbildung 2.2 werden die Begrifflichkeiten, Filamente und Roving veranschaulicht.



**Abb. 2.2:** Multifilamentgarn bzw. Roving, mit Änderungen entnommen aus [8]

**Feinheit  $f$  [tex]:** Ein aus der Textiltechnik üblicher Begriff ist für die Anwendung von textiler Bewehrung essenziell. Im Gegensatz zur Stahlbewehrung lassen sich Rovings nicht durch die Angabe eines Durchmessers definieren, da Inhomogenitäten und undefinierte Hohlräume über die Rovinglänge die Querschnittsgeometrie bestimmen. Inhomogenitäten äußern sich

beispielsweise durch einen unrunder Rovingquerschnitt, der zudem über die Faserlänge nicht konstant ist. Somit ist es also sehr unpraktikabel den Querschnitt des Rovings als Bezugsgröße zur Bestimmung der Feinheit der Faser zu nutzen. Um dennoch eine Aussage über die Feinheit der Faser treffen zu können wird das Verhältnis von Masse zu Länge als Bezugsgröße definiert. Die Feinheit der Faser wird dann in der Einheit tex angegeben. Wie in Formel 2.1 ersichtlich definiert ein tex das Fasergewicht in Gramm pro 1000 m Länge [9].

$$1 [\text{tex}] = \frac{1 [\text{g}]}{1000 [\text{m}]} \quad (2.1)$$

Im Bauwesen wird üblicherweise dennoch, die Querschnittsfläche zur Angabe der Bewehrungsgröße genutzt. Die Querschnittsfläche eines Rovings ergibt sich durch Division mit der Dichte  $\rho$  des Materials, siehe dazu Formel 2.2.

$$a_{\text{tex}} [\text{mm}^2] = \frac{f [\text{tex}] * 10^{-3}}{\rho_F [\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}]} \quad (2.2)$$

Ein Basaltfaserroving mit zum Beispiel der Feinheit 800 tex und der Dichte  $\rho = 2,8 \text{ g/cm}^3$  [14] hat demnach eine Querschnittsfläche von  $a_{\text{tex}} = 800 [\text{tex}] / 2,8 [\text{g/cm}^3] \times 10^{-3} \approx 0,28 \text{ mm}^2$ .

## 2.2.4 Anforderungen an Fasern und textile Bewehrungsstrukturen

In diesem Abschnitt werden zunächst Voraussetzungen eines Fasermaterials beschrieben, um als Bewehrung in Beton angewandt werden zu können. Anschließend werden baupraktische und wirtschaftliche Anforderungen erläutert, die für eine textile Bewehrungsstruktur von Bedeutung sind.

Zur Anwendung eines Fasermaterials als Bewehrung in Beton werden die in [8] dargestellten Voraussetzungen im Folgenden zusammengefasst:

- Um eine gewisse Dauerhaftigkeit gewährleisten zu können, müssen die Fasern dem alkalischen Milieu des Betons standhalten. Wie bereits in Kapitel 2.1.1 beschrieben, wird dafür je nach Art der Faser die Zementart ausgewählt.
- Zur Applizierung möglichst weniger Bewehrungslagen sollte eine Bewehrungslage eine hohe Tragfähigkeit aufweisen. Im Umkehrschluss bedeutet das wiederum, dass die Fasern eine hohe Zugfestigkeit besitzen müssen. Als untere Schranke kann die Zugfestigkeit des Stahlbetons mit  $550 \text{ N/mm}^2$  herangezogen werden.
- Gute Verbundeigenschaften zwischen Betonmatrix und Bewehrung sind essenziell zur Einleitung von Kräften. Kurze Lasteinleitungslängen sind dabei vorteilhaft. Durch Tränkung der Fasern wird die Verbundwirkung erhöht.
- Im Grenzzustand der Tragfähigkeit sollte der Textilbeton ein ausreichendes Verformungsvermögen aufweisen, damit auch weiterhin die Umlagerung von Spannungen in Folge von Steifigkeitsänderungen bei Rissbildung statisch unbestimmter Tragwerke möglich ist. Für das Fasermaterial bedeutet das, eine Bruchdehnung gleich wie der Bewehrungsstahl also größer als 25‰ (normalduktile) bzw. 50‰ (hochduktile) aufzuweisen.
- Bestimmte Grenzwerte hinsichtlich der Verformung eines Bauteils dürfen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit nicht überschritten werden. Da bei Erhöhung

der Tragfähigkeit auch die Gebrauchslast ansteigt, die zulässigen Verformungen hingegen nicht, muss ein verstärktes Bauteil steifer sein als im unverstärkten Zustand. Für die Verstärkung von Textilbeton wird somit eine hohe Dehnsteifigkeit der Fasern, also ein hoher Elastizitätsmodul gefordert.

- Um eine lange Lebenszeit des Bauteils zu gewährleisten, ergeben sich je nach Lasteinleitungsdauer und Häufigkeit, Anforderungen an die Dauerstandsfestigkeit denen eine textile Bewehrung gerecht werden muss. Eine entsprechende Ermüdungsfestigkeit der Fasern muss ebenso vorhanden sein, wenn es sich um vorwiegend nicht ruhende Beanspruchung handelt.

Bisher sind Kohlenstoff- und Glasfasern für den Einsatz im Textilbetonbau am besten erforscht. Dennoch sind Basalt- und Aramidfasern als potenziell leistungsfähige Fasern zu nennen.

Neben den physikalisch-chemischen Anforderungen an die Fasermaterialien spielen zur weiteren Herstellung von textilen Bewehrungsstrukturen auch baupraktische und wirtschaftliche Aspekte eine Rolle, die im Folgenden, unter Anlehnung an [6], zusammengefasst werden:

- Das Einbinden der fertigen gitterförmigen Bewehrungsstruktur in die Betonmatrix muss mit den rheologischen Eigenschaften des Betons abgestimmt sein. Wichtige Parameter spielen dabei unter anderem das Größtkorn sowie der Bewehrungsgrad, welcher einen Wert von 5% nicht überschreiten sollte.
- Beim Einlegen in die Bewehrungsstruktur ist darauf zu achten, dass diese in gestreckter und gespannter Lage eingebunden wird, um das Auftreten von Umlenk- und Spaltzugkräften zu vermeiden [8].
- Auf eine ausreichende Widerstandsfähigkeit der textilen Bewehrungsstruktur ist zu achten, um einen reibungslosen Transport und Einbau zu gewährleisten.
- Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit spielen die Anschaffungskosten eine Rolle. Zum einen ist hierbei ein Vergleich zwischen Stahlbewehrung und der Fasern unter sich von Interesse. Kosten für die Stahlbewehrung werden in €/kg angegeben. Für Textilfaserbewehrung wäre so eine Angabe auf Grund des Dichteunterschieds und der abweichenden Langzeiteigenschaften kein guter Vergleichswert. In [6] wird versucht mittels einer aufnehmbaren Zugkraft einen Vergleichsparameter zu finden. Ergebnisse sind in Tabelle 2.5 in [6] ersichtlich. Vergleicht man beispielsweise eine Mattenbewehrung aus Carbonfasern mit einer aus Stahl ist ein Preisunterschied von acht Euro pro m<sup>2</sup> erkennbar. Jedoch ist die Zugfestigkeit der Carbonfaserbewehrung mit 2200 N/mm<sup>2</sup> um circa das Vierfache höher als jene aus Stahl.

## 2.2.5 Herstellung textiler Flächengebilde

Dieses Kapitel soll einen groben Überblick der Prozesskette eines Roving zu einem einsatzfähigen zweidimensionalen textilen Flächengebilde darstellen. Einzelne Schritte, die besonders relevant für diese Arbeit sind, wie beispielsweise das Herstellungsverfahren mittels Stickerei und die Tränkung des Flächengebildes, werden dann basierend auf dieser Grundlage in den nachfolgenden Kapiteln detailliert beschrieben. Eine gesamte Übersicht der textilen Prozesskette zur Herstellung textiler Bewehrung ist zum Beispiel in [9] und [17] finden. Als Ausgangsmaterial dient ein Roving, der durch unterschiedliche Herstellungsverfahren, beispielsweise Weben, Sticken, Stricken oder Wirken in ein Flächengebilde bzw. eine räumliche Konstruktion weiterverarbeitet wird. Anschließend kommt es zur Ausrüstung bzw. der Veredelung und schlussendlich zum Preforming bzw. der Konfektionierung. Als **Flächengebilde** werden



zweidimensionale Gelege, Gewebe, Gewirke, Gestricke, Gesticke sowie Geflechte und Vliesstoffe definiert. Hauptsächlich werden textile Bewehrungen auf Textilmaschinen hergestellt, welche auf der Lege- und Kettenwirktechnik basieren. In diesen Maschinen können Bi-, Tri-, und Multiaxialgelege hergestellt werden. Die Orientierung der Rovings folgt dabei definierten Richtungen. Die Richtung  $0^\circ$  wird als Kett- oder Längsrichtung bezeichnet, siehe dazu Abbildung 2.3 rechts. Eine Anordnung der Rovinge in einer Richtung von  $\pm 45^\circ$  oder  $90^\circ$  wird als Quer- oder Schussrichtung bezeichnet, dies ist im linken Bild der Abbildung 2.3 ersichtlich. Zunächst befinden sich die Rovinge auf einem Spulengatter, von welchem sie kontinuierlich abgewickelt werden. Am Schussfadenleger werden die Rovings dann umgelenkt, wo ihnen als nächstes Rovings in Längsrichtung, welche sich auf einem separaten Gatter befinden zugeführt werden. Das dadurch entstandene Gelege wird mit Hilfe eines Maschenfadensystems (Wirkfaden) fixiert [17]. Herstellungsverfahren räumlicher Konstruktionen werden hier nicht weiter thematisiert, da diese nicht Teil der Arbeit sind. Für weitere Informationen dazu wird auf [9] verwiesen.



**Abb. 2.3:** Kettenwirkmaschine. Links: Rovings orientiert in Schussrichtung, Rechts: Rovings orientiert in Ketttrichtung, entnommen aus [17]

Zur Verstärkung der hergestellten Gelege, und zur Verbesserung der Verbundeigenschaften zwischen Roving und Betonmatrix werden diese in der Regel in einem weiteren Schritt getränkt. Dabei kommen bestimmte Tränkungsmaterialien, siehe Kapitel 4, zum Einsatz. Dieser Materialauftrag wird auch als **Ausrüstungs- bzw. Veredelungsprozess** bezeichnet. Hierbei kommen hauptsächlich nasschemische Verfahren mit unterschiedlichen Prozessmöglichkeiten zum Einsatz. Grundsätzlich ist die Wahl eines geeigneten Prozessverfahrens von der Faser und der Viskosität der Trängung abhängig. Beim sogenannten Ausziehverfahren saugen die textilen Fasern das Trängungsmaterial auf Grund der Faseraffinität auf. Eine andere Möglichkeit ist das Aufstreichen des Trängungsmaterials, welches im Beschichtungsverfahren zur Anwendung kommt. In Kapitel 4 wird das Imprägnierverfahren genauer vorgestellt, da so auch die in dieser Arbeit verwendeten Basaltfasern mit einer Tauch-Quetsch-Einrichtung, einem Foulard, durchtränkt wurden. Schließlich bezeichnen die Begriffe **Preforming und Konfektionierung** die Arbeiten, welche notwendig sind um die finale Form und Größe des textilen Flächengebildes zu erhalten. In weiteren Fügearbeiten werden die unterschiedlichen Formbewehrungen, wenn erforderlich, miteinander verbunden. Anschließend werden die textilen Bewehrungsstrukturen verpackt [6].

## 3 Sticktechnologie

Zu Beginn dieses Kapitels wird ein kurzer Einblick in die in Vorarlberg beheimatete Textilindustrie gegeben. Hierbei wird dem Leser auch ein grober Überblick über die Anwendungen der technischen Textilstickereien aufgezeigt. Ebenfalls werden die Anfänge der gestickten Textilbewehrung zur Verwendung in Betonbauteilen an der Universität Innsbruck erwähnt. Anschließend wird das sticktechnologische Tailored-Fibre-Placement-Verfahren, basierend auf den Ausführungen in [6] vorgestellt, mit dem auch die in dieser Arbeit verwendeten Basaltfasern zu textiler Bewehrung verarbeitet wurden. Unter anderem wird hierbei die Methodik einer Einkopf- und Mehrkopfstickmaschine, sowie das Soutache-Schiffchen-Stickverfahren vorgestellt. Abschließend werden Vorteile der TFP-Technologie zu anderen marktüblichen Herstellungsverfahren textiler Bewehrung dargelegt.

### 3.1 Allgemeines

Die Technik des Stickens existiert schon seit einigen Jahrhunderten. Sie gehört zu den ältesten textilen Herstellungsverfahren. Das Bundesland Vorarlberg in Österreich hatte bereits vor über 250 Jahren die ersten industriellen Berührungspunkte mit dieser Technik. Im Laufe der Zeit haben sich dort zahlreiche Unternehmen angesiedelt, die sich diesem textilen Herstellungsverfahren widmeten. Bis heute zählt Vorarlberg zu den Kerngebieten der heimischen Textilindustrie, aber im Laufe der Zeit hat sich auch diese Branche verändert. Basierend auf dem traditionellen Handwerk hat sich die technische Textilstickerei entwickelt [18]. Das Anwendungsgebiet der technischen Stickerei ist groß und hat in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte gemacht, welche weit über die traditionelle Dekoration von beispielsweise Kleidungsstücken hinaus geht. Aktuelle Forschungen untersuchen die Einsatzfähigkeit von technischer Textilstickerei mit integrierter Sensorik zur Früherkennung diabetischer Folgeerkrankungen [19]. In der Automobilindustrie kommen gestickte Textilien bereits bei unterschiedlichen Komponenten des Fahrwerks wie Felgen oder der äußeren Hülle zum Einsatz. Auch die Herstellung von „smarter“ Bekleidung ist durch eingebettete Sensorik in textilen Stickereien möglich [20]. Im Sport, beispielsweise zur Herstellung von Wintersportausrüstung werden bereits gestickte Textilien eingesetzt [21]. Im Betonbau kommt Bewehrung aus gestickten Textilien zum Einsatz. Die Herstellung textiler Bewehrungselemente mittels der Stickerei wurde an der Universität Innsbruck mit Partnern der Textilindustrie in Vorarlberg bereits vor einigen Jahren erforscht [6]. Basierend darauf wurde zum ersten Mal gestickte Textilbewehrung für die Sanierung der Krumbachbrücke in Vorarlberg eingesetzt [22]. Die Stickerei bietet im Vergleich zu marktüblichen Herstellungsmethoden textiler Bewehrung, wie dem Weben, dem Stricken, dem Flechten und dem Wirken die Möglichkeit einer lastfallgerechten Ausrichtung der Fasern. In Bauteilen können sich je nach Anwendung komplexe Spannungszustände ergeben. Diese Anforderung kann mittels dem Tailored-Fibre-Placement Verfahren, einer Weiterentwicklung der textiltechnologischen Stickerei begegnet werden. Auf Grund der hohen Flexibilität des Stickprozess kann eine ideale Ausrichtung der Faserrichtung sowie lokal unterschiedlicher Fasermengen gewährleistet werden.

## 3.2 Tailored-Fibre-Placement (TFP)

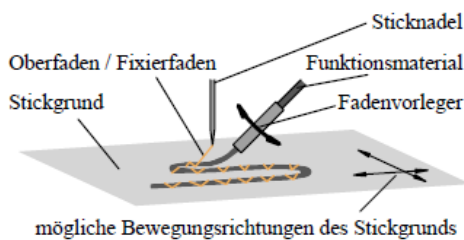
Basierend auf den ausführlichen Erläuterungen in [6] wird das Tailored-Fiber-Placement-Verfahren vorgestellt. Das TFP basiert auf dem Grundprinzip des Stickens. An einem Sonderstickkopf ist dabei das Funktionsmaterial, zum Beispiel der Basaltroving, und die Sticknadel befestigt. Auf einen ebenen Stickgrund, beispielsweise bestehend aus dünnen Vliesen, Glasgewebe oder Kohlenstofffasergewebe, wird das Funktionsmaterial mit einem sogenannten Ober- oder Fixierfaden befestigt. Im Gegensatz zu der herkömmlichen Stickmethode ist hierbei zur Führung des Funktionsmaterials ein Fadenvorleger in dem Stickkopf integriert. Um ein Anstechen des Funktionsmaterials zu verhindern, bewegt sich der Fadenvorleger in einer Pendelbewegung neben der Sticknadel. Der verwendete Stickgrund lässt sich je nach Maschinenhersteller in vertikaler oder horizontaler Lage aufspannen. Eine Prinzipskizze des TFP-Verfahrens ist in Abbildung 3.1 ersichtlich. Durch die gezielte Bewegung des Stickgrunds ergibt sich das gewünschte Stickmuster. Die Maschinen werden dabei vollständig elektronisch gesteuert. Mittels einer auf CAD-basierten technischen Zeichnung wird eine Abfolge der Materialablage erstellt und automatisch in Steuerungsdaten für die Stickmaschine konvertiert. Die Größe des Stickmusters ist abhängig von der Größe der Maschine und jene des Stickgrunds. Beachtet man, dass jeder Roving an einer Nadel geführt werden muss, ist die Produktionsgeschwindigkeit maßgeblich von der Anzahl der Nadeln abhängig. Für eine Produktion in industriellem Maßstab sind Maschinenanlagen mit mehreren Nadelreihen, sogenannte Mehrkopfstickmaschinen oder Soutache-Schiffchen-Stickmaschinen Standard. Mehrkopfstickmaschinen unterscheiden sich in der Funktionsweise nicht von Einkopfstickmaschinen. Der Stickgrund befindet sich bei beiden in horizontaler Lage. Erstere besitzen lediglich mehrere Stickköpfe, wodurch die Produktionsgeschwindigkeit erheblich erhöht werden kann. Auch das Stickfeld kann bei Verwendung einer TFP-Mehrkopfstickmaschine deutlich größer ausfallen. Abbildung 3.2 zeigt eine Mehrkopfstickmaschine der Firma ZSK Stickmaschinen GmbH. Hingegen befindet sich bei der Soutache-Schiffchen-Stickmaschine der Stickgrund in vertikaler Ebene. Die Funktionsweise ist aber auch hier sehr ähnlich zu jener der TFP-Mehrkopfstickmaschine. Ähnlich wie bei der Mehrkopfstickmaschine, wird das Funktionsmaterial, mit mehreren Stickköpfen auf dem Stickgrund befestigt. Unterschiedlich ist jedoch die Tatsache, dass sich der Stickkopf bei der Soutache-Schiffchen-Stickmethode bei einer Kurve mitdreht, was eine flachere Roving-Ablage ermöglicht. Weiters sind bei dieser Maschinenanlage Abmessungen bis zu 30m möglich. Sowohl bei der Soutache-Schiffchen-Stickmethode als auch bei der Ein- bzw. Mehrkopfstickmaschine, gibt es keine zusätzlichen Nadeln zur Befestigung des Knotenfadens. Dieser wird ebenfalls mit den TFP-Stickköpfen gesetzt. Der Knotenfaden wird nach Applizierung des Funktionsmaterials auf dem Stickgrund zur Verstickung der Kreuzungspunkte benötigt. Um den Faden nicht an jedem Kreuzungspunkt abzuschneiden, wird der Knotenfaden bis zum nächsten Kreuzungspunkt eingestickt. Die Wahl der Knotenform ist frei wählbar und kann beispielsweise sternförmig ausgeführt werden. Die Darstellung eines biaxialen Flächengebildes mit den jeweiligen Bezeichnungen des Fixier- und Knotenfadens ist im linken Bild der Abbildung 3.3 ersichtlich. Das rechte Bild zeigt im Verwendungsfall einer Soutache-Schiffchen-Stickmaschine die Nadeln zur Befestigung des Knotenfadens. Das grundlegende Prinzip des Tailored-Fiber-Placement-Verfahrens, wie anfänglich beschrieben, ist jedoch bei allen drei Ausführungsvarianten gleich. Ebenso ist es möglich mit den genannten drei Varianten ebene bzw. gekrümmte 2D- und 3D-Bewehrungsstrukturen zu fertigen. Das Funktionsmaterial wird dabei immer in der x-y-Ebene des Stickgrunds aufgestickt. Zur Realisierung dreidimensionaler Bewehrungsstrukturen kommen für den Fixierfaden Materialien zum Einsatz, die im anschließenden Tränkungsprozess thermisch



oder chemisch zerstört werden können, damit das spätere Aufklappen der Struktur möglich ist [6].

Verglichen mit anderen textilen Fertigungstechniken ergeben sich für die TFP-Technologie folgende Vorteile [6]:

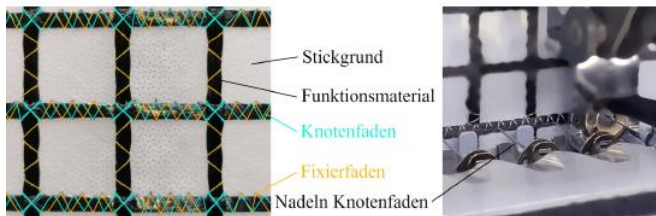
- Die Ablage des Funktionsmaterials ist winkelnunabhängig
- Herstellung von zwei- und dreidimensionaler textiler Bewehrung, wobei der Fixierfaden je nach Beanspruchung in x-, y- und z-Richtung ausgerichtet sein kann
- Die Anhäufung von Fasermaterial kann durch belastungsorientierte Funktionsmaterialablage vermieden werden
- Zur Einsparung von Material und Reduktion von Abfall erfolgt die Fertigung endkonturnah
- Problemlose Verarbeitung unterschiedlichster Funktionsmaterialien möglich



**Abb. 3.1:** Prinzipskizze des TFP-Verfahrens, entnommen aus [6]



**Abb. 3.2:** Mehrkopfstickmaschine, entnommen aus [23] (Quelle: ZSK Stickmaschinen)



**Abb. 3.3:** Befestigung des Funktionsmaterials am Stickgrund, entnommen aus [6]. Links: Bezeichnung von Fixier- und Knotenfäden am biaxialen Flächengelege. Rechts: Befestigung des Knotenfadens mit Nadeln am Stickgrund im Fall einer Soutache-Schiffchen-Stickmaschine

Im Anschluss an den Stickprozess wird der Stickgrund in der Regel chemisch oder thermisch zerstört. Übrig bleibt eine an den Knotenpunkten befestigte Bewehrungsstruktur, die in Abhängigkeit der Materialwahl eine hohe Formstabilität aufweist oder flexibel ist [6]. Schließlich kann die textile Bewehrungsstruktur getränkt werden.

## 4 Tränkung textiler Bewehrungsstrukturen

Dieses Kapitel umfasst alle Themenbereiche der Tränkung von textilen Bewehrungsstrukturen. Zu Beginn werden allgemeine Aspekte zur Tränkung genannt, um die Sinnhaftigkeit der Tränkung zu verstehen. Diesbezüglich wird das Verbundverhalten zwischen Faser und Beton dargestellt, und welche Eigenschaften durch eine Tränkung verbessert werden können. Um in weiterer Folge die im Zusammenhang mit der Tränkung häufig verwendeten Begriffe voneinander differenzieren zu können, werden diese erläutert. Im nachfolgenden Unterkapitel liegt der Fokus auf die zur Anwendung kommenden Tränkungsmittel. Hierbei werden zunächst zwei nicht biogene Tränkungsmittel vorgestellt. Anschließend daran werden Ergebnisse zweier Publikationen zusammengefasst, bei denen diese konventionellen Tränkungsmittel zur Imprägnierung textiler Bewehrung zum Einsatz kamen. Hauptaugenmerk dieses Kapitels liegt in weiterer Folge jedoch auf der Wiedergabe des aktuellen Stand der Forschung bezüglich biogener Tränkungsmittel. Hierin wird dem Leser ein Einblick in unterschiedliche Forschungsergebnisse gegeben, bei welchen experimentelle Untersuchungen die Auswirkungen der biogenen Tränkungsmittel auf die textile Bewehrungsstrukturen thematisierten. Da die Zusammensetzung biogener Tränkungsmittel oft Firmengeheimnissen unterliegt, wurde in weiterer Folge versucht darzulegen, wie dennoch die Wahl eines Tränkungsmittels bezüglich eines bestimmten Fasertyps erfolgt. Dies wird nach Wiedergabe allgemeiner Anforderungen an Tränkungsmittel erläutert. Abschließend wird das Verfahren beschrieben, mit welchem auch die in dieser Arbeit verwendeten Basaltfasern getränkt wurden.

### 4.1 Allgemeines zur Tränkung

Rovings bestehen aus einer Vielzahl von Einzelfilamenten. Auf Grund des geringen Durchmessers der Fasern entstehen innerhalb des Roving sehr kleine Zwischenräume von wenigen Mikrometern. Selbst die feinsten Betonpartikel können in diese Zwischenräume nicht eindringen. Bei Bewehrung aus gebündelten Fasern bedeutet das, dass lediglich die äußeren Filamente, auch Randfasern genannt, in direktem Kontakt zur Betonmatrix stehen. Unter Zugbeanspruchung tragen die inneren Filamente, also die Kernfasern, somit nicht oder nur in geringem Ausmaße über Reibung zur Lastabtragung bei.

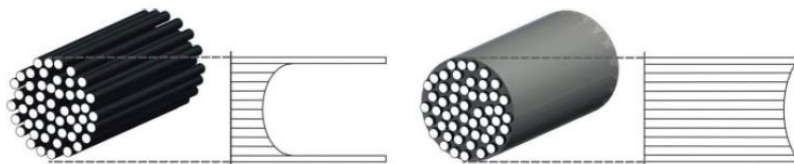
Die unterschiedlichen Verbundeigenschaften von Kern- und Randfasern führen dazu, dass diese verschieden stark beansprucht werden. Das wiederum führt zu folgenden Effekten [8]:

- Auf Grund des guten Verbundes der Randfasern zu der Betonmatrix sind die Dehnungen und Spannungen dort wesentlich höher als in den Kernfasern. Versagen tritt also zuerst in den Randfasern auf, was wiederum ein Versagen des gesamten Roving einleiten kann. Folglich wird die Tragfähigkeit des Roving nur zu einem Teil ausgenutzt.
- Für praktische Anwendungen werden kurze Lasteinleitungslängen bevorzugt. Jedoch führen die schlechten Verbundeigenschaften der inneren Filamente zu großen Lasteinleitungslängen.

- Mit zunehmender Faserfeinheit nimmt die Querschnittsfläche des Roving quadratisch zu, während der Umfang nur linear zunimmt. Das bedeutet, die Festigkeiten verschlechtern sich, da der Anteil der Kernfasern steigt und somit auch die Lasteinleitungslängen größer werden.

Der Verbund zwischen Betonmatrix und Bewehrung ist in der Regel nicht ausreichend, um textile Bewehrung wirtschaftlich einzusetzen. Versuche zur möglichen Verbesserung des Verbundes wurden zum Beispiel an der RWTH Aachen bereits vor einigen Jahren durchgeführt [24]. Hierbei konnte gezeigt werden, dass durch das Tränken der Fasern, der innere Verbund zwischen den einzelnen Filamenten deutlich verbessert wurde. Durch das Tränken werden die inneren Fasern bei der Lastabtragung mitbeansprucht. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Dies äußert sich beispielsweise in einer erhöhten Bruchspannung und in kleineren Rissabständen und -breiten [2]. Mittlerweile sind getränkte textile Bewehrungsfasern Stand der Technik.

Mit dem Tränken der textilen Bewehrungsstrukturen können Verbundeigenschaften zwischen den einzelnen Filamenten und zwischen den Filamenten und der Betonmatrix verbessert werden [2]. Neben dem Verbundverhalten lassen sich auch die Festigkeit und die Handhabung textiler Strukturen gezielt beeinflussen. Je nach Art der Anwendung können auch Flexibilität und Drapierfähigkeit beeinflusst werden [8].



**Abb. 4.1:** Spannungs-Dehnungsverteilung im Roving, (links) ohne Tränkung und (rechts) vollständig getränkt. Entnommen aus [17]

Neben der Entwicklung geeigneter Materialien zur Tränkung stellt auch die Wahl des richtigen Mittels eine komplexe Aufgabe dar. Dies wird in Kapitel 4.2.3 näher beleuchtet. Auch eine Abstimmung des gewählten Tränkungsmittel mit der erforderlichen primären Beschichtung der Filamente, der sogenannten Schlichte, ist von Bedeutung.

#### 4.1.1 Begrifflichkeiten

Im Zusammenhang mit der Tränkung textiler Bewehrungsstrukturen stehen Begriffe, die in der Literatur nicht einheitlich verwendet werden. Da dies immer wieder zu Verwechslung führt, werden zunächst einige in diesem Zusammenhang wichtige Begriffe erläutert und klar definiert. In Klammern wird der englische Begriff genannt.

##### **Schlichte (sizing agent):**

Als Schlichte wird die Beschichtung der einzelnen Fasern bezeichnet. Dies geschieht während der Garnherstellung allerdings noch vor der Faserbündelung. Wobei Garn hier ein allgemeiner Begriff für aus textilen Fasern bestehende endlose Stränge ist. Das Auftragen der Schlichte ist wesentlich für die Reibeigenschaften der Filamente untereinander sowie bei der Verarbeitung der Rovings in der Textilmaschine, da dadurch der Zusammenhalt der Filamente verbessert und der Abrieb

durch die hohen Geschwindigkeiten in der Kettenwirkmaschine verringert wird. Des Weiteren werden durch das Auftragen der Schlichte mikroskopische Defekte an der Faseroberfläche abgedeckt, was für die Festigkeit der Fasern eine wichtige Rolle spielt [2], [8]. Schlichte werden in Abhängigkeit der gewählten Faser ausgesucht. Eine genaue Zusammensetzung speziell für Basaltfasern konnte nicht in Erfahrung gebracht werden, da diese oft Firmengeheimnissen der Faserhersteller unterliegt. Wesentliche Bestandteile, die Schichten generell aufweisen sollten, können jedoch aus [2] entnommen werden:

- Filmbildner zum Schutz der Filamente
- Gleitmittel zur Reduktion der Scheuerwirkung zwischen den Fasern
- Antistatika zur Vermeidung elektrostatischer Aufladungen
- Haftvermittler zur Verbesserung des Verbundes zwischen Faser und Harzmatrix

In [9] werden Schichten für Glas- und Carbonfasern genannt. Für ersteres werden Schichten verwendet, die Silanhaftvermittler bestehend aus Trialkoxysilanen besitzen. Für Carbonfasern kommen hauptsächlich Schichten bestehend aus Epoxid und Polyurethan zum Einsatz, da diese auch häufig als Tränkungsmittel für die Fasern eingesetzt werden und somit zwei Phasen mit übereinstimmenden Oberflächeneigenschaften aufeinandertreffen. Oftmals wird für den Begriff der Schlichte auch primäre Beschichtung verwendet.

#### **Beschichtung (coating):**

Die Beschichtung bezeichnet den Prozess des Aufbringens eines bestimmten Tränkungsmittels auf die Oberfläche des Roving. Dieser Begriff wird in Zusammenhang mit der Beschichtung der äußeren Filamente verstanden [8].

#### **Imprägnierung (impregnation):**

In Zusammenhang mit dem Einbringen des Tränkungsmittels in eine textile Struktur wird der Begriff der Imprägnierung verwendet. Von Imprägnierung spricht man wenn die Zwischenräume der Filamente vollständig mit dem Tränkungsmittel ausgefüllt sind. Hierbei bedeutet vollständig, dass keine Luft zwischen den Filamenten verbleibt [8]. Um den Grad der Imprägnierung, also wie vollständig tatsächlich die Hohlräume verfüllt wurden, zu evaluieren, wurden die in dieser Arbeit verwendeten Basaltfaserrovinge elektronenmikroskopisch untersucht. Auswertungen dazu sind in Kapitel 5.2 nachzulesen.

#### **Tränkung:**

Die Realisierung der Imprägnierung erfolgt häufig über Tränkungsprozesse, weshalb auch der Begriff der Tränkung genutzt wird. Als Tränkung kann sowohl die Imprägnierung als auch die Beschichtung bezeichnet sein. Das dabei verwendete Material nennt sich Tränkungsmittel, es wird in der Literatur auch oft als Polymermatrix oder nur Matrix beschrieben. Der Tränkungsprozess bezeichnet den Prozess des Aufbringens beziehungsweise Einbringens dieses Mittels [25].

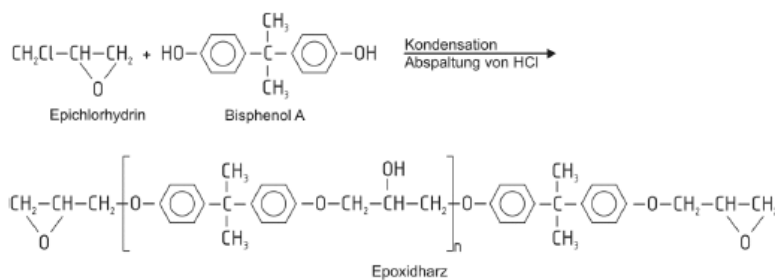
## **4.2 Tränkungsmittel**

Mit den bisher zum Einsatz kommenden nicht biogenen Tränkungsmitteln können gute Ergebnisse erzielt werden hinsichtlich der Tragfähigkeit und der Verbundeigenschaften. Aus Nachhaltigkeitsgründen wird vermehrt an Tränkungsmitteln basierend auf nachwachsenden

Rohstoffen geforscht. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die häufig angewandten Tränkungsmittel Epoxidharz und Styrol-Butadien vorgestellt und einige Forschungsergebnisse diesbezüglich präsentiert. Hauptaugenmerk liegt dann allerdings auf der Darstellung des aktuellen Stands der Forschung bezüglich biogener Tränkungsmittel.

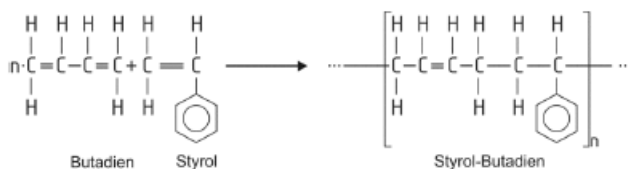
## 4.2.1 Herkömmliche Tränkungsmittel

Bisher wurden zur Tränkung von Textilien hauptsächlich Reaktionsharze wie Epoxidharz oder wässrige Dispersionen wie Styrol-Butadien (SB bzw. SBR = Styrene-Butadiene Rubber) eingesetzt. Ersteres hat sich auf Grund der hervorragenden mechanischen Eigenschaften gegen andere duroplastische Polymere wie Polyester- oder Vinylesterharze durchgesetzt. Epoxidharz ist teuer, weist aber ein gutes Leistungsvermögen auf. Es ist beständig gegen Feuchtigkeitsaufnahme, weist eine hohe Glasübergangstemperatur auf und hat eine hohe Resistenz in korrosiven Medien. Weiters haftet Epoxidharz sehr gut an Fasern und zeigt eine geringe Schrumpfung während des Aushärtungsprozesses. Auf Grund dieser Eigenschaften kommt Epoxidharz in vielen Bereichen der Industrie zum Einsatz, beispielsweise in der Elektrotechnik, im Maschinen-, Flugzeug- und Fahrzeugbau [2]. Die am häufigsten zur Anwendung kommenden Epoxidharze basieren auf Bisphenol A [26]. Dabei reagiert Epichlorhydrin mit Bisphenol A zu einem Epoxidharz, siehe dazu Abbildung 4.2.



**Abb. 4.2:** Chemischer Aufbau des Epoxidharzes basierend auf Bisphenol A, entnommen aus [2]

Ein weiteres häufig zur Anwendung kommendes Tränkungsmittel für Textilfasern ist Styrol-Butadien. In Abbildung 4.3 ist die Reaktion der gummiartigen Butadienteile mit dem Styrol zu sehen. Das Endprodukt Styrol-Butadien weist gute Abriebfestigkeiten sowie je nach Mischungszusammensetzung eine hohe Temperaturbeständigkeit auf, was den breiten Einsatz bei Autoreifen verdeutlicht [2].



**Abb. 4.3:** Strukturelle Zusammensetzung von Styrol-Butadien, entnommen aus [2]

Beide Materialien wurden in [6] und [2] als Tränkungsmittel für Carbon- und oder Glasfaserovinge angewendet, um getränkte Textilien zu erzeugen. Die Ergebnisse aus Verbund-



und Dehnkörperversuchen werden im Folgenden kurz vorgestellt. Anzumerken ist, dass auch die Technologie zur Herstellung der Textilien in diesen beiden Arbeiten unterschiedlich war.

Egger verwendet in seiner Dissertation [6] gestickte Carbonfasern für Textilbewehrung. Dabei wurden unterschiedlichste Größen und Formen, sowie auch 2D- und 3D-Bewehrungen getränkt jeweils mit Epoxidharz und Styrol-Butadien untersucht. Auch Tränkungskombinationen der beiden Mittel und Zusätze wurden im Tränkungsprozess variiert. Um das Tragverhalten gestickter textiler Bewehrungsstrukturen zu untersuchen, wurden Verbund- und Dehnkörperversuche an Betonprobekörpern mit textiler Bewehrung durchgeführt. Ziel dabei war es, die Sticktechnologie auf Eignung zur Herstellung textiler Bewehrungsstrukturen zu überprüfen sowie deren Funktionsweise in Abhängigkeit gewählter Herstellungs- und Materialparameter zu testen. Aus den Verbundversuchen ergaben sich für Proben, deren Tränkungsmittel Epoxidharz enthält, beziehungsweise vollständig aus Epoxidharz bestand deutlich bessere Verbundeigenschaften als jene die mit Styrol-Butadien getränkt waren. Denn im Vergleich zu Letzterem erreichten alle Proben mit Epoxidharz Tränkung einen maximalen Verbundfluss von über 30 N/mm. Auch bei den einaxialen Dehnkörperversuchen konnte für Probekörper mit Epoxidharz getränkten Textilbewehrungen, deutlich höhere Textilspannungen erreicht werden. Das Tragverhalten von 3D-Bewehrungsstrukturen, sowie untersuchte Verstärkungskonzepte für Querkraft- und Torsionsbeanspruchte Plattenbalkenquerschnitte, werden hier nicht wiedergegeben. Es wird auf [6] verwiesen.

In der Dissertation von Kulas [2] wurde das Tragverhalten von getränkter textiler Bewehrung erstmals systematisch untersucht. Dabei wurden Carbon- und Glasfaserrovinge mit Epoxidharz und Styrol-Butadien getränkt. Ziel war es einen Vergleich zu ungetränkten Textilien aufzuzeigen und geeignete Ingenieurmodelle zur Berechnung textiler Betontragwerke zu entwickeln. Neben Verbund- und einaxialen Dehnkörperversuchen wurden weiters auch noch Probekörper auf Biegung und Querkraft untersucht. Nähere Informationen dazu sind in [2] enthalten. Hinsichtlich der Verbundeigenschaften wiesen Proben getränkt mit Styrol-Butadien geringe Verbundspannungen auf. Die höchsten Verbundspannungen wurden mit epoxidharzgetränkten Glastextilien erzielt. Im Zuge der einaxialen Dehnkörperversuche wurde für epoxidharzgetränkte Carbontextilien eine Bruchspannung von bis zu 3300 N/mm<sup>2</sup> erzielt. Im Vergleich dazu wurde bei Probekörpern bewehrt mit Styrol-Butadien getränkten Carbonfasern, ein Maximalwert der Bruchspannung von 2100 N/mm<sup>2</sup> nachgewiesen. Bei den getränkten Glastextilien wurde ein ähnlicher Zusammenhang festgestellt, wenn auch auf niedrigerem Niveau, da Glasfasern eine geringe Bruchspannung aufweisen. Es ist aber festzuhalten, dass auch für die SBR-getränkten Textilien eine wesentlich höhere Bruchspannung als bei ungetränkten Textilien festgestellt wurde [2].

#### **4.2.2 Biogene Tränkungsmittel**

In den letzten Jahren sind Nachhaltigkeit und Umweltschutz immer mehr in den Fokus gerückt. Auch die Bauindustrie muss nachhaltige Technologien und Werkstoffe vorantreiben, um den ökologischen Fußabdruck des Sektors zu verringern. Durch den Einsatz von textilbewehrten Betonbauteilen lassen sich wie bereits erwähnt, schlankere und leichtere Bauteile herstellen, da auf allzu große Betondeckungen verzichtet werden kann. Dennoch besteht auch bei textiler Bewehrung noch Optimierungsbedarf. Auf Grund der hervorragenden mechanischen Eigenschaften hat sich Epoxidharz als Tränkungsmittel durchgesetzt. Der guten Performance des Epoxidharzes steht jedoch die Tatsache gegenüber, dass dies aus fossilen Rohstoffen gewonnen wird, und die Vernetzung der Harze biologisch nicht abbaubar und wieder verarbeitbar ist [3]. Als

alternative Verstärkungsmittel gewinnen biologisch abbaubare, aus natürlichen Ressourcen bestehende Tränkungsmitel immer mehr an Bedeutung. Im Folgenden wird der aktuelle Stand des Wissens zu biogenen Tränkungen anhand einer Zusammenfassung unterschiedlichster bereits veröffentlichter Publikationen wiedergegeben.

Neben einigen grundlegenden Anforderungen an Tränkungsmitel, welche in Abschnitt 4.2.3 dargestellt werden, spielt auch die Oberflächenbeschaffenheit der Faser eine wichtige Rolle bei der Auswahl eines entsprechenden Mittels. Die häufig zur Anwendung kommenden Kohlenstofffasern besitzen zwar ein ausgezeichnetes Verhältnis zwischen mechanischer Leistung und Gewicht, jedoch ist die Haftung einer Polymermatrix an ihrer Oberfläche eher schlecht. Grund dafür ist die hydrophobe, also wasserabweisende Oberflächenbeschaffenheit der Fasern, sowie die Tatsache, dass die Fasern bei Kontakt mit der Matrix chemisch inert reagieren [27]. Viele Forschungsarbeiten beschäftigen sich bei der Modifizierung der Oberflächenbeschaffenheit mit der Beschichtung der Kohlenstofffasern, um die Haftung eines Epoxidharzes zu verbessern. Die Schlichte basiert aber in der Regel auf aggressiven biologisch nicht abbaubaren Chemikalien. Szabó et al. [28] untersuchte alternativ eine Schlichte basierend auf Lignin, zur Verbesserung der Haftung eines biobasierten Epoxidharzes. Als biobasiertes Epoxidharz wird in den kommenden Erläuterungen ein Epoxidharz bezeichnet, welches aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt wird. In [28] wurde hierzu ein Cellulosepropionat verwendet, welches aus Biomasse hergestellt wird. Das als Schlichte der Kohlenstofffasern verwendete Lignin entsteht als Nebenprodukt in der Zellstoffindustrie. Die erfolgreiche Anbindung von Lignin an die Oberfläche der Fasern wurde mittels elektronenmikroskopischen Untersuchungen bestätigt. Die zuverlässige Haftung und die daraus resultierende Grenzflächenscherfestigkeit (IFSS= Interfacial shear strength) der Schlichte an der Faser wurde mit Hilfe eines Fragmentierungstest (Fiber fragmentation test) durchgeführt. Dabei konnte eine Erhöhung der Scherfestigkeit bis zu 28% durch Auftragen der Schlichte erzielt werden. Dabei verglichen wurde die Scherfestigkeit einer Faser ohne Schlichte, einer Faser mit einer biologisch nicht abbaubaren Schlichte, sowie eine Faser mit Lignin als Schlichte. Fasern beschichtet mit Lignin, erzielten eine geringfügig höhere Grenzflächenscherfestigkeit im Vergleich zu Fasern ohne Schlichte und Fasern beschichtet mit einer biologisch nicht abbaubaren Schlichte. Nach Tränkung der mit Schlichte versehenen Carbonfasern in einem konventionellen Epoxidharz, beziehungsweise dem biobasierten Epoxidharz basierend auf Cellulosepropionat, wurde in einem Ausziehtest (microdroplet-test) die Grenzflächenscherfestigkeit zwischen Faser und Matrix bestimmt. Carbonfasern modifiziert mit einer Schlichte bestehend aus biologisch nicht abbaubaren Chemikalien getränkt in Cellulosepropionat wiesen eine Erhöhung der Scherfestigkeit von ungefähr 27% auf, verglichen mit in konventionellem Epoxidharz getränkten Carbonfasern, welche mit einer biologisch nicht nachhaltigen Schlichte versehen waren. Mit Lignin als Schlichte und Cellulosepropionat als Tränkungsmitel konnten etwas geringere, aber sehr ähnliche Ergebnisse erzielt werden [28]. Abschließend lässt sich sagen, dass das Auftragen einer Schlichte essenziell ist, um in weiterer Folge die Kraftübertragung zwischen Matrix und Faser zu gewährleisten. Weiters haben sich Lignin als Schlichte und Cellulosepropionat als Tränkungsmitel als durchaus vielversprechende Mittel erwiesen, die für einen nachhaltigen Einsatz in Verbundwerkstoffen zur Anwendung kommen können.

An der Queen's University in Kanada untersuchten C. McSwiggan und A. Fam die Tauglichkeit von biogen getränkten Glas- und Carbonfaserlaminaten zur nachträglichen Verstärkung von Biegebalken. Hierbei wurden Haftverbundversuche sowie Biegedruckversuche durchgeführt [29]. Als biogene Tränkungsmitel kamen zum einen ein epoxidiertes Kiefernölharzgemisch (epoxidized pine oil resin blend), kurz EP und ein Furfuralkohol (furfural alcohol resin), kurz FA

zum Einsatz. Ersteres wurde als Öl aus Kiefernholz gewonnen. Furfuralkohol wird aus erneuerbaren Ressourcen wie Zuckerrohr und Maiskolben extrahiert. Zur Evaluierung der Tauglichkeit dieser biogenen Tränkungsmitel wurden die Fasern zum Vergleich ebenso mit einem konventionellen Harz getränkt. Zur Bestimmung des Haftverbundes zwischen Faser und Matrix wurden zunächst die stahlbewehrten Betonblöcke in Feldmitte geschlitzt. Durch die Erzeugung dieser Sollbruchstelle sollte ein kontrolliertes Versagen der Verbundfuge zwischen stahlbewehrtem Betonbalken und getränkten Fasern gewährleistet werden. Nach entsprechender Oberflächenbehandlung der Einkerbung wurden die Faserlamine an der Unterseite des Balkens angebracht. Glas- und Carbonfaser Lamine wurden dabei sowohl mit dem Kiefernölharzgemisch als auch dem konventionellen Harz getränkt. Furfuralkohol wurde hingegen nur auf die Carbonfaser Lamine aufgebracht. Die daraus resultierenden Ergebnisse zeigen, dass jene Balken verstärkt mit biogen getränkten Laminen vergleichbare Versagenslasten aufwiesen wie jene mit Laminen, welche mit herkömmlichen Epoxidharz getränkt waren. Mit dem Kiefernölharzgemisch getränkte Carbonfasern wiesen sogar eine höhere Versagenslast auf als die mit herkömmlichen Epoxidharz getränkten Carbonfasern. Glasfasern getränkt mit diesem nachhaltigen Tränkungsmitel wiesen geringfügig schlechtere Versagenswerte auf als jene mit konventionellem Epoxidharz. Zuletzt wiesen Carbonfasern getränkt mit einer Mischung aus Furfuralkohol und konventionellem Epoxidharz die besten Eigenschaften auf. In einem weiteren Versuch wurden die Betonbalken an der Unterseite mit den unterschiedlich getränkten Faserlaminen verstärkt und in einer Vierpunkt-Biegeprüfung getestet. Hierbei zeigen die Ergebnisse vergleichbare beziehungsweise sogar höhere Versagenslasten bei dem Einsatz von biogenen Tränkungsmiteln. Nähere Informationen dazu sind in [29] nachzulesen.

In einer weiteren Publikation untersuchte A. Fam et al. [30] mechanische Eigenschaften von getränkten Glasfaserlaminen. Diese wurden mit zwei Arten eines biogenen Harzes, auf Basis von Furfuralkohol getränkt. Anhand von Zugversuchen an den getränkten Laminen wurde die Bruchfestigkeit und der E-Modul bestimmt und mit Proben, welche mit konventionellem Harz getränkt waren, verglichen. Weiters wurde hierbei auch die Auswirkung eines Katalysators, hinsichtlich der Dosierung und der Aushärtezeit, auf die mechanischen Eigenschaften untersucht. Letztendlich wird die optimale Überlappungslänge zweier Lamine ermittelt, um die maximale Festigkeit zu erreichen. Die Ergebnisse zeigen, dass mittels dem biogenen Tränkungsmitel sowie dem entsprechenden Katalysator und der richtigen Dosierung leicht geringere, aber sehr ähnliche Zugfestigkeiten erreicht werden konnten, wie bei jenen Laminen, die mit Epoxidharz getränkt wurden. Hingegen ist der Einfluss der Dosierung und die Art des Katalysators bezüglich dem E-Modul gering. Es konnte ebenso festgestellt werden, dass nach knapp zwei Wochen die maximale Zugfestigkeit des Verbundwerkstoffs erreicht war [30]. Abschließend ist auch hierbei erkennbar, dass der Einsatz biogener Tränkungsmitel durchaus gerechtfertigt ist.

Auch in der Veröffentlichung von Hofmann et. al [31] wird ersichtlich, dass nachhaltige Tränkungsmitel durchaus eine Alternative zum herkömmlichen Epoxidharz aufweisen. Er verwendete ein biobasiertes Harz welches zum Teil aus Stärkerückständen von beispielsweise Mais und Sojabohnen extrahiert wird. Die Anbindung dieser Moleküle an ein reaktives Mittel bewirkt ein biobasiertes Harz, welches zu 50% aus natürlichen Rohstoffen besteht. Die genaue chemische Aufbereitung des biobasierten Harzes kann in [32] nachgelesen werden. Das entstandene nachhaltige Tränkungsmitel wurde auf Glasfaserlamine gegeben und hinsichtlich mechanischer Eigenschaften durch Zug-, Druck- und Scherversuche evaluiert und die Ergebnisse mit jenen Proben getränkt in konventionellem Harz verglichen. Grundsätzlich ergaben sich auch



hier keine signifikanten Unterschiede. Der E-Modul jener Probe mit biobasiertem Harz war um etwa 6% geringer als mit konventionellem Harz. Die Zugfestigkeiten waren in etwa gleich, und die Bruchdehnung der biobasiert getränkten Glasfaserlaminat war etwa 10% höher als Laminat mit Epoxidharz getränkt. Die Druckfestigkeit der Probe mit biobasiertem Tränkungsmedium wiederum war um etwa 24% höher als jene mit konventionellem Harz. Die Scherfestigkeit wies bei beiden Proben sehr ähnliche Werte auf. Ebenso wurden thermomechanische Untersuchungen durchgeführt. Hierbei wurden nur geringe Unterschiede festgestellt, was den Einsatz dieses biogenen Harzes im Bauwesen rechtfertigt.

In [33] wurden Laminat aus Carbonfasern mit einem konventionellen und einem biobasierten Epoxidharz getränkt. Letzteres wies einen biobasierten Anteil von 31% auf, bestehend aus pflanzlichem Glycerin. Zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften werden Zug-, Druck-, Scher- und Biegeversuche durchgeführt. Die maximale Zugfestigkeit und Druckfestigkeit sowie der Elastizitätsmodul der mit konventionellem Epoxidharz getränkten Proben war geringfügig höher als jene Proben basierend auf dem biobasierten Harz. Hingegen war die Bruchdehnung der biobasiert getränkten Proben höher als jene mit konventionellem Epoxidharz. Auch die Scher- und Biegefestigkeiten wiesen ähnliche Ergebnisse auf beim Einsatz biobasierter und konventioneller Harze.

Eine weitere wichtige Fragestellung in Bezug auf das Aufbringen eines Harzes auf Fasern betrifft die Recyclingfähigkeit. Diesem Kontext widmete sich Jiang et al. [3]. Er untersuchte zunächst die mechanischen Eigenschaften eines neuartigen biobasierten Epoxidharzes, welches auf Basis von Vanillin hergestellt wird. Das Vanillin wurde als Derivat des natürlichen Stoffes Lignin gewonnen. Durch Zugabe eines Aminoalkohols (4-amino-cyclohexanol) und in weiterer Folge Anbindung von Epichlorhydrin entsteht ein auf Vanillin basierendes Epoxidharz. Die genaue Synthese des biobasierten Epoxidharzes kann in [3] nachgelesen werden. Verglichen mit einem herkömmlichen Epoxidharz, wies das biobasierte Epoxidharz eine um 15,8% höhere Zugfestigkeit auf. Auch der Elastizitätsmodul war um knapp 37% höher als jener eines herkömmlichen Epoxidharz. Die Bruchdehnung sowie die Glasübergangstemperatur des biogenen Epoxidharz waren hingegen etwas geringer als jene des konventionellen Epoxidharzes. Bei Aufbringen der biogenen Matrix auf die Carbonfasern, wies der damit erzeugte Verbundwerkstoff exzellente mechanische Eigenschaften auf. Weiters wurde das getränkte Textil hinsichtlich der Recyclingfähigkeit untersucht. Dazu wurde es in einer Salzsäure abgewaschen und anschließend mit entmineralisiertem Wasser gesäubert. In elektronenmikroskopischen Untersuchungen wurde ersichtlich, dass die Oberfläche der recycelten Kohlenstofffasern glatt und ohne Rückstände des Harzes war. In einer Raman Spektroskopie war zudem ersichtlich, dass die chemische Struktur der recycelten Carbonfasern gleich war mit jener der originalen Faser. In Versuchen wurden jedoch geringere Werte hinsichtlich der erreichbaren Zugfestigkeit der recycelten Carbonfasern festgestellt. Insgesamt wurde mit auf Vanillin Basis hergestellten biogenen Epoxidharz aber sehr gute Ergebnisse erzielt, was den Einsatz dieses biogenen Tränkungsmedium durchaus rechtfertigt. Weiters schließt die teilweise Wiederherstellung der Carbonfasern in einem Recyclingprozess, eine Wiederverwendung in Verbundwerkstoffen nicht aus [3].

Neben mechanischen Eigenschaften spielen auch thermische Eigenschaften und die Entflammbarkeit der Matrix-Faser Verbundwerkstoffe eine wichtige Rolle, welche den industriellen Einsatz dieser beeinflussen. In Malaysia untersuchten Hafiezal et al. [34] ein auf pflanzlicher Basis hergestelltes Epoxidharz als Tränkungsmedium für Carbonfasern, und verglichen dies mit einem konventionellen Epoxidharz. Das biogene Epoxidharz wurde aus dem Jatropha Öl

synthetisiert. Jatropha ist eine in den Wäldern Malaysiens häufig vorkommende Pflanzenart. Mittels einer Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie (FT-IR) wurden die chemischen Verbindungen der einzelnen Moleküle des konventionellen und des biogenen Epoxidharzes aufgezeigt, was essenziell ist um die Abbrandeigenschaften zu deuten. Genauere Informationen dazu sind in [34] nachzulesen. Weiters wurden Tests hinsichtlich der thermischen Stabilität der beiden Harze durchgeführt. Bis zu einer Temperatur von 365°C war das biogene Epoxidharz thermisch stabiler als das konventionelle Harz. Ersteres zersetzte sich danach bis zu einer Temperatur von 500°C. Damit einher ging ein Gewichtsverlust von 41%. Hingegen verlor das herkömmliche Epoxidharz lediglich 34% seines Gesamtgewichts. Weiters wurde eine leicht höhere Wärmebeständigkeitstemperatur des konventionellen Harzes festgestellt. Hinsichtlich der Glasübergangstemperatur konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Es wurde jedoch beobachtet, dass mit steigender Temperatur das biogene Harz früher an Steifigkeit verliert als das konventionelle Harz. Ein weiterer Unterschied wurde in der Dauer bis zum Selbsterlöschen der Flamme festgestellt. Diese war bei dem auf Jatropha basierten Epoxidharz doppelt so lang wie bei herkömmlichem Epoxidharz.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass durch den Einsatz nachhaltiger Tränkungsmitel anstelle konventionellen Epoxidharzes, Verbundwerkstoffe mit vergleichbaren oder teilweise sogar besseren Eigenschaften hergestellt werden können, während gleichzeitig die Umweltbelastung reduziert wird. Eine sehr umfangreiche Darstellung unterschiedlichster nachhaltiger biobasierter Harzsysteme zur Tränkung von Polymerfasern für strukturelle Anwendungen im Bauwesen enthält die Dissertation von M. Hofmann [35].

Abschließend ist festzustellen, dass die dargestellten Forschungsergebnisse nur einen Teil des aktuellen Stand der Wissenschaft widerspiegeln. Beispielsweise kann die Nachhaltigkeit durch den Einsatz von biogen getränkten natürlichen Fasern, wie sie in Abbildung 2.1 dargestellt sind, zusätzlich gesteigert werden. Dieses Forschungsfeld ist jedoch nicht Teil dieser Arbeit und wurde daher nicht weiter thematisiert.

### 4.2.3 Anforderungen an das Tränkungsmitel

Die Eignung einer Polymermatrix zur Imprägnierung von Textilien kann anhand bestimmter aufzuweisender Anforderungen evaluiert werden, welche wie folgt aus der Dissertation von Kulas [2] zusammengefasst werden:

- Eine niedrige Viskosität ist für das Tränkungsmitel essenziell, um möglichst gut auch die inneren Filamente im Rovingkern zu imprägnieren. Aus einer E-Mail Anfrage<sup>1</sup> an den Autor der in Kapitel 3.2.2 zitierten Publikation [31], sollte die Viskosität von biobasierten Harzen einen Wert von ungefähr 1000 cP nicht übersteigen. Die optimale Viskosität liegt im Bereich von 100 bis 500 cP, in Abhängigkeit des Faservolumens und Aufbau des Rovings.
- Das Textil sollte nach der Tränkung eine gewisse Steifigkeit aufweisen, weshalb das Tränkungsmitel eine hohe Steifigkeit im ausgehärteten Zustand aufweisen muss.
- Bei Verwendung von Glasfasern ist ein niedriger Diffusionskoeffizient des Tränkungsmitels zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit notwendig.

---

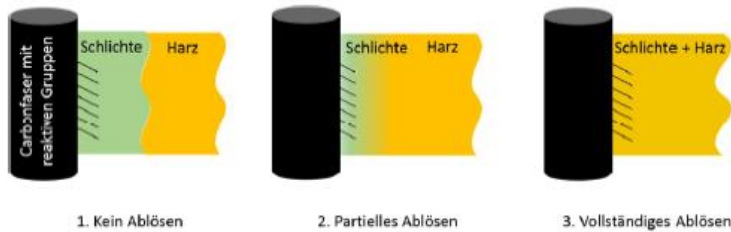
<sup>1</sup> Dr. M.A. Hofmann, Universität Lissabon, persönliche E-Mail-Korrespondenz, 31.05.23

- Im Gebrauchszustand ist eine Temperaturbeständigkeit bis ca. 80°C erforderlich.
- Je nach Anwendungsgebiet sollte die Polymermatrix eine hohe Brandbeständigkeit aufweisen.

Die dargestellte Anforderung unter Punkt 1 ist von Tränkungsmittelein allgemein aufzuweisen, um zu gewährleisten, dass eine vollständige Tränkung aller im Roving befindlichen Filamente erfolgt. Jedoch hängt die tatsächliche Auswahl eines Tränkungsmittelein von weitaus mehr Aspekten ab. Dabei spielt die Oberfläche der Faser eine zentrale Rolle bei der Anbindung der Schlichte beziehungsweise in weiterer Folge des Tränkungsmittelein. Die chemische Zusammensetzung der Schlichte und des Tränkungsmittelein unterliegt jedoch sehr oft Firmengeheimnissen. Auch die in dieser Arbeit verwendete Schlichte und die Zusammensetzung des biogenen Tränkungsmittelein konnten vom Hersteller der getränkten Fasern nicht in Erfahrung gebracht werden. Daher wird im Folgenden die Wechselwirkung zwischen Faser, Matrix und Schlichte erläutert, um ein Verständnis zur Auswahl eines Tränkungsmittelein zu erlangen. Eine E-Mail-Anfrage<sup>2</sup> an Herrn Ass.-Prof. Dr. Andreas Saxer, des Arbeitsbereiches Materialtechnologie der Universität Innsbruck, beschreibt die Wechselwirkung von Carbonfasern, Schlichte und Tränkungsmittelein wie folgt: Nach Herstellung der Carbonfasern muss deren Oberfläche durch elektrochemische Oxidation aktiviert werden, um auf der ursprünglich unpolaren Oberfläche der Fasern funktionelle Gruppen, also polare Gruppen auszubilden. Dies ist essenziell, damit eine gute Benetzbarkeit der Schlichte beziehungsweise des Tränkungsmittelein gewährleistet werden kann. In weiterer Folge werden die Fasern gewaschen und getrocknet, damit sie beschichtet werden können. Es ist wichtig, dass die Schlichte mit dem Harzsystem chemisch kompatibel ist. Das legt nahe, dass bei Einsatz eines biogenen Tränkungsmittelein auch eine biogene Schlichte zur Anwendung kommt. Dies wurde im vorherigen Kapitel erwähnt-, zum Beispiel Lignin als Schlichte und Cellulosepropionat als Tränkungsmittelein. Eine optimale Beschichtung sieht vor, dass jedes einzelne Filament von der Schlichte wie ein Schutzfilm umgeben wird, weshalb eine niedrige Viskosität der Schlichte wichtig ist. Je nach chemischer Zusammensetzung der Schlichte erlauben die Sauerstoffgruppen der aktivierten Fasern dann eine entsprechende Haftung der Schlichte an der Faseroberfläche. Durch den Auftrag der Schlichte werden die Oberflächeneigenschaften der Fasern verändert. Weiters sollte die Schlichte auch eine starke chemische und mechanische Wechselwirkung zwischen Faser und Tränkungsmittelein ermöglichen. Um eine gute Haftung des Tränkungsmittelein mit den beschichteten Fasern zu erzielen, muss während dem Tränkungsprozess eine gute Durchmischung der drei Komponenten gewährleistet sein. In diesem Zusammenhang versteht man unter einer Durchmischung die Ablösung der Schlichte von der Faseroberfläche. Dabei werden drei Interaktionsmodelle voneinander unterschieden, welche in Abbildung 4.4 ersichtlich sind. Das linke Bild zeigt den Fall, dass sich die Schlichte durch das Tränkungsmittelein nicht von der Faser ablöst. Dabei würde sich nur die Schlichte und das Tränkungsmittelein miteinander verbinden, jedoch nicht das Tränkungsmittelein mit der Oberfläche der Fasern. Dies führt zu vergleichsweise schlechteren mechanischen Eigenschaften. Im mittleren Bild ist die teilweise Durchmischung von Schlichte und Tränkungsmittelein dargestellt, auch partielle Ablösung genannt. Hierbei können sich die einzelnen Moleküle nicht vollständig miteinander vernetzen. Im besten Fall kommt es wie im rechten Bild gezeigt zu einer vollständigen Durchmischung von Tränkungsmittelein und Schlichte, also einem vollständigen Ablösen der Schlichte. Dadurch ist die Faseroberfläche so beschaffen, dass sie die Bildung von kovalenten Bindungen mit dem Tränkungsmittelein ermöglicht. Hierbei spielt die mechanische Verzahnung, welche aus der Rauigkeit der Faseroberfläche rührt, eine wichtige Rolle. Um diese aufrechtzuerhalten, darf die Schlichte nicht zu dick aufgetragen werden.

<sup>2</sup> Ass.-Prof. Dr. A. Saxer, Universität Innsbruck, persönliche E-Mail-Korrespondenz, 11.08.2023

Bei der Wahl eines Tränkungsmediums, sollte diese Interaktion zwischen Faser, Matrix und Schlichte berücksichtigt werden. Das wiederum lässt die Schlussfolgerung zu, dass die chemische Struktur des Tränkungsmediums auf jene der Schlichte beziehungsweise der Oberflächenbeschaffenheit der Faser abgestimmt sein muss. Nähere Informationen dazu sind in der Dissertation von Wetjen zu finden [36].

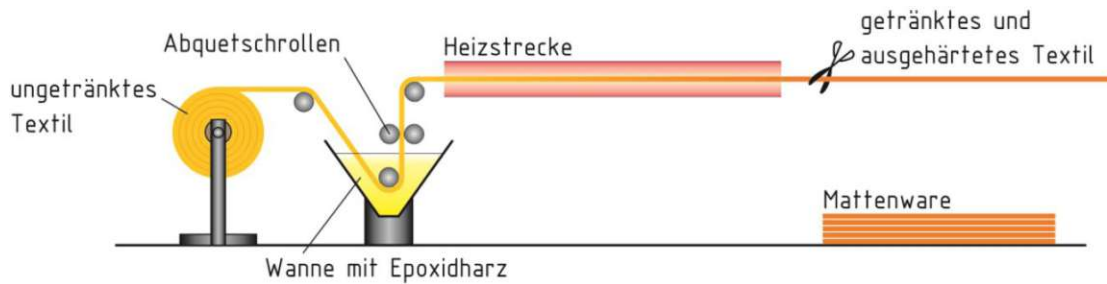


**Abb. 4.4:** Drei Interaktionsmodelle der beschichteten Faser mit dem Tränkungsmedium, entnommen aus [36]

## 4.3 Tränkungsprozess

### 4.3.1 Foulard-Verfahren

Wie bereits in Kapitel 2.2.5 erwähnt, gibt es unterschiedliche Methoden zur Tränkung textiler Flächengebilde. Die Wahl eines geeigneten Prozess ist dabei abhängig von der Faser und der Viskosität des Tränkungsmediums [9]. Ein in der Praxis häufig angewandtes Verfahren zur Tränkung textiler Flächengebilde ist das sogenannte Imprägnierverfahren. Die Tränkung erfolgt dabei mit Hilfe einer Tauch-Quetsch-Einrichtung, welche auch als Foulard bezeichnet wird. In Abbildung 3.5 ist das Prinzip des Foulardierens dargestellt. In [2] wird der Mechanismus wie folgt beschrieben: zunächst wird das ungetränkte Textil über sogenannte Umlenkrollen durch einen Trog gezogen, in welchem sich das Tränkungsmedium befindet. Anschließend wird durch Quetsch- und Abstreifrollen gewährleistet, dass das Tränkungsmedium auch bis zu den inneren Fasern des Rovings vordringt und überschüssiges Material entfernt wird. Der zwischen den beiden Walzen aufbrachte Druck reguliert das Einpressen des Harzes. Anschließend werden die getränkten Textilien getrocknet und schließlich auf Rollen aufgewickelt oder als Mattenware direkt zugeschnitten. Die Trocknung kann dabei entweder in einem Heizzurm (vertikaler Prozess) oder in einer Heizstrecke (horizontaler Prozess) durchgeführt werden. Ein Nachteil von Ersterem ist, dass durch den vertikalen Trocknungsprozess ein sogenannter Fadenverzug auftritt. Dabei verformen sich auf Grund des Gewichts des Tränkungsmediums die Schussrovings, sodass sie nichtmehr senkrecht zu den Kettrovings stehen. Durch Anordnung einer horizontalen Heizstrecke kann dieser Effekt weitestgehend verhindert werden.



**Abb. 4.5:** Prinzipdarstellung des Foulardierens, entnommen aus [2]

An der Technischen Universität in Dresden wurden Untersuchungen gemacht zur Verbesserung des Tränkungsprozesses, mit dem Ziel die mechanische Leistungsfähigkeit des textilen Flächengebildes zu erhöhen. Die Ergebnisse sind in L. Hahn et al., [37] dargestellt und werden im Folgenden kurz zusammengefasst. Untersucht wurde der Schritt des Quetschens im Foulard-Verfahren. Wie zuvor angemerkt, lässt sich durch den Druck zwischen den beiden Walzen die Harzeinpressung einstellen. Diesbezüglich erforschten sie den Zusammenhang zwischen den Parametern der Maschineneinstellung, dem Quetschdruck und der Härte der Quetschwalzenoberfläche, auf die Zugfestigkeit der textilen Bewehrung. Die Ergebnisse zeigen, dass durch eine Erhöhung des Walzendrucks bei einer gewissen Walzenhärte eine Steigerung der Zugfestigkeit der textilen Bewehrung um bis zu 10% im Vergleich zu textiler Bewehrung die ohne jeglichen Quetschprozess getränkt wurden, erzielt werden kann. Bei dem Einsatz von weichen Walzen war dieser Effekt nicht zu erkennen. Mikroskopische Untersuchungen bestätigten eine bessere Durchdringung der Rovings mit dem Tränkungsmedium durch die höheren Quetschdrücke. Weitere Untersuchungen befassen sich mit den Auswirkungen einer Anregung des Tränkungsmediums mit Ultraschallschwingungen auf die Zugfestigkeit der textilen Bewehrung. Auch hier konnte eine Steigerung der Zugfestigkeit vermerkt werden.

## 5 Mikroskopische Untersuchungen

Die in dieser Arbeit verwendeten Bewehrungsstrukturen aus Basaltfasern, wurden mit einem biogenen Tränkungsmedium getränkt. Zur Feststellung des Grades der Durchtränkung wurden mikroskopische Untersuchungen an einem Teilstück des textilen Flächengebildes sowie an Einzelrovings, welche nicht gestickt waren, durchgeführt. Ebenso wurden Proben mit konventionellem Epoxidharz und ungetränkte Fasern untersucht, mit dem Ziel Unterschiede beziehungsweise Gemeinsamkeiten hinsichtlich der Tränkung der Basaltfaserrovings festzustellen. Die Rovings weisen eine Feinheit von 4800 tex auf, was durch Assemblierung von zwei Rovings realisiert werden konnte.

Im nachfolgenden Kapitel werden hierzu die durchgeführten digitalmikroskopischen- sowie rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen erläutert. Da seitens des Herstellers der Tränkungsmatrix keine Information hinsichtlich der Zusammensetzung der Tränkungsmedium in Erfahrung zu bringen war, wurden im Zuge der elektronenmikroskopischen Untersuchungen auch noch eine energiedispersive Röntgenmikroanalyse durchgeführt. Zur deutlicheren Darstellung der Erkenntnisse werden neben dem Versuchsaufbau und der Versuchsdurchführung, auch die Versuchsbeobachtungen und die entsprechenden Interpretationen getrennt voneinander beschrieben.

### 5.1 Digitalmikroskopische Untersuchungen

Die digitalmikroskopischen Untersuchungen wurden hauptsächlich am Querschnitt des Rovings mit einem am Forschungsbereich für Baustofflehre der Technischen Universität Wien vorhandenen Mikroskop VHX 6000 durchgeführt. Ziel war es herauszufinden, wie gut die bei den Versuchen verwendeten Rovings durchtränkt sind. Weiters wurde damit versucht, Unterschiede beziehungsweise Gemeinsamkeiten hinsichtlich der gewählten Tränkungsmedium, Epoxidharz und biogener Tränkung festzustellen.

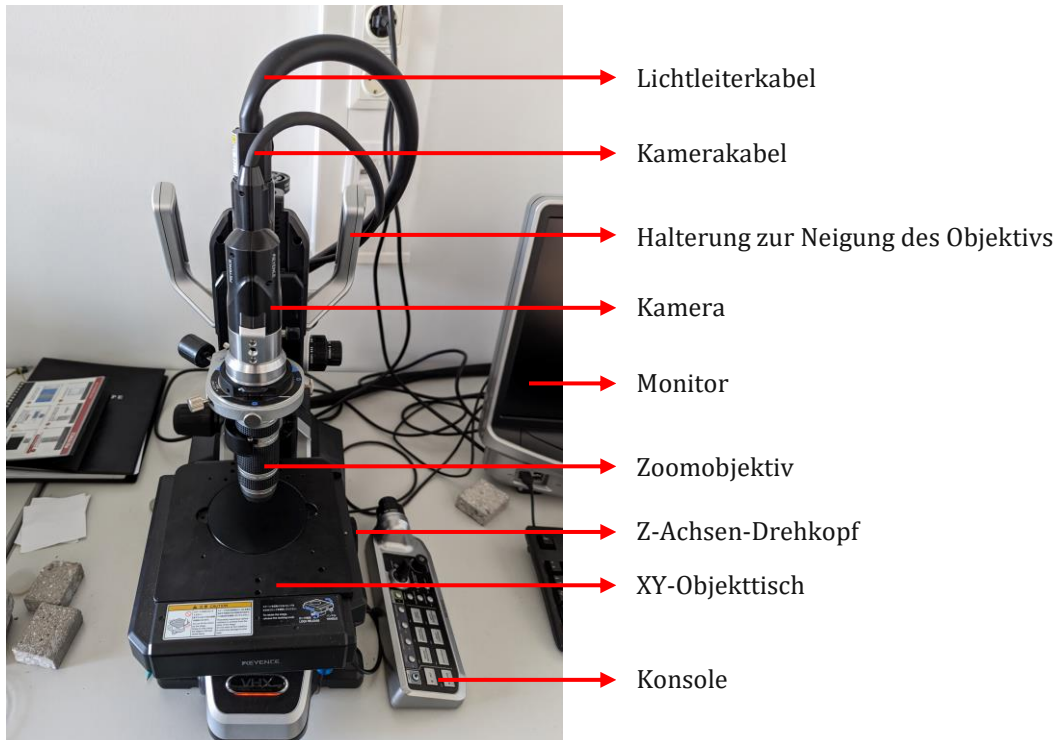
#### 5.1.1 Prinzip der Digitalmikroskopie

Das Digitalmikroskop basiert auf dem Prinzip des Lichtmikroskops, wobei es anstelle eines Okulars eine Digitalkamera verwendet. Im Unterschied zu einem optischen Mikroskop wird die Probe deshalb nicht durch ein Okular betrachtet, sondern auf einem Monitor. Das betrachtete Objekt wird dabei mit Hilfe eines Bildsensors in digitale Signale umgewandelt. Das auf dem Monitor angezeigte Bild entsteht durch Verarbeitung der digitalen Signale. Digitalmikroskope besitzen eine hohe Tiefenschärfe und einen großen Betrachtungsabstand. Ersteres bietet den Vorteil eines großen Bereichs der scharf abgebildet werden kann. Als Betrachtungsabstand wird der Abstand zwischen der Linse bis zum Prüfobjekt genannt. Je nach Bauart ermöglichen Digitalmikroskope eine Auf- oder Durchlichtbetrachtung [38].



## 5.1.2 Versuchsaufbau

Das verwendete Digitalmikroskop des Herstellers Keyence Modell VHX 6000 basiert auf dem Prinzip der Auflichtmikroskopie. Neben dem Stativ und dem Monitor ist ebenso eine Konsole Bestandteil der Apparatur. Die einzelnen Komponenten des Systems sind in Abbildung 5.1 dargestellt.



**Abb. 5.1:** Komponenten des Digitalmikroskop VHX 6000

Folgende Proben wurden mit dem Digitalmikroskop für diese Arbeit untersucht:

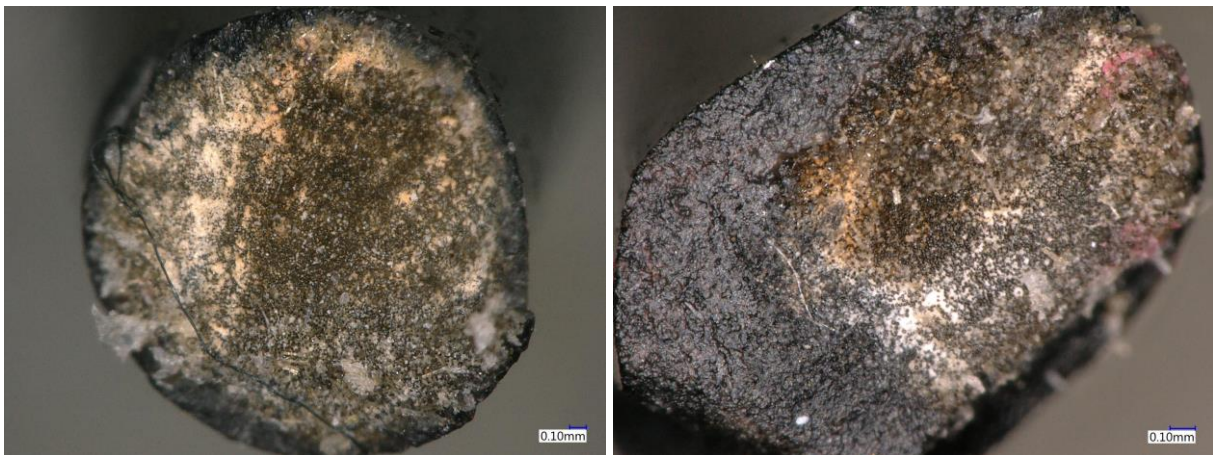
- drei Einzelrovings getränkt mit Epoxidharz
- drei Einzelrovings getränkt mit biogenem Harz
- ein Roving getränkt mit Epoxidharz aus der textilen Bewehrungsstruktur entnommen, nach Durchführung eines Zugversuchs am bewehrten Betonprobekörper
- Betonprobekörper mit eingebetteter epoxidharzgetränkter textiler Bewehrung

## 5.1.3 Versuchsdurchführung

Zunächst wurden mit zwei unterschiedlichen Methoden aus längeren Einzelstücken der jeweiligen Rovings kleinere Probestücke herausgeschnitten. Hierfür wurde (a) eine kleine Diamantsäge und (b) eine Handsäge verwendet. Zur Fixierung der Proben am Objektstisch wurden diese bei Betrachtung des Querschnitts auf einem doppelseitigen Klebeband befestigt. Proben die in Faserrichtung untersucht wurden, konnten direkt auf den Objektstisch gelegt werden. Letztendlich wurden noch Schärfeparameter und Lichtverhältnisse eingestellt.

## 5.1.4 Versuchsbeobachtung

Unabhängig davon, ob die Rovings mit Epoxidharz oder dem biogenen Tränkungsmittel getränkt wurden, sind bei allen Probestücken, die mit der Diamantsäge geschnitten wurden, im Querschnitt deutlich Verbrennungen des Harzes zu erkennen. Diese sind in der Abbildung 5.2 durch die schwarzen Stellen ersichtlich. Das linke Bild in Abbildung 5.2 zeigt den Querschnitt des Rovings getränkt in Epoxidharz, hingegen zeigt das rechte Bild den Querschnitt jenes Rovings, welcher mit biogenem Harz getränkt war. Jene Proben, die mit der Handsäge geschnitten wurden, zeigten im Digitalmikroskop eine weiße Querschnittsfläche. Dies hängt mit der Rauigkeit und der Reflektion des Lichts zusammen. Auch dies trat unabhängig vom Tränkungsmaterial bei beiden Proben auf und ist in Abbildung 5.3 zu sehen.



**Abb. 5.2:** Probenpräparation mittels Diamantsäge, digitalmikroskopische Aufnahme des Querschnitts. Links: Einzelroving getränkt in Epoxidharz, rechts: Einzelroving getränkt in biogenem Harz

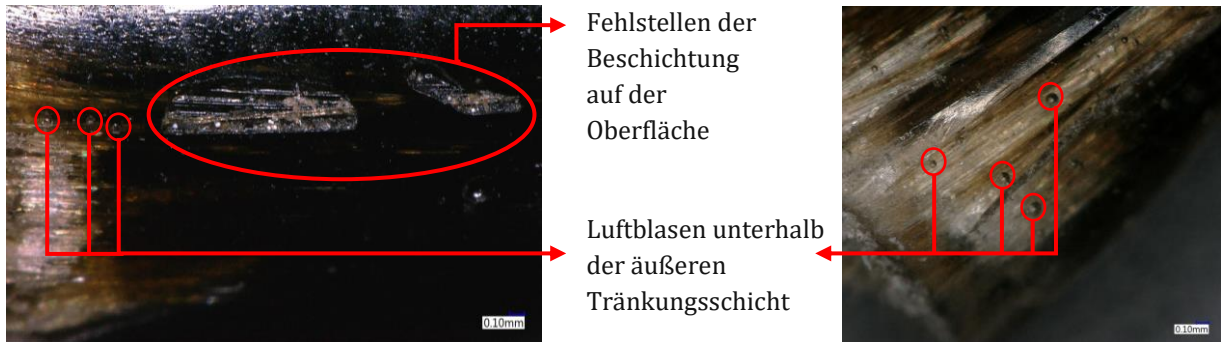


**Abb. 5.3:** Probenpräparation mittels Handsäge, digitalmikroskopische Aufnahme des Querschnitts. Links: Einzelroving getränkt in Epoxidharz, rechts: Einzelroving getränkt in biogenem Harz

Bei der Betrachtung einer Probe in Faserrichtung, welche mit Epoxidharz getränkt ist, waren einige Fehlstellen in der Beschichtung auf der Oberfläche zu erkennen. Ebenfalls waren Einschlüsse von Luftblasen erkennbar. Das linke Bild der Abbildung 5.4 veranschaulicht diese. Auf der untersuchten Oberfläche der Rovings, die mit biogenem Tränkungsmittel getränkt wurden,



konnten keine derartigen Fehlstellen erkannt werden. Jedoch waren auch dort Luftblasen unterhalb der oberen Tränkungsschicht ersichtlich. Dies ist im rechten Bild der Abbildung 5.4 ersichtlich. In einer weiteren Ansicht längs zur Faserrichtung, siehe Abbildung 5.5, sind zudem deutliche Farbunterschiede der äußeren Fasern und der inneren Fasern erkennbar.



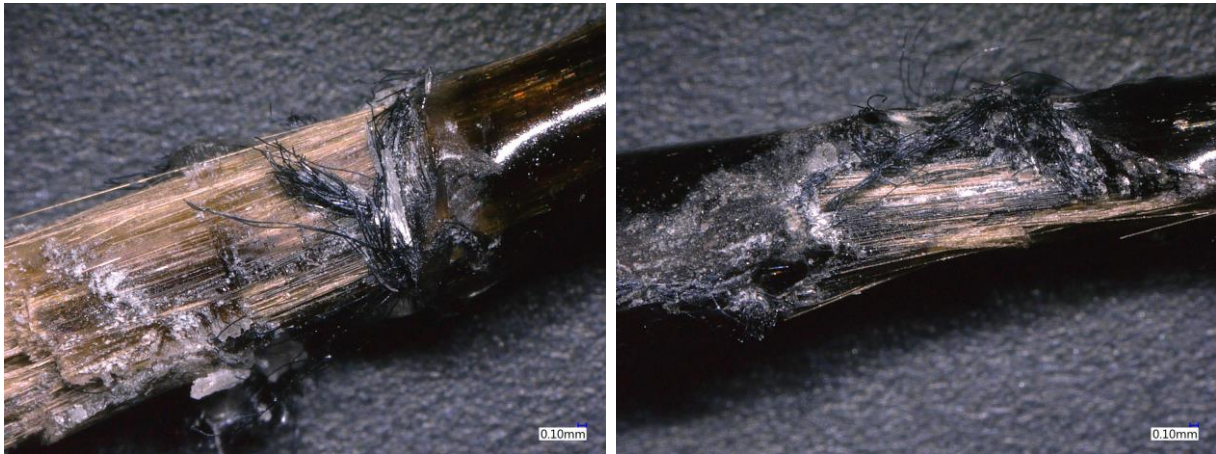
**Abb. 5.4:** Fehlstellen auf der Oberfläche und Luftblasen unter der Oberfläche der Beschichtung. Links: Roving getränkt mit Epoxidharz, Rechts: Roving getränkt mit biogenem Harz



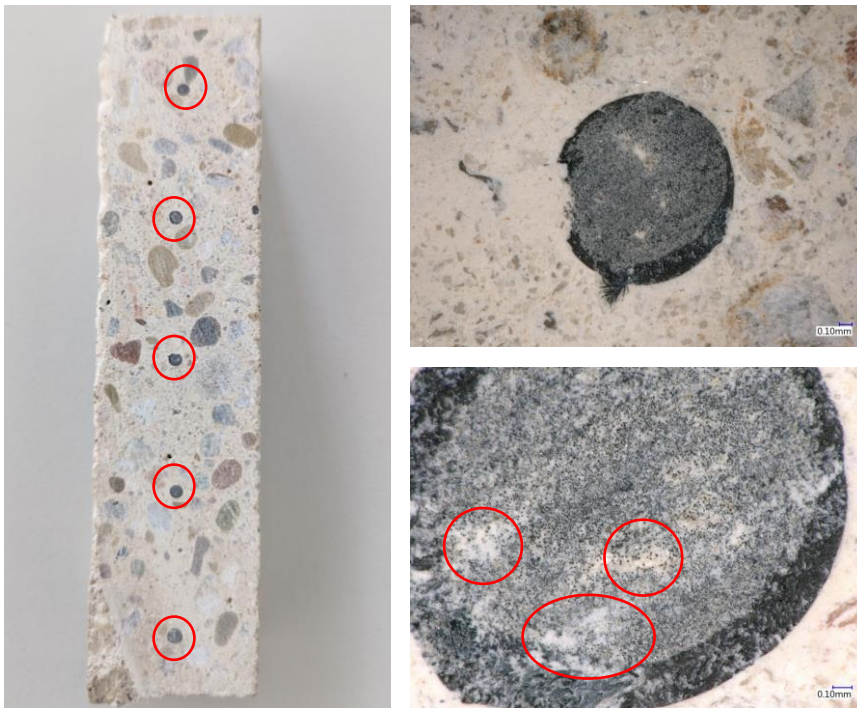
**Abb. 5.5:** erkennbare Farbunterschiede an einem Roving in Längsrichtung, getränkt mit biogenem Tränkungsmittel

In Abbildung 5.6 ist die Untersuchung an einem Roving in Faserrichtung ersichtlich, welcher nach einem einaxialen Zugversuch aus dem Betonprobekörper entnommen wurde. Das linke Bild zeigt neben gerissenen Einzelfasern auch den Riss des Stickfadens. Im rechten Bild ist der Riss in der oberen Schicht des Tränkungsmittels deutlich erkennbar. Auch hier sind Farbunterschiede der äußeren und inneren Fasern deutlich erkennbar. Abbildung 5.7 hingegen zeigt mikroskopische Untersuchungen an einem mit Epoxidharz getränkten bewehrten Betonprobekörper. Das linke Bild zeigt die Aufsicht des Betonprobekörpers, bei welchem in regelmäßigen Abständen die eingebettete textile Bewehrungsstruktur erkennbar ist. Hierbei sind die Querschnitte der Rovings in Längsrichtung (Kettroving) ersichtlich (in der Abbildung rot umkreist). Die beiden Bilder auf der rechten Seite der Abbildung 5.7 zeigen die Vergrößerung eines in der Betonmatrix eingebetteten Rovings. Hierbei sind an der Grenzfläche zwischen Betonmatrix und Roving deutlich dunklere Stellen erkennbar als im Inneren des Rovings. Im unteren Bild sind im Inneren des Rovings, zudem einige hellere Stellen ersichtlich, die in der Abbildung rot umkreist

gekennzeichnet. Es fällt auf, dass im Gegensatz zu den mit der Handsäge geschnittenen Einzelrovings, keine weiße Schnittfläche am Querschnitt des Roving erkennbar ist.



**Abb. 5.6:** Epoxidharzgetränkter Roving, entnommen aus einem gerissenen Betonprobekörper, nach einem einaxialen Zugversuch



**Abb. 5.7:** Betonprobekörper mit eingebetteter epoxidharzgetränkter textiler Bewehrung

### 5.1.5 Interpretation

Die in Abbildung 5.2 dargestellten Querschnitte der Einzelrovings weisen nach einem Schnitt mit der Diamantsäge Verbrennungen des Harzes auf, die durch deutliche schwarze Stellen ersichtlich sind. Der Zuschnitt des Rovings mit der Diamantsäge eignet sich somit nicht zur Präparation der Proben, da die entstandenen Verbrennungen am Querschnitt des Rovings keine gesicherten Aussagen über die Durchtränkung der Fasern zulassen. Ebenso wird damit die Farbgebung der Oberfläche des Querschnitts verfälscht dargestellt. Weiters wurde versucht, die Proben mit einer Handsäge zu schneiden. Die in Abbildung 5.3 dargestellten Querschnitte dieser Rovings weisen

eine weiße Oberfläche auf. Eine Nachfrage an der Einrichtung für Elektronenmikroskopie der Technischen Universität Wien, USTEM, bestätigte die Vermutung, dass sich durch den Schnitt mit der Handsäge das Epoxidharz durch Reibung weiß verfärbte. In Abbildung 5.7 ist dann der tatsächliche Querschnitt eines Rovings, wie er in einbetoniertem Zustand aussieht, dargestellt. Hierbei ist eine dunkle Farbe der Querschnittoberfläche ersichtlich, wie es auch in Abbildung 5.4 ersichtlich ist, was mit der dunklen Farbe des Tränkungsmediums zusammenpasst. Die teilweise auftretenden helleren Stellen in den Querschnitten der Rovings in Abbildung 5.7 lassen vermuten, dass dort sehr harzreiche Bereiche auftreten. Die im nachfolgenden Kapitel erläuterten elektronen-mikroskopischen Untersuchungen unterstützen diese Aussage, siehe dazu Abbildung 5.13 (1).

Bei den in Abbildung 5.4 bemerkbaren Fehlstellen des Tränkungsmediums an der Oberfläche des Rovings ist unklar, ob diese bereits unmittelbar nach der Tränkung vorhanden waren, oder ob diese Fehlstellen nachträglich aufgetreten sind. Es ist davon auszugehen, dass solche Fehlstellen die mechanischen Eigenschaften der Rovings verschlechtern. Zumindest die erkennbaren Luftblasen sind aller Voraussicht nach im Zuge des Tränkungsprozess bzw. der nachträglichen Trocknung der Rovings aufgetreten. Die dunkle Farbe des biogenen Tränkungsmediums ist in Abbildung 5.5 an den äußeren Fasern des Rovings ersichtlich. Die inneren Fasern hingegen weisen dieses dunkle Aussehen nicht auf. In diesem Fall handelt es sich um eine Probe aus dem Randstück eines Rovings. Nach Rücksprache mit der für die Tränkung zuständigen Firma v-trion lässt sich dies dadurch erklären, dass die Randstücke des Rovings prozessbedingt nicht imprägniert werden. Das Tränkungsmedium ist somit nicht in die inneren Fasern eingedrungen, sondern hat die äußeren Fasern lediglich beschichtet. In Abbildung 5.6 ist jedoch ersichtlich, dass diese Farbunterschiede auch in der Mitte eines Rovings auftreten, welcher als Teil der textilen Bewehrungsstruktur in einem Betonprobekörper zum Einsatz kam. Die inneren Fasern sind teilweise also auch hier nicht vollständig getränkt. Dies ist dem Tränkungsprozess sowie dem verwendeten Tränkungsmedium geschuldet. Für eine bessere Durchtränkung der textilen Bewehrungsstruktur müsste die Tauchzeit erhöht werden, was hier jedoch auf Grund der limitierten Topfzeit des Harzes nicht möglich. Weiters wurde das Tränkungsmedium nicht abgewalzt, da sich sonst die Form des Rovings ungünstig verändert hätte. Der in der Abbildung 5.6 dargestellte Roving wurde einem Betonprobekörper entnommen, der in einem einaxialen Dehnkörperversuch untersucht wurde. Das Fehlen der oberen Schicht der Tränkung lässt sich auf das Reißen der Randfasern rückschließen.

Weiters kann gesagt werden, dass mit den digitalmikroskopischen Untersuchungen keine wesentlichen Unterschiede zwischen dem biogenen Tränkungsmedium und dem Epoxidharz festgestellt wurden. Zwar wurden die erkannten Fehlstellen nur an einem mit Epoxidharz getränkten Roving festgestellt, es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass auch bei biogener Tränkung solche Fehlstellen auftreten.

Abschließend lässt sich sagen, dass digitalmikroskopische Untersuchungen nicht ausreichen, um Rückschlüsse auf den Grad der Durchtränkung zu ermöglichen, beziehungsweise um Vergleiche zwischen zwei unterschiedlichen Tränkungsmediums aufzustellen. Dies liegt unter anderem daran, dass die Einbettung der Fasern in die Matrix mit einem Digitalmikroskop nicht ersichtlich ist. Um dies zu evaluieren, wurden weiters rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen an den Rovings vorgenommen, welche im nachfolgenden Kapitel dargestellt werden.



## 5.2 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen

### 5.2.1 Prinzip der Rasterelektronenmikroskopie

Im Gegensatz zu Lichtmikroskopen, werden bei Rasterelektronenmikroskopen (kurz: REM) Elektronen anstatt Licht zur Darstellung von Oberflächen verwendet. Eine Säule zwischen einer beheizten Kathode und einer Anode dient dabei als Elektronenquelle. Dort werden die Elektronen mit einer Spannung von 1 bis 50 kV beschleunigt und dann von Kondensorlinsen und einer Aperturblende zu einem Strahl gebündelt. Dieser Elektronenstrahl trifft auf eine Probe und tastet deren Oberfläche rasterförmig ab, die dabei entstehenden Wechselwirkungsprodukte werden mit Hilfe von Detektoren aufgenommen und zur Bilderzeugung genutzt. Um eine Interaktion von in der Luft befindlichen Atomen und Molekülen zu vermeiden, findet der Prozess in einem Hochvakuum statt. Das angezeigte Bild weist eine hohe Tiefenschärfe auf, da je nach Probenhöhe und Oberflächenungenauigkeit der Elektronenstrahl die zylindrische Form beibehält und somit höher und tiefer liegende Stellen gut erfassen kann. Die Streuung bei der Reflektion und die Fläche zum Auffangen der Elektronen begrenzt die Schärfe [39].

### 5.2.2 Versuchsaufbau

Die REM-Untersuchungen für diese Arbeit, wurden am 10.08.23 in Zusammenarbeit mit den MitarbeiterInnen am USTEM, einer Forschungseinrichtung für Elektronenmikroskopie der Technischen Universität Wien durchgeführt. Das dort vorhandene Elektronenmikroskop Quanta FEG 250 der Firma FEI ist mit seinen Systemkomponenten in Abbildung 5.8 dargestellt.

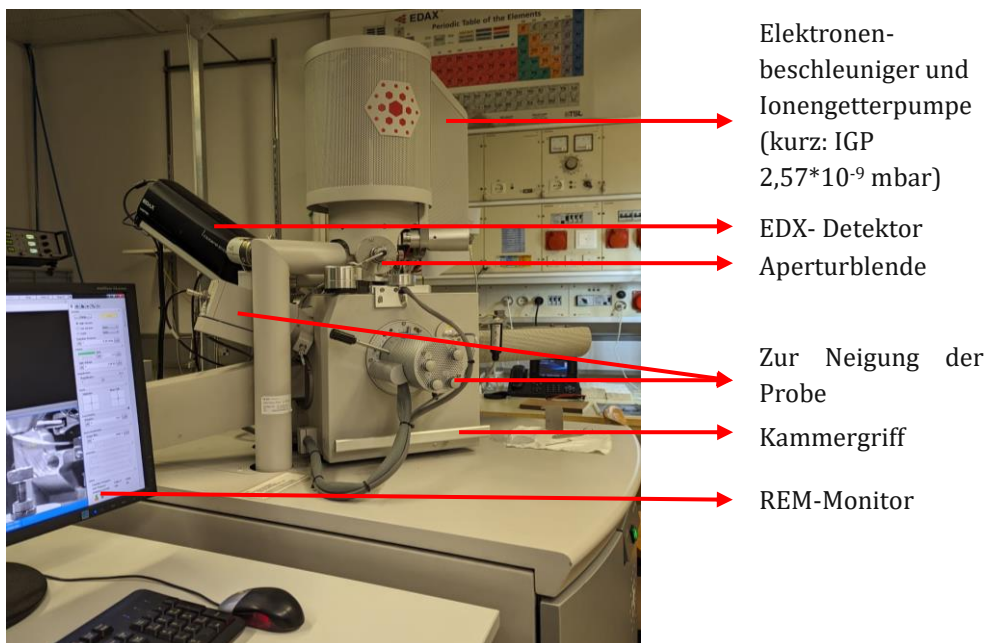


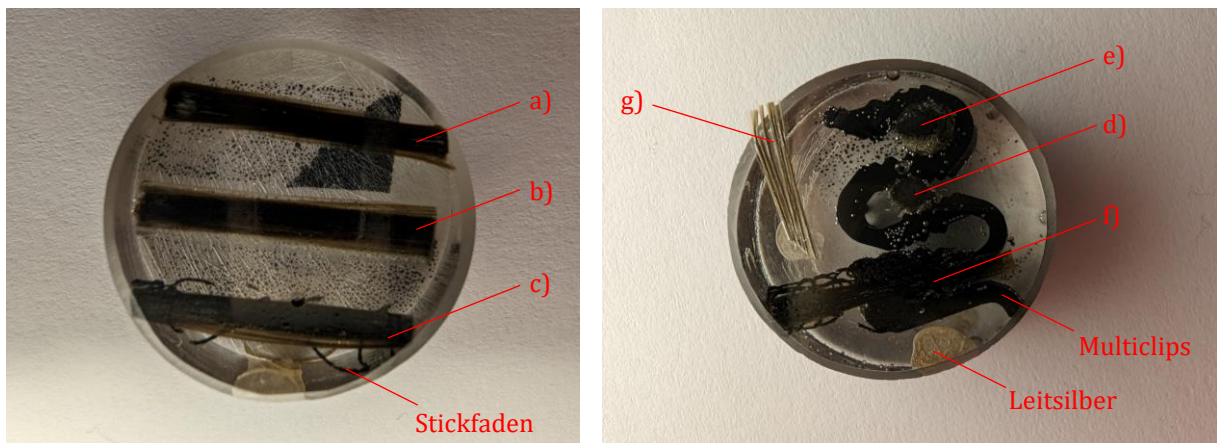
Abb. 5.8: Komponenten des REM Quanta FEG 250

Folgende Proben wurden mit dem REM untersucht:

- Längsschnitt eines Einzelrovings getränkt in Epoxidharz
- Längsschnitt eines Einzelrovings getränkt in biogenem Harz
- Längsschnitt eines Rovings aus dem mit Epoxidharz getränkten textilen Flächengebilde

- d) Querschnitt eines Einzelrovings getränkt in Epoxidharz
- e) Querschnitt eines Einzelrovings getränkt in biogenem Harz
- f) Querschnitt eines Kreuzungspunktes aus dem mit Epoxidharz getränkten textilen Flächengebilde
- g) Ungetränkte beschlichtete Fasern

Die sieben verschiedenen Proben sind in Abbildung 5.9 ersichtlich. Dabei sind, bis auf die ungetränkten beschlichteten Fasern, alle in Epoxidharz eingebettet, was Teil der Probenpräparation war. Die genaue Probenpräparation wird im nachfolgenden Kapitel thematisiert.



**Abb. 5.9:** In Epoxidharz eingebettete Proben. Links: Längsschnitte der Proben, Rechts: Querschnitte der Proben und ungetränkte Fasern

### 5.2.3 Versuchsdurchführung

Zur Präparation der Proben wurden diese zunächst in einem farblosen Epoxidharz, Specifix-40 Kit, eingebettet. Zur Fixierung der Querschnittsproben im Epoxidharz, kamen sogenannte Multiclips zur Anwendung. Diese sind im rechten Bild der Abbildung 5.9 ersichtlich. Die eingebetteten Proben wurden anschließend mit Siliziumkarbid Schleifpapier abgeschliffen. Dabei kamen unterschiedlichste Körnungen, von grob bis fein, in folgender Reihenfolge zur Anwendung: 320-500-1200-2400-4000. Eine Körnungsangabe von 4000 bedeutet eine Korngröße von  $5\mu\text{m}$ . Als nächstes wurden die Proben mit Diamantsuspension poliert. Hierbei wurde die Diamantsuspension „DiaDuo-2“ der Firma Struers zunächst mit einer Körnung von  $1\mu\text{m}$  und anschließend mit  $3\mu\text{m}$  verwendet. In einem nächsten Schritt wurden die polierten Proben gereinigt. Zur weiteren Probenvorbereitung werden die in Epoxidharz eingebetteten Probenstücke mit doppelseitigem Kohleklebeband auf dem Probeteller fixiert. Mit einer dünnen Schicht Leitsilber wurde das Epoxidharz mit dem Probeteller verbunden. Um die Proben elektrisch leitfähig zu machen, wurden diese in einem nächsten Schritt mit einer 4 nm dicken Gold-Palladium Schicht im Verhältnis 60:40 beschichtet. Dieser Prozess wird auch als „sputtering“ (deutsch: Kathodenzerstäubung) bezeichnet. In einem Sputtergerät, der Firma Quorum „Q 150T S“ wurde durch Drehen und Kippen der Proben, diese bei 15 nA für 30 Sekunden gleichmäßig mit Gold-Palladium überzogen. Dieser Schritt ist essenziell, da sich die vorher nichtleitende Probe, ansonsten durch das Eindringen des abtastenden Elektronenstrahls zunehmend negativ auflädt.

Dies wiederum kann eine Störung in der Abbildung bewirken, da Bereiche zunehmend heller angezeigt beziehungsweise überstrahlt werden können [39]. Schließlich wurden die Proben auf dem Probenhalter in das REM gestellt werden, um sie zu untersuchen.

## 5.2.4 Versuchsbeobachtung

Nachfolgend werden die Beobachtungen entsprechend der oben genannten Auflistung der Reihe nach beschrieben. Häufig verwendete Begriffe wie Risse, Brüche und Fehlstellen an der Faser werden zunächst definiert: Als Riss wird ein Spalt innerhalb der Faser verstanden, der jedoch nicht durchgehend ist. Im Querschnitt des Rovings in Abbildung 5.13 (2) ist dies ersichtlich. Der Bruch einer Faser deutet auf einen durchgehenden Riss hin. In Abbildung 5.11 (3) sind mehrere Brüche deutlich zu sehen. Ein Bruch unterteilt die Faser in zwei oder mehrere Teilstücke. Als Fehlstelle ist das offensichtliche Fehlen eines Faserstücks zu vermerken. Deutlich ist dies an den Enden der Faserstränge beispielsweise in Abbildung 5.10 (3) erkennbar.

### a) Längsschnitt eines Einzelrovings getränkt in Epoxidharz:

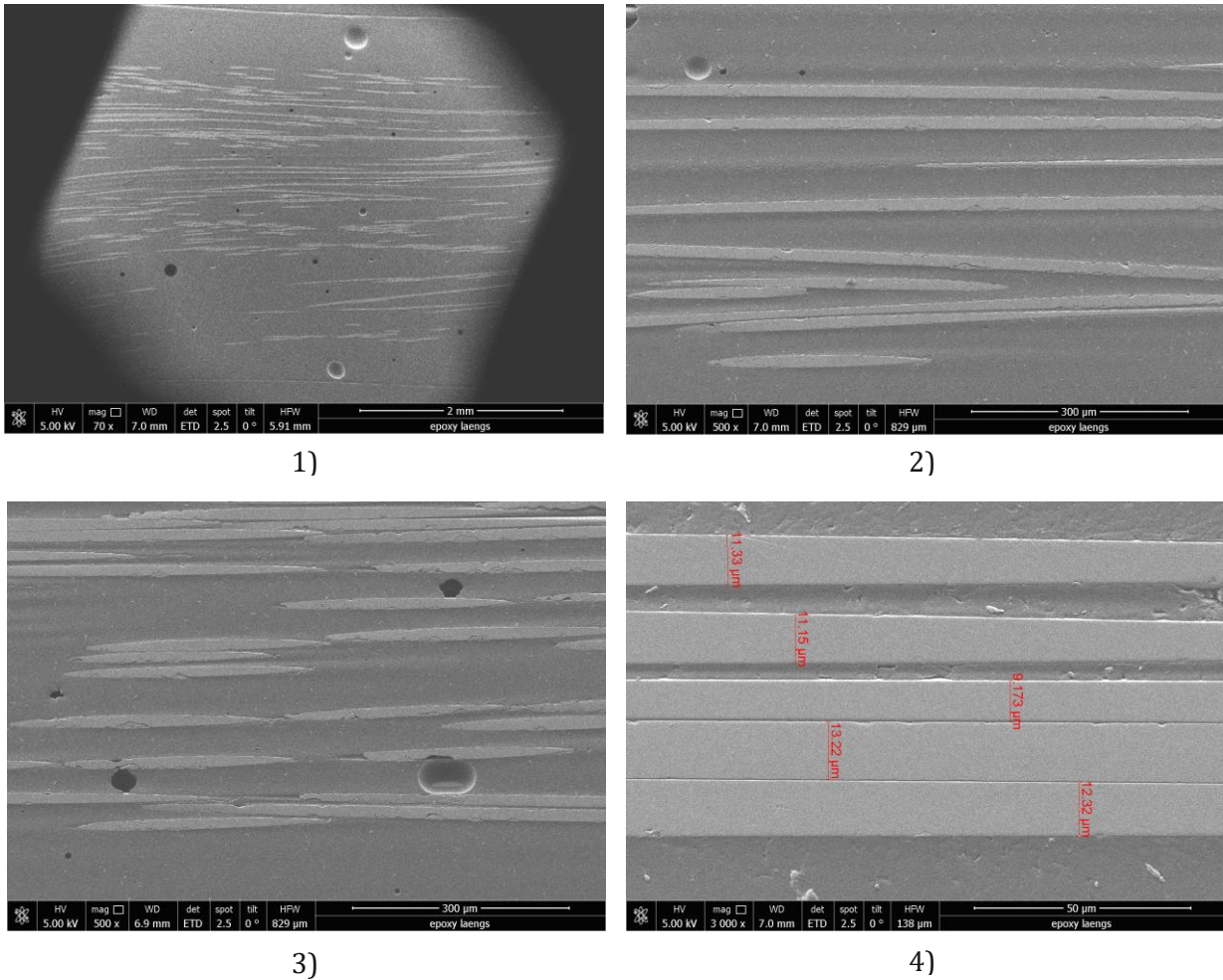
Das Übersichtsbild Abb. 5.10 (1) zeigt die 70-fache Vergrößerung des Längsschnitts eines mit Epoxidharz getränkten Einzelrovings. Die hellgrauen ovalen Formen stellen jeweils eine Faser da, hingegen sind die dunkelgrauen Flächen die Tränkung. Da die Fasern nicht perfekt gerade in der Matrix eingebettet sind, sondern teilweise auch gekrümmt in der Matrix liegen, sind unterschiedliche Längen der einzelnen Fasern erkennbar, beziehungsweise wird nicht die gesamte Länge einer Faser wiedergegeben, da sie teilweise in der Matrix verschwindet. Der sowohl am oberen- und unteren Rand des Bildes auftretende Strich stellt die Berandung dar zwischen dem Epoxidharz, welches zur Einbettung des Rovings herangezogen wurde, und dem Epoxidharz welches als Tränkungsmedium diente. Weiters sind in diesem Bild Luftblasen zu erkennen. Hellere Kreise stellen geschlossene Luftblasen dar. Schwarze Kreise stellen geöffnete Luftblasen, also den Schnitt durch eine Luftblase dar.

Eine 500-fache Vergrößerung eines Ausschnitts (Teilabschnitt a) dieses Längsschnitts ist im zweiten Bild der Abbildung 5.10 dargestellt. Hierbei sind elf Teilstücke von Fasern ersichtlich. Die bei sechs Fasern erkennbaren ovalen Enden stellen dar, dass an diesen Stellen die Faser in der Tränkung verschwindet, also eben die Tatsache, dass die Fasern nicht perfekt gerade in der Matrix liegen. An einigen Fasern ist eine helle, weiße Berandung zu sehen, welche den sogenannten Kanteneffekt widerspiegelt. Dieser tritt an nicht durchstrahlbaren Probenbereichen, also eben an Kanten, Spitzen oder Rundungen auf. An solchen Stellen ist die Sekundärelektronen (kurz: SE) Ausbeute sehr hoch, was zu einer Überstrahlung führt. An einigen Stellen der Faserränder sind kleinere Risse und auch Brüche sowie Fehlstellen in der Faser zu vermerken.

Das dritte Bild in Abb. 5.10 zeigt ebenfalls die 500-fache Vergrößerung des Längsschnitts (Teilabschnitt b), allerdings an einer anderen Stelle. Hierbei sieht man in der unteren, noch geschlossenen ovalen Luftblase, dahinterliegend eine weitere Faser. Zudem sind wieder Risse und Brüche sowie Fehlstellen der Fasern zu erkennen. Auch ist erkennbar, dass teilweise die Enden der ovalen Fasern weggebrochen sind, wobei die Berandung zwischen Matrix und dem Eintauchen der Faser ersichtlich ist.

Im vierten Bild dieser Reihe wurde mit einer 3000-fachen Vergrößerung der Faserdurchmesser fünf ersichtlicher Faserstränge gemessen. Dieser liegt, auch wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, zwischen  $9\mu\text{m}$  und  $13\mu\text{m}$ . An einigen Stellen sind in diesem Bild auch Fehlstellen der Matrix ersichtlich. Diese treten sowohl im inneren der Matrix auf als auch an der Kontaktfläche zur anliegenden Faser.





**Abb. 5.10:** REM-Untersuchung an Probe a) Längsschnitt eines Einzelrovings getränkt in Epoxidharz 1) 70-fache Vergrößerung 2) 500-fache Vergrößerung Teilabschnitt (a) 3) 500-fache Vergrößerung Teilabschnitt (b) 4) 3000-fache Vergrößerung

**b) Längsschnitt eines Einzelrovings getränkt in biogenem Harz**

Das Übersichtsbild dieser Versuchsreihe Abb. 5.11 (1) wurde mit einer 70-fachen Vergrößerung aufgenommen. Man erkennt eine sehr hohe Dichte des Faserstrangs, und somit weniger große harzreiche Bereiche. Der Übergang zwischen Epoxidharz der eingebetteten Proben und biogenem Tränkungsmedium ist im oberen Abschnitt des Bildes zwischen den beiden oberen Luftblasen durch eine erkennbare Einkerbung ersichtlich. Die untere Berandung ist hingegen nicht direkt ersichtlich, ist aber in etwa auf Höhe der unteren Luftblase verortet. Auch hier sind Luftblasen zu erkennen.

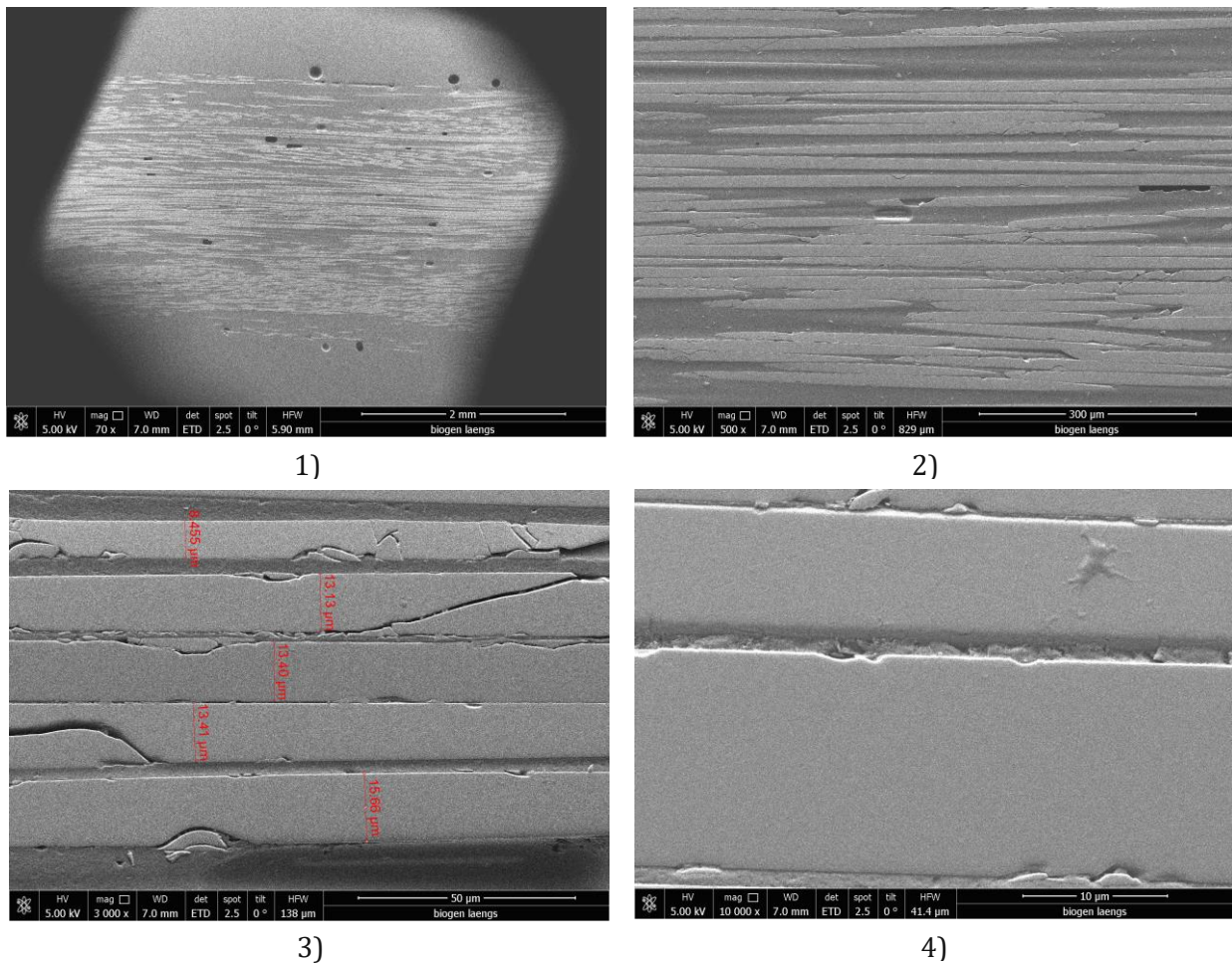
Im zweiten Bild dieser Reihe ist die 500-fache Vergrößerung eines Ausschnitts des Längsschnitts zu sehen. Die hohe Dichte des Faserstrangs ist auch hier ersichtlich. Teilweise liegen die Fasern sehr eng aneinander. Kleinere Partikel, die auf der biogenen Matrix zu sehen sind, stellen Staubpartikel dar, die sich durch die Probenpräparation dort abgelagert haben. Ebenso kann am rechten Rand des Bildes eine größere Fehlstelle in der biogenen Matrix festgestellt werden. Fehlstellen treten allerdings auch in unterschiedlichen Größen bei einigen Fasern auf. Diese machen sich durch das Fehlen von Stücken in den einzelnen Fasern bemerkbar, beispielsweise bei der Faser in der Mitte des Bildes. Unter anderem sind auch Risse und Brüche in den Fasern



ersichtlich. Neben kleineren Rissen an den Rändern der Faser, ist auch der durchgehende Bruch einiger Fasern erkennbar. Durch Vergrößerung des Maßstabs sind diese Risse, Brüche und Fehlstellen noch deutlicher erkennbar, siehe Abb. 5.11 (3).

Das dritte Bild in Abbildung 5.11, zeigt einen Ausschnitt in 3000-facher Vergrößerung, wo die Querschnittsabmessungen von fünf Fasern eingetragen sind. In diesem Bild sind in den unteren beiden Fasern auf der linken Seite sehr deutliche Brüche der Fasern zu sehen. Ebenfalls ist hierbei ersichtlich, dass das biogene Tränkungsmittel nicht in die Zwischenräume der Ausbrüche eingedrungen ist. In jener Faser mit der Querschnittsabmessung 13,13µm ist ein durchgehender Riss der Faser zu erkennen. Es ist auch hier ersichtlich, dass in den Spalt kein Tränkungsmittel eingedrungen ist. Die kleineren Partikel, die sich in dem Riss ansammelten, sind Schleifpartikel die durch die Probenpräparation entstanden. Der bereits beschriebene Kanteneffekt ist auch hier an den hellen Kanten der Fasern erkennbar.

Das vierte Bild in Abbildung 5.11 zeigt zwei Faserstränge in 10000-facher Vergrößerung. Der Kanteneffekt kommt hier deutlich zum Vorschein. Ebenso sind Partikel in dem Zwischenraum der beiden Fasern zu sehen. Hierbei handelt es sich wieder um die Schleifpartikel die während der Probenpräparation entstehen. Bei genauer Betrachtung des linken Bereichs der oberen Faser sind sehr dünne Schleifkratzer zu erkennen, die ebenfalls von der Probenpräparation stammen.



**Abb. 5.11:** REM-Untersuchung an Probe b) Längsschnitt eines Einzelroving getränkt in biogenem Harz  
 1) 70-fache Vergrößerung 2) 500-fache Vergrößerung 3) 3000-fache Vergrößerung 4) 10000-fache Vergrößerung

### c) Längsschnitt eines Rovings aus dem mit Epoxidharz getränkten textilen Flächengebilde

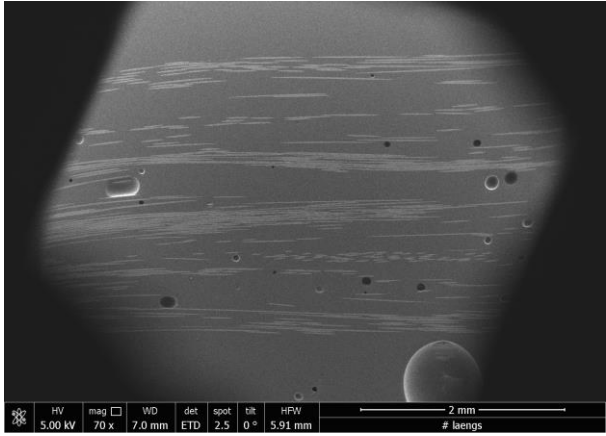
Das in 70-facher Vergrößerung aufgenommene Übersichtsbild Abb. 5.12 (1) zeigt stellenweise eine hohe Dichte der Fasern, mit dazwischenliegenden großen harzreichen Bereichen. Der Übergang vom Epoxidharz der Einbettung und dem Tränkungsmedium ist nicht direkt ersichtlich, wird aber auf der Höhe der äußersten Fasern im oberen und unteren Bereich verortet. Einschlüsse von Luft sind auch in diesem Übersichtsbild deutlich erkennbar.

Die 1000-fache Vergrößerung eines sehr dichten Bereichs des Faserstrangs ist in Abbildung 5.12 (2) zu sehen. Hierbei ist die gute Einbettung der Fasern im Tränkungsmedium ersichtlich, da der Kanteneffekt nur vereinzelt an den Rändern der Fasern auftritt. Ebenso auffällig ist, dass kaum Fehlstellen, Risse oder Brüche innerhalb der einzelnen Fasern zu sehen sind.

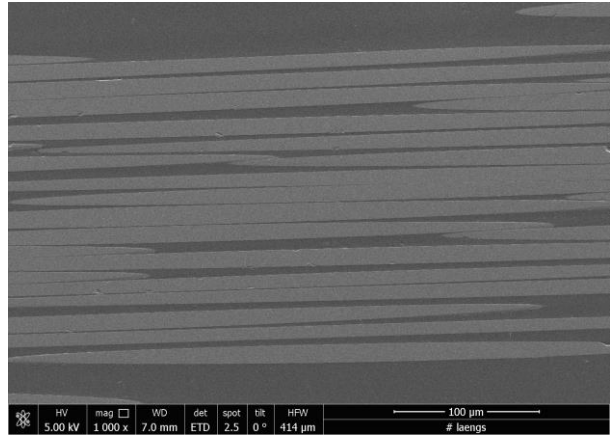
Das dritte Bild dieser Reihe zeigt in 500-facher Vergrößerung ebenfalls die gute Einbettung der Fasern im Tränkungsmedium. Nur vereinzelt sind hier Fehlstellen, Risse und Brüche am Rand der im unteren Bereich des Bildes auftretenden Fasern erkennbar. In der oberen Hälfte des Bildes sind die ersichtlichen Faserabschnitte deutlich kürzer als jene im unteren Teil des Bildes. Es wird davon ausgegangen, dass diese Tatsache zufällig auftrat. Weiters sind auch hier Luftblasen erkennbar, wobei hinter den zwei oberen Luftpneinschlüssen noch weitere Fasern liegen.

Die 4000-fache Vergrößerung der mittleren Luftblase ist in Abbildung 5.12 (4) (Teilabschnitt a) zu sehen. Diese Ansicht wird oben und unten von zwei Fasern begrenzt. Dazwischen befindet sich das Tränkungsmedium, in welchem der Einschluss der Luftblase zu sehen ist. Sehr deutlich sind die in der Luftblase hinterliegenden zwei Fasern bemerkbar. An den hellen Rändern der Luftblase, vor allem im unteren Bereich ist der Kanteneffekt ersichtlich. Weiters fällt auf, dass der obere Rand der Luftblase nicht direkt an den oberen Faserstrang angrenzt.

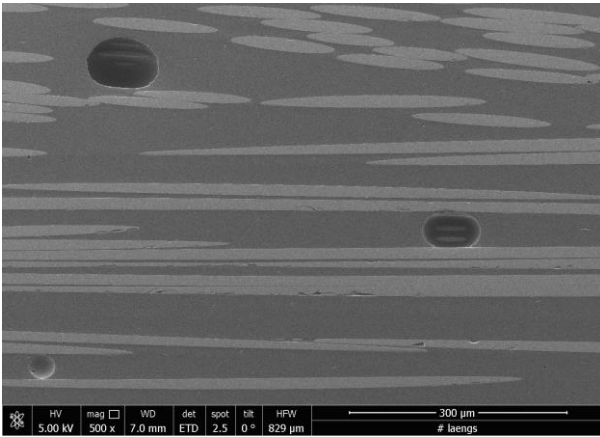
Das fünfte Bild in Abbildung 5.12 ist ebenfalls in 4000-facher Vergrößerung (Teilabschnitt b) aufgenommen. Es zeigt sehr dicht aneinander liegende Fasern. Hierbei ist ersichtlich, dass auch bei sehr geringem Abstand der Fasern dazwischen noch Tränkungsmedium vorhanden ist. Das letzte Bild dieser Reihe, zeigt sehr deutlich die an einer Faser auftretenden Risse, Brüche beziehungsweise Fehlstellen. Ebenso ist durch die Probenpräparation ein auftretender Schleifkratzer ersichtlich.



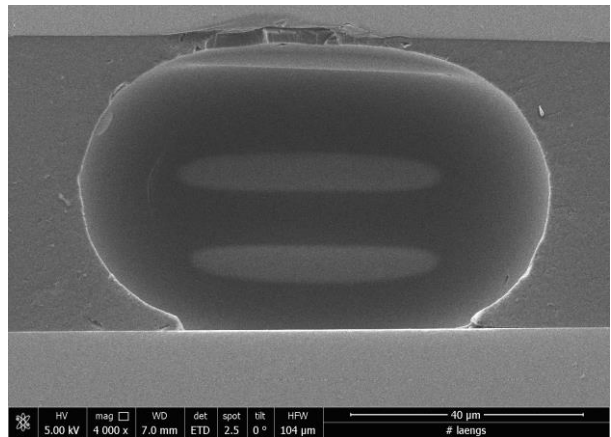
1)



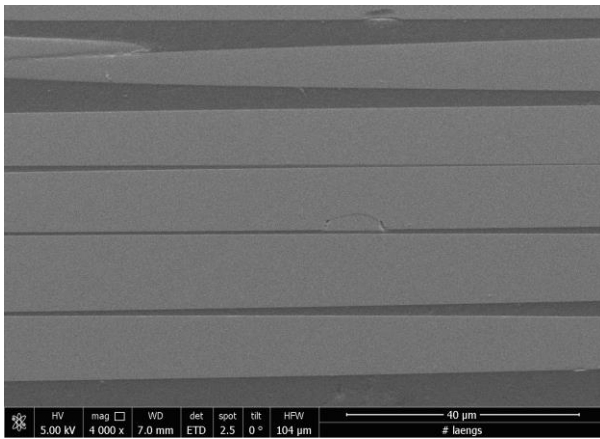
2)



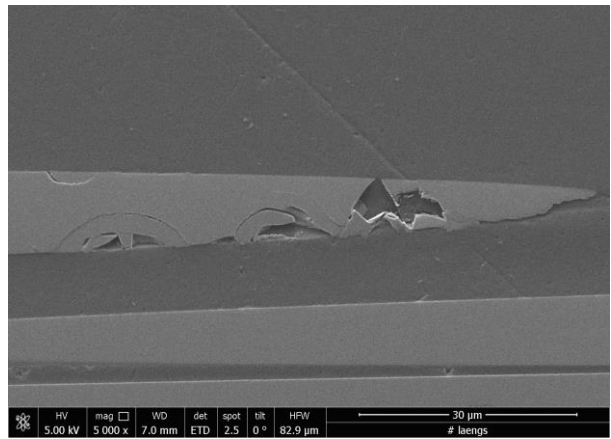
3)



4)



5)



6)

**Abb. 5.12:** REM-Untersuchung an Probe c) Längsschnitt eines Rovings aus dem mit Epoxidharz getränkten textilen Flächengebilde. 1) 70-fache Vergrößerung 2) 1000-fache Vergrößerung 3) 500-fache Vergrößerung 4) 4000-fache Vergrößerung Teilabschnitt (a) 5) 4000-fache Vergrößerung Teilabschnitt (b) 6) 5000-fache Vergrößerung

#### d) Querschnitt eines Einzelrovings getränkt in Epoxidharz

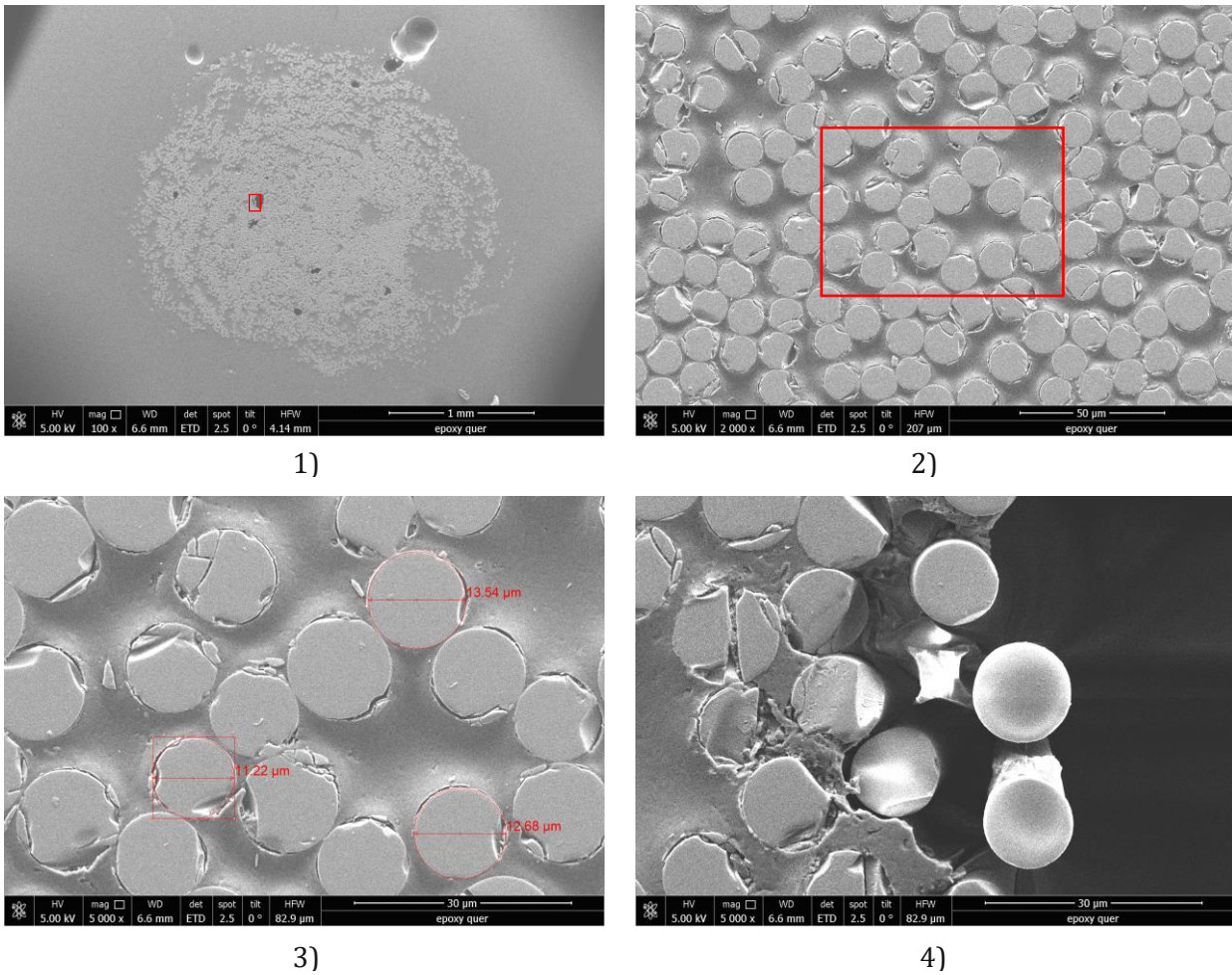
Ein Übersichtsbild des zu untersuchenden Querschnitts wurde in 100-facher Vergrößerung aufgenommen und ist in Abbildung 5.13 (1) zu sehen. Die hellen Punkte stellen jeweils den Querschnitt einer Faser des Rovings dar. Der graue Bereich bildet wieder das Tränkungsmedium, beziehungsweise das zur Einbettung der Proben verwendete Epoxidharz ab. Eine sichtbare Grenze zwischen Einbettungsmatrix und Tränkungsmedium ist im Bereich der äußeren Faserquerschnitte nicht zu erkennen. In dieser Darstellung ist über weite Bereiche eine sehr dichte Faserverteilung zu erkennen. Ein größerer harzreicher Bereich ist im unteren rechten Teil des Querschnitts auffällig, ansonsten sind lediglich kleinere harzreiche Einschließungen ersichtlich. Vereinzelt treten auch hier Luftblasen auf. Eine davon ist durch ein rotes Rechteck gekennzeichnet, um den Bereich des im vierten Bild dargestellten Ausschnitts zu kennzeichnen.

Die Einbettung der Fasern im Tränkungsmedium ist in 2000-facher Vergrößerung im zweiten Bild der Abbildung 5.13. Es ist hier sehr auffällig, dass bei einer Vielzahl der abgebildeten Fasern ein Spalt zwischen dem Faserrand und dem angrenzenden Tränkungsmedium besteht. Häufig haftet die Matrix also nicht über den gesamten Umfang an der Faser. Eine weitere Auffälligkeit wird durch den erkennbaren Kanteneffekt ersichtlich. Die teilweise dunkelgrauen Stellen im Bereich der Matrix und die helle Umrandung der einzelnen Fasern zeigen auf, dass die Ebene der Matrix und der Fasern nicht flächenbündig sind. Sehr auffällig sind auch die in diesem Bild häufig auftretenden Risse und Fehlstellen. Die Risse sind oft durchgehend und teilen die Faser in zwei Bereiche. Bei den ersichtlichen Fehlstellen sind ganze Teile einer einzelnen Faser weggebrochen, wobei die Umrandung der gesamten Faser weiterhin ersichtlich ist.

Das rote Rechteck in Bild 2 kennzeichnet den Bildausschnitt des dritten Bildes in Abbildung 5.13. Diese dritte Abbildung ist in 5000-facher Vergrößerung (Teilabschnitt a) dargestellt. Bei dieser Darstellung wurde an drei Fasern der Durchmesser des Querschnitts gemessen. Dieser liegt wieder im Bereich zwischen  $11\mu\text{m}$  und  $13\mu\text{m}$ . Deutlich zu erkennen ist auch hier an vielen Stellen der Spalt zwischen Faserrand und Tränkungsmedium. Gut ersichtlich sind auch abgebrochene Teile der Fasern, die auf der Oberfläche des Tränkungsmediums haften.

Die in Abb. 5.13 (1) dargestellte Luftblase wird im vierten Bild dieser Reihe (Teilabschnitt b) in einer 5000-fachen Vergrößerung dargestellt. Hierbei ist ein Teil der Fasern in der Tränkungsmatrix eingebettet während einige Fasern innerhalb der Luftblase zu liegen kommen. Die helle Erscheinung dieser Fasern verdeutlicht wiederum den Kanteneffekt. Alle Fasern, die hier in der Tränkungsmatrix eingebettet sind, weisen viele ausgeprägte Risse oder Fehlstellen auf. In diesen kommt es zu Ablagerungen der abgebrochenen Faserstränge und Schleifpartikel.





**Abb. 5.13:** REM-Untersuchung an Probe d) Querschnitt eines Einzelrovings getränkt in Epoxidharz  
 1) 100-fache Vergrößerung 2) 2000-fache Vergrößerung 3) 5000-fache Vergrößerung Teilabschnitt (a) 4) 5000-fache Vergrößerung Teilabschnitt (b)

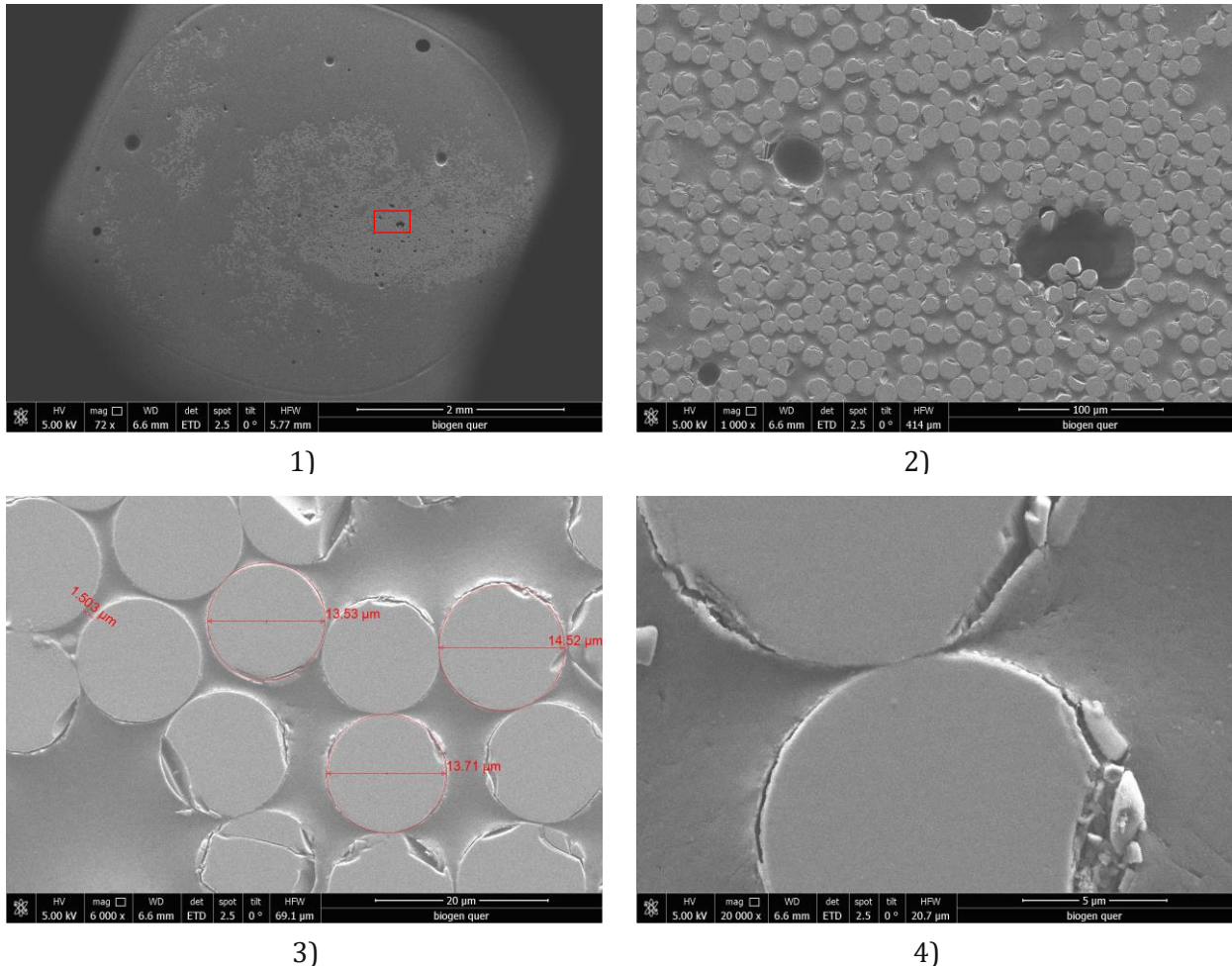
#### e) Querschnitt eines Einzelrovings getränkt in biogenem Harz

Das Übersichtsbild Abb. 5.14 (1) stellt den in biogenem Harz getränkten Roving in 72-facher Vergrößerung dar. Der ersichtliche Kreis am Rand des Bildes stellt die Grenze zwischen biogener Matrix und einbettendem Epoxidharz sehr deutlich dar. Innerhalb des Querschnitts ist klar erkennbar, dass die meisten Fasern sehr dicht aneinander liegen. Dabei befindet sich der Großteil der Faserquerschnitte in der Mitte des Bildes rechts liegend. Diesbezüglich liegen sehr große biogene harzreiche Bereiche innerhalb des Querschnitts vor. In diesen Bereichen treten größere Luftblasen auf als in den faserkonzentrierten Bereichen. Die rote rechteckige Form innerhalb dieses Bildes markiert den Ausschnitt des zweiten Bildes der Abbildung 5.14.

Das zweite Bild wurde mit einer 1000-fachen Vergrößerung aufgenommen. Es zeigt die hohe Dichte der Fasern in dem biogenen Harz. Das Tränkungsmedium ist bis auf die Stellen der Luftblasen überall ersichtlich. Nicht alle, aber einige der Faserquerschnitte weisen Risse und Fehlstellen auf. Besonders an diesen Stellen ist der Kanteneffekt sichtbar. Bei jenen Fasern, die eine Fehlstelle aufweisen, ist der Rand des gesamten Faserquerschnitts ersichtlich. Die auftretenden Risse sind häufig durchgehend. Mittig am unteren Rand des Bildes sind vereinzelt größere Faserquerschnitte erkennbar.

Das dritte Bild in Abbildung 5.14 zeigt die 6000-fache Vergrößerung eines Ausschnitts des Roving. In diesem Bild wurde an drei Fasern der Durchmesser des Querschnitts gemessen, welcher im Bereich zwischen  $13\mu\text{m}$  und  $14\mu\text{m}$  liegt. Ebenso wurde hier der Abstand zweier Fasern gemessen. Dieser beträgt circa ein Zehntel des durchschnittlichen Faserdurchmessers. Selbst in diesem kleinen Bereich kann das Tränkungsmittel festgestellt werden. An einigen Stellen kann aber ein kleiner Spalt zwischen Faser und Tränkungsmittel wahrgenommen werden und einige der Fasern weisen auch hier Risse und Fehlstellen auf. Der hellerscheinende Kanteneffekt und die unterschiedlich dunkelgraue Fläche des Tränkungsmittels lässt auch hier die Faseroberfläche nicht in derselben Ebene aufscheinen wie die umgebende Matrix.

Das vierte Bild der Abbildung 5.14 zeigt den Berührungspunkt zweier Fasern in 20000-facher Vergrößerung. Die Anbindung des Tränkungsmittels ist ebenfalls ersichtlich, obgleich hier ein Spalt zwischen Faser und Matrix erkennbar ist. Risse und Fehlstellen mit Ablagerungen sind ebenfalls ersichtlich.



**Abb. 5.14:** REM-Untersuchung an Probe e) Querschnitt eines Einzelrovings getränkt in biogenem Harz  
1) 72-fache Vergrößerung 2) 1000-fache Vergrößerung 3) 6000-fache Vergrößerung 4) 20000-fache Vergrößerung



#### f) Querschnitt eines Kreuzungspunktes aus dem mit Epoxidharz getränkten textilen Flächengebilde

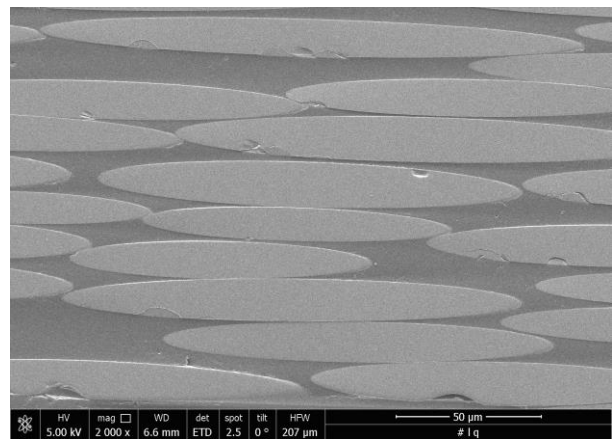
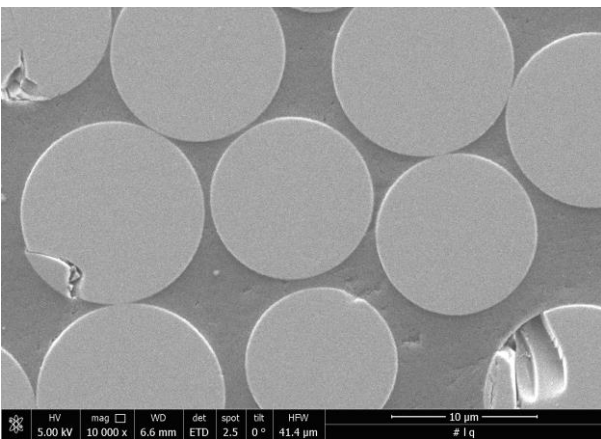
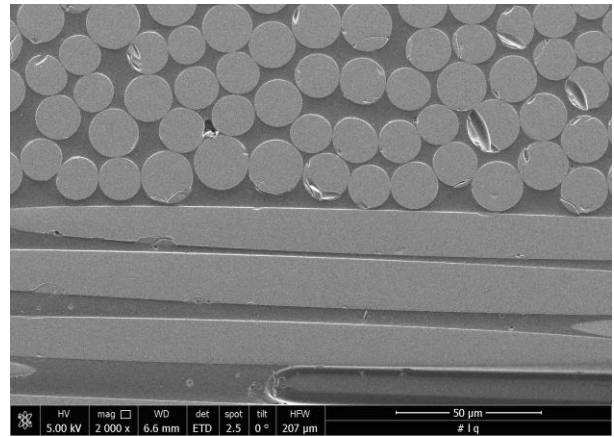
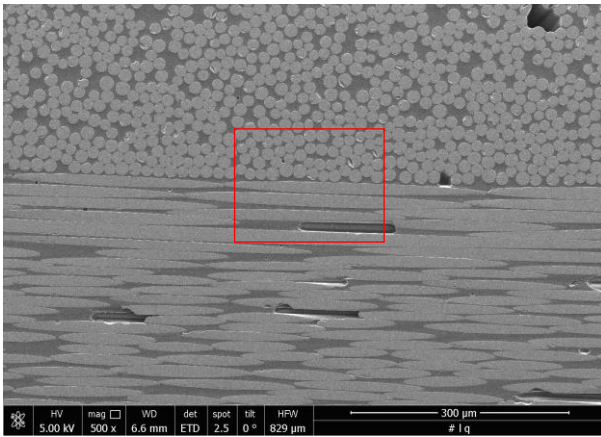
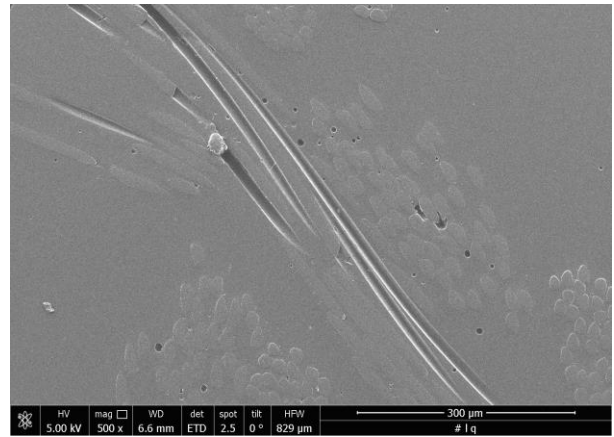
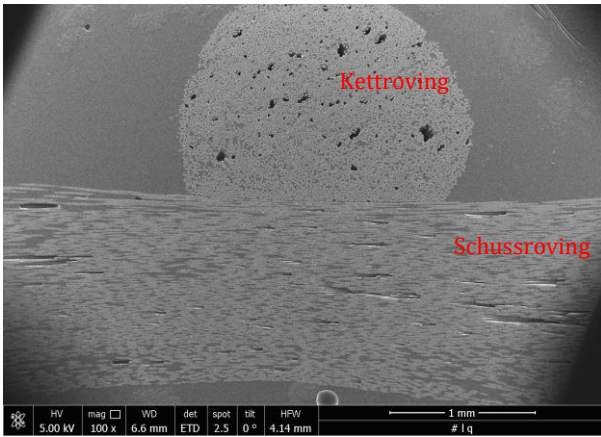
Weiters wurden REM-Untersuchungen an einem Kreuzungspunkt des mit Epoxidharz getränkten textilen Flächengebildes durchgeführt. Das erste Bild in Abbildung 5.15 stellt diesen Kreuzungspunkt in 100-facher Vergrößerung dar. Hierbei ist in Querrichtung der Schussroving und in Längsrichtung der Kettroving abgebildet. Der Querschnitt des Kettrovings ist nicht zur Gänze ersichtlich, es grenzt aber unmittelbar der Schussroving an. Der Schuss- und der Kettroving weisen beide eine sehr hohe Dichte an Fasern auf. Große harzreiche Bereiche sind in den beiden Richtungen nicht vorhanden. Weiters sind sowohl in beide Richtungen einige Luftblasen vorhanden. Auffällig hier ist ein dritter Bereich, der sowohl im oberen und auch leicht im unteren Bildrand erkennbar ist. Die dort erkennbaren Fasern, sind der eingebettete Stickfaden im Epoxidharz der Einbettungsmatrix. Eine Grenze zwischen eingebettetem Epoxidharz und dem Tränkungsmedium ist hier nicht ersichtlich.

Das zweite Bild in Abbildung 5.15 stellt eine 500-fache Vergrößerung (Teilabschnitt a) des rechten oberen Randes des ersten Bildes dar. Hierbei sind die einzelnen Fasern sowohl in Querrichtung als auch in Längsrichtung des Stickfadens dargestellt. Auffällig ist bei den Fasern in Längsrichtung, welche das Bild mittig durchziehen, dass teilweise nur noch die Berandung der Fasern in die Matrix ersichtlich ist. Es sind also Fehlstellen in den Längsfasern des Stickfadens vorhanden, welche auf die Probenpräparation zurückgeführt werden können. Der Querschnitt der Fasern ist auf der linken und rechten Seite der diagonal verlaufenden Fasern ersichtlich. Hier sind keine Fehlstellen an den Fasern ersichtlich. Einige Luftblasen sind durch schwarze Kreise ersichtlich.

Im dritten Bild der Abbildung 5.15 sind Fasern des Schussrovings und Fasern des Kettrovings in 500-facher Vergrößerung (Teilabschnitt b) ersichtlich. Die hohe Dichte der Fasern in beiden Rovings ist hierbei ebenfalls zu sehen. Der Kanteneffekt verdeutlicht in beiden Rovings einige Fehlstellen beziehungsweise Risse. Durch auftretende Luftblasen im Schussroving, sind darunterliegende Fasern erkennbar. Auch im Kettroving treten Luftblasen auf. Im ersten Bild der Abbildung 5.15 ist der eigentlich runde Umfang des Kettrovings abgeflacht ersichtlich, es grenzt der Schussroving unmittelbar an. Jedoch ist im dritten Bild der Abbildung 5.15 keine erhöhte Faserdichte im Übergangsbereich von Schuss- und Kettroving ersichtlich.

Eine 2000-fache Vergrößerung (Teilabschnitt c) des im dritten Bild rot markierten Bereichs ist in Abbildung 5.15 zu sehen. Es sind wenige Risse und Fehlstellen an den einzelnen Fasern zu erkennen. Auch zwischen Faser und Tränkungsmedium tritt kaum ein Spalten auf, was eine gute Haftung der Matrix an der Faser ersichtlich macht.

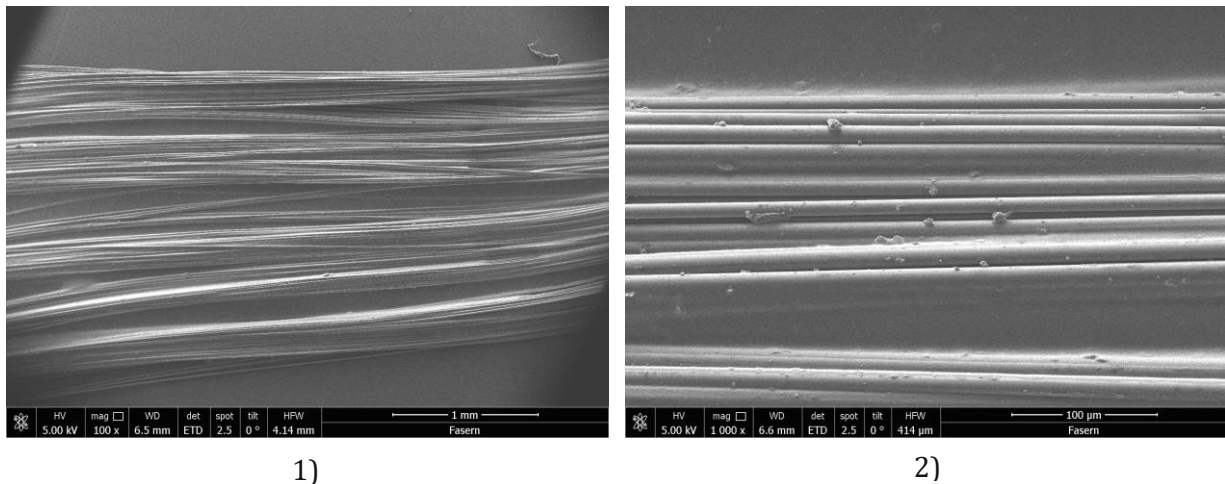
Die gute Haftung des Tränkungsmediums an den Fasern wird auch in Abbildung 5.15 (5) erkennbar. Hierbei sind die Querschnitte der Fasern des Kettrovings in 10000-facher Vergrößerung zu sehen. Neben wenigen erkennbaren Rissen an einigen Fasern, sind auch unbeschädigte Fasern perfekt in die Matrix eingebettet. Dies ist auch im sechsten Bild der Abbildung 5.15 zu sehen. Es zeigt den Längsschnitt einiger Fasern des Schussrovings in 2000-facher Vergrößerung (Teilabschnitt d). Wenige Fehlstellen und ganze Faserstücke prägen das Bild.



**Abb. 5.15:** REM-Untersuchung an Probe f) Querschnitt eines Kreuzungspunktes aus dem mit Epoxidharz getränkten textilen Flächengebilde. 1) 100-fache Vergrößerung 2) 500-fache Vergrößerung Teilabschnitt (a) 3) 500-fache Vergrößerung Teilabschnitt (b) 4) 2000-fache Vergrößerung Teilabschnitt (c) 5) 10000-fache Vergrößerung 6) 2000-fache Vergrößerung Teilabschnitt (d)

### g) ungetränkte beschlichtete Fasern

Zuletzt wurden ungetränkte Fasern, die lediglich mit einer Schlichte beschlichtet sind, untersucht. Diese wurden bei der Probenvorbereitung nicht in die Epoxidharz-Matrix eingebettet, sondern wie in Abbildung 5.9 ersichtlich auf die Probe mit Leitsilber aufgeklebt. Das Übersichtsbild in Abbildung 5.15 (1) zeigt die ungetränkten Fasern in 100-facher Vergrößerung. Die hellen Bereiche stellen den Kanteneffekt dar, welcher wiederum dort auftritt wo mehrere Fasern übereinander zu liegen kommen. Das zweite Bild der Abbildung 5.16 zeigt die Fasern in 1000-facher Vergrößerung. An der Oberfläche der Fasern sind keine Risse oder Fehlstellen ersichtlich. Die erkennbaren Partikel auf der Faseroberfläche stellen Verunreinigungen, wie beispielsweise Staubpartikel, dar.



**Abb. 5.16:** REM-Untersuchung an Probe g) ungetränkte beschlichtete Fasern. 1) 100-fache Vergrößerung 2) 1000-fache Vergrößerung

## 5.2.5 Interpretation

Zwischen einem Einzelroving und der textilen Bewehrung sind deutliche Unterschiede der Oberflächenstruktur der einzelnen Fasern und deren Einbettung im Tränkungsmedium auffällig. Weiters gilt es die Ursache für das Auftreten der Risse, Brüche und Fehlstellen festzustellen. Insbesondere wichtig zu wissen ist, ob diese bereits vor der Tränkung vorhanden waren oder durch die Probenpräparation entstanden sind. Die nachfolgenden Beurteilungen hierzu erfolgten in enger Abstimmung mit den MitarbeiterInnen am USTEM, da diese genau einschätzen können welche Risse, Brüche oder Fehlstellen durch die Probenpräparation auftreten. Anhand der erstellten Beobachtungen soll weiters festgestellt werden, ob ein Unterschied bei der Einbettung der Fasern im biogenen Tränkungsmedium beziehungsweise im Epoxidharz gedeutet werden kann. Um hierzu eine Einschätzung geben zu können, werden zunächst einige markante Beobachtungen interpretiert.

Die im Längsschnitt des dritten Bildes der Abbildung 5.10 erkennbaren Fehlstellen an den Rändern der Fasern dieses mit Epoxidharz getränkten Einzelrovings, sind durch die Probenpräparation aufgetreten, da die ursprüngliche Umrandung der Faser im Tränkungsmedium ersichtlich ist. Durch die Schleifkräfte sind die Faserenden hier teilweise herausgebrochen. Dieser Umstand tritt weniger häufig bei der mit biogenem Harz getränkten Faserprobe in Abbildung 5.12 auf. Ob dies zufällig auftrat, oder ob das biogene Tränkungsmedium besser an den Fasern haftet und es somit nicht zum Herausbrechen von Teilstücken während der Probenpräparation kommt, kann



nicht abschließend beurteilt werden. Hingegen ist die in Abbildung 5.11 2) dargestellte Fehlstelle in der Tränkungsmatrix nicht auf die Probenpräparation zurückzuführen, da nach Aussagen der MitarbeiterInnen vom USTEM durchgehende Risse während der Probenpräparation nicht entstehen. Kleinere Risse und Fehlstellen an den Kanten der Fasern sind jedoch sehr wohl beim Abschleifen während der Probenpräparation passiert. Ebenso sind die in Abb. 5.11 3) erkennbaren größeren Risse und Fehlstellen nicht auf die Probenpräparation zurückzuführen. Die Beschädigung der Fasern muss bereits im Vorhinein aufgetreten sein.

In Abbildung 5.13 ist der Querschnitt eines Einzelroving getränkt mit Epoxidharz zu sehen. Die im dritten Bild der Abbildung 5.13 erkennbaren kleineren Brüche und Fehlstellen lassen sich aus den bereits genannten Gründen auf die Probenpräparation zurückführen, durchgehende Risse hingegen nicht. In diesem Bild ist auch gut erkennbar, dass das Tränkungsmittel zwar bis zu den inneren Fasern durchdringen konnte, jedoch nicht ausreichend gut an den Fasern haftet, da ein deutlicher Spalt zwischen Faser und Tränkungsmittel erkennbar ist. Das vierte Bild in Abbildung 5.13 zeigt gut die Ablagerung von Schleifpartikeln in den Fehlstellen der Fasern. Die hierbei mittig der Fasern auftretenden größeren Risse sind auch hierbei nicht auf die Probenpräparation zurückzuführen, lediglich lagern sich hier Schleifpartikel an. Im Vergleich dazu weist Probe e), der Querschnitt eines Einzelroving getränkt mit biogenem Harz, deutlich weniger Beschädigungen an den Fasern auf. Diese Tatsache deutet auf eine bessere Haftung des biogenen Mittels hin.

Deutlich unterschiedlich sind die Ergebnisse an einem textilen Flächengebilde. Im Vergleich zu a) und b) treten beim Längsschnitt der Probe c) deutlich weniger Risse, Fehlstellen und Brüche sowie weniger ausgeprägte Kanteneffekte auf, was eine gute Einbettung der Fasern in der Matrix verdeutlicht.

Die Untersuchungen an einem Knotenpunkt der textilen Bewehrungsstruktur, Probe f), zeigen zudem deutlich, dass durch das Zusammenbinden der Rovings mit dem Stickfaden die Fasern komprimiert werden, und somit enger beisammen liegen als bei den Einzelrovings. Im Übersichtsbild der Abbildung 5.15 (1) ist der Querschnitt des Kettrovings abgeflacht, was das Andrücken an den Schussroving durch den Stickfaden verdeutlicht. Das Fehlen der Faser des Stickfadens im zweiten Bild in Abbildung 5.15, ist durch die Probenpräparation erklärbar. Hierbei haben die Schleifkräfte die Fasern teilweise aus dem Tränkungsmittel herausgelöst. Verglichen mit den Bildern der Querschnittsproben d) und e), ist in Abb. 5.15 (5) kein Spalt zwischen Faser und Matrix erkennbar. Dies verdeutlicht erneut, dass das Tränkungsmittel gut an den einzelnen Fasern haftet. Auch Bild 6 dieser Abbildungsreihe verdeutlicht die gute Anbindung des Tränkungsmittels an die Fasern.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass deutliche Unterschiede in der Tränkung eines Einzelrovings und einer textilen Bewehrungsstruktur (Knotenpunkt Probe f) und Roving aus dem Flächengebilde (Probe c) zu vermerken sind. In Rücksprache mit der für die Tränkung verantwortlichen Firma v-trion lässt sich dies auf folgende Tatsachen zurückführen: Die Verarbeitung und der Tränkungsprozess der Einzelrovings und dem textilen Flächengebilde ist teilweise unterschiedlich. Letzteres ist bereits im Rohzustand stabil. Die vielen Risse der Filamente in den Einzelrovings der Probe c) und Probe e), ist durch die Verarbeitung erklärbar. Die Einzelfilamente sind hier vermehrt mechanischen Belastungen ausgesetzt.

Etwaige Unterschiede hinsichtlich der Tränkung der Einzelrovings mit dem biogenen Harz und dem Epoxidharz lassen sich mit Hilfe elektronenmikroskopischer Untersuchungen, schwierig feststellen. Lediglich kann, wie bereits oben erwähnt, eine eventuelle bessere Haftung des biogenen Harzes an den Fasern geschlussfolgert werden. Für genauere Aussagen müssen aber weitere Untersuchungen an getränkten Probestücken unternommen werden.

## 5.2.6 Energiedispersive Röntgenmikroanalyse (EDX)

Die energiedispersive Röntgenmikroanalyse (kurz: EDX) wird zur Identifikation unbekannter Partikel angewendet. Mit einem im Rasterelektronenmikroskop eingebauten Detektor erfolgt die EDX-Analyse. Von im Periodensystem der Elemente auftretenden Elemente können von Bor (Element 5) bis Uran (Element 92) sämtliche Elemente nachgewiesen und quantifiziert werden. Mit Hilfe einer EDX-Analyse lassen sich somit Linienprofile erstellen, welche die Elementverteilung entlang einer Linie darstellen. Das Prinzip dahinter ist folgendes: Während des Elektronenbeschusses der Probe werden Röntgenstrahlen freigesetzt. Diese sind überwiegend elementspezifisch („charakteristische“ Röntgenstrahlung). Mit Hilfe eines energiedispersiven Halbleiter Detektors (EDX-Detektor) welcher Teil des REM ist, wird diese Strahlung gemessen. Durch den Detektor erkannte Strahlung wird in elektrische Impulse umgewandelt. Dabei ist die Höhe der Impulse proportional zur Energie der Röntgenstrahlung. Die Verarbeitung der Impulse erfolgt mittels aufwendiger Elektronik, sodass in kürzester Zeit die Erfassung eines gesamten Röntgenspektrums eines Mikrobereichs passiert. Die chemische Zusammensetzung eines Stoffes ergibt sich aus der charakteristischen Spektrallinie, und die vorhandene Menge der Elemente aus der integralen Intensität der Spektrallinien [39].

Im Zuge dieser Arbeit diente die EDX-Analyse zur Identifikation der in den Tränkungsmittele (Epoxidharz, und biogenes Harz) vorhandenen chemischen Elemente. Da die genaue chemische Zusammensetzung wie auch in diesem Fall, oft Firmengeheimnissen unterliegt, war das Ziel der EDX-Analyse einen Vergleich der chemischen Zusammensetzung zwischen dem Epoxidharz und dem biogenen Harz zu erhalten. Folgende Proben wurden einer EDX-Analyse unterzogen:

- a) Epoxidharz mit welchem der Einzelroving getränkt wurde
- b) Biogenes Harz mit welchem der Einzelroving getränkt wurde
- c) Epoxidharz mit welchem das textile Flächengebilde getränkt wurde
- d) Epoxidharz welches als Einbettungsmatrix der Proben verwendet wurde

Für diese Analyse wurden die eingebetteten Proben, wie sie in Abbildung 5.9 dargestellt sind, herangezogen. Dazu wurde ein Bereich, in welchem ausschließlich das jeweilige Tränkungsmittele vorhanden war für die Analyse ausgewählt. Die generierten Linienprofile sind Teil des ausgegebenen Reports und sind in Anhang A enthalten. Hierbei ist wichtig zu erwähnen, dass das Auftreten von Gold und Palladium in den Linienprofilen durch das Beschichten der Proben mit diesen Elementen auftritt (siehe Kap. 5.2.3). Im Folgenden werden die einzelnen Ergebnisse dargestellt und verglichen.

In Tabelle 5.1 sind die einzelnen Elemente in Massenprozent der jeweiligen Polymermatrizen a) - d) ersichtlich. Sehr auffällig hierbei ist, dass Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung der Epoxidharze von Probe a) und c) auftreten. Neben geringen Unterschieden der Massenanteile der beiden Epoxidharze ist weiters das Auftreten unterschiedlicher chemischer Elemente auffällig. In beiden Epoxidharzen kommen Kohlenstoff C, Natrium N, Sauerstoff O und Silizium Si, zu ungefähr gleichen Anteilen vor. Weiters treten jedoch im Epoxidharz, mit welchem der Einzelroving getränkt wurde (Probe a), zusätzlich noch geringe Anteile Schwefel S und Chlor Cl auf. Vergleicht man das mit der chemischen Zusammensetzung des Epoxidharzes der Einbettungsmatrix (Probe d) und auch der in Kapitel 4.2.1 in Abbildung 4.2 dargestellten Struktur von Epoxidharz ergibt das Auftreten von Chlor durchaus Sinn. Das Häufigste zur Anwendung

komme Epoxydharz ist jenes bei welchem Bisphenol A mit Epichlorhydrin zu einem solchen reagieren. Die Ergebnisse wurden der für die Tränkung zuständigen Firma „v-trion“ vorgelegt. Die unterschiedlichen Massenanteile und das Fehlen von Chlor und Schwefel in Probe c) wurden wie folgt erklärt: grundsätzlich wurden zur Tränkung des Einzelroving und dem textilen Flächengelege unterschiedliche Chargen des Epoxydharzes angemischt. Dies würde die unterschiedlichen Massenanteile in a) und c) erklären. Das Fehlen von Schwefel und Chlor in Probe c) kann durch einen möglichen Ausdampfungsprozess, der durch unsachgemäße Harzlagerung zwischen den beiden Chargen auftrat, zustande gekommen sein.

Vergleicht man das biogene Harz mit den Epoxydharzen lassen sich keine großen Auffälligkeiten zu den Epoxydharzen feststellen. Die geringen Unterschiede in den Massenanteilen lassen keine Aussagen über etwaige Unterschiede zwischen biogenem Tränkungsmittel und dem konventionellem Epoxydharz rückschließen. Ein derartiger Vergleich wäre nur möglich, wenn mehrere biogene Tränkungsmittel und Epoxydharze einer EDX-Analyse unterzogen würden, und man somit gemeinsame Charakteristika je Kategorie feststellen kann. Ein umfanglicher Vergleich zwischen biogenem Tränkungsmittel und konventionellem Epoxydharz wäre zudem nur möglich, wenn die chemische Verbindung der beiden bekannt wäre.

**Tabelle 5.1:** Ergebnisse der EDX-Analyse. a) Epoxydharz mit welchem der Einzelroving getränkt wurde, b) biogenes Harz mit welchem der Einzelroving getränkt wurde, c) Epoxydharz, mit welchem das textile Flächengebilde getränkt wurde, d) Epoxydharz welches als Einbettungsmatrix der Proben verwendet wurde

		Polymermatrix			
		a)	b)	c)	d)
Detektierte Elemente in Massenprozent [%]	C	72,4	80,1	79,9	82,8
	N	5,0	5,1	3,8	2,3
	O	19,4	14,5	16,2	13,9
	Si	0,3	0,1	0,1	0,1
	S	0,3	-	-	-
	Cl	2,7	0,2	-	0,9

Abschließend kann gesagt werden, dass sich das biogene Harz und das konventionelle Epoxydharz in der Zusammensetzung durchaus ähneln. Für einen genauen Vergleich sind jedoch detailliertere chemische Analysen und Aufschlüsselungsverfahren der einzelnen Komponenten notwendig. Mit solchen Verfahren lässt sich auch eher herausfinden, wie nachhaltig das biogene Harz im Vergleich zum Epoxydharz ist.



# 6 Experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten

In diesem Kapitel werden die im Zuge dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Versuche zur mechanischen Charakterisierung von textildbewehrten Bauteilen vorgestellt. Zur Beschreibung des Tragverhaltens von Versuchskörpern mit biogen getränkten Textilien wurden neben Zugversuchen auch Versuche zum Verbundverhalten sowie Verankerungsversuche durchgeführt. Die einzelnen Ergebnisse der biogenen Versuchsreihen werden mit Ergebnissen von Versuchskörpern verglichen, die eine Bewehrungsstruktur getränkt mit Epoxidharz aufwiesen, und die im Zuge einer weiteren Masterarbeit [40] am Institut für Tragkonstruktionen der Technischen Universität Wien erarbeitet wurden.

Zu Beginn des Kapitels werden die verwendeten Materialien vorgestellt. Druck- und Biegezugversuche an Probekörpern wurden durchgeführt, um die mechanischen Eigenschaften des verwendeten Feinbetons zu klassifizieren. Anschließend wird die Durchführung der Zug- und Verbund- sowie Verankerungsversuche vorgestellt. Abschließend werden jeweils die Ergebnisse anhand von Diagrammen und Tabellen dargestellt und interpretiert.

## 6.1 Materialien

### 6.1.1 Feinbeton

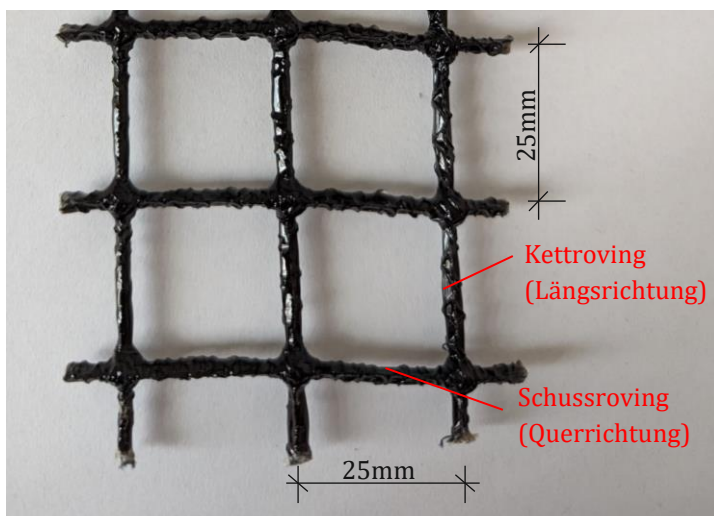
Für die experimentellen Untersuchungen, wurde durchgehend dieselbe Rezeptur verwendet. Wie bereits in Kapitel 2.1.1 erwähnt, muss der Beton bestimmte Anforderungen aufweisen, um kompatibel mit textiler Bewehrung zu sein. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurde die in Tabelle 6.1 dargestellte Zusammensetzung des Feinbetons gewählt. Die verwendete Zementart zeichnet sich durch einen geringen Klinkeranteil aus. Gemäß ÖNORM EN 197-5 verdeutlicht das „C“ einen Klinkeranteil von 50-64 Massenprozent. Es wurde ein Mehrkomponentenzement „M“ verwendet, mit den Bestandteilen Hüttensand „S“ und Kalkstein „LL“.

**Tab. 6.1:** Zusammensetzung der Betonrezeptur

Komponenten	kg/m <sup>3</sup>
CEM II/C-M (S-LL) 42,5 R	353
Kalksteinmehl	172
Quarzsand	175
Sand 0/2 <sup>1)</sup>	625
Kies 2/8 <sup>2)</sup>	900
Wasser	150
Fließmittel (PCE-Basis) <sup>3)</sup>	8
<sup>1)</sup> Größe der Sandkörner zwischen 0-2 mm <sup>2)</sup> Größe der Kieskörner zwischen 2-8 mm <sup>3)</sup> PCE = Polycarboxylatether	

### 6.1.2 Getränkte Bewehrungstextilien

Als Fasermaterial für die textile Bewehrung wurde Basalt eingesetzt. Die verwendeten Basaltrovinge wurden von der Firma „basalt fibertec“ bezogen. Ein Roving beinhaltet 12000 Filamente, wobei für die Weiterverarbeitung zu Textilien jeweils zwei Rovinge assembliert wurden. Die dadurch entstandenen Faserstränge besaßen eine Feinheit von 4800 tex. Mit einer vom Hersteller angegebenen Dichte von 2,63 g/cm<sup>3</sup> für Basalt ergibt sich die Querschnittsfläche eines einzelnen Faserstrangs gemäß Formel 2.2 zu 1,83 mm<sup>2</sup>. Die Schuss- und Ketrovinge wurden jeweils in einem Abstand von 25 mm zu einem textilen Flächengebilde zusammengestickt. Die Tränkung der textilen Flächengebilde wurde von der Firma „v-trion“ in Vorarlberg durchgeführt. Die genaue Zusammensetzung des hierbei verwendeten biogenen Harzes unterliegt wie bereits erwähnt Firmengeheimnissen und konnte nicht in Erfahrung gebracht werden, jedoch wurde die chemische Zusammensetzung in Kapitel 5.2.6 untersucht. In Abbildung 6.1 ist ein Ausschnitt des getränkten textilen Flächengebildes dargestellt.



**Abb. 6.1:** Getränkte textile Bewehrung aus Basaltfasern

## 6.1.3 Prüfkörperherstellung

Abbildung 6.2 zeigt die Betonage der Prüfkörper am 15. Mai 2023 bei der Firma Doka GmbH in Amstetten. Das Anmischen des Betons erfolgte dabei in einem Zwangsmischer. Als Schalungsmaterial wurden beschichtete Holzfaserplatten verwendet. Die Größe der Schalung entsprach den endgültigen Abmessungen der Probekörper. Der Beton wurde im Gießverfahren in die Schalung eingebracht. Im Vorfeld wurde die Bewehrung in der Schalung positioniert, wobei darauf geachtet wurde, dass die Bewehrung auf die ganze Länge gesehen mittig in der Schalung zu liegen kommt. Mit Abstandhaltern aus Kunststoff konnte dies bewerkstelligt werden. Ebenfalls wurde im Vorhinein bei jenen Prüfkörpern, die für die Verbundversuche herangezogen wurden, eine Sollbruchstelle durch das Einbringen eines schmalen Kunststoffelements initiiert. Zur Herstellung aller in dieser Arbeit untersuchten Prüfkörper war es notwendig zwei Chargen der Betonrezeptur anzumischen. Um zu vermeiden, dass die Bewehrung durch den Beton aufschwimmt, wurden Holzleisten nachträglich auf der Schalung befestigt. Nach 35 Tagen wurden die Prüfkörper ausgeschalt. Die Lagerung erfolgte bei Raumtemperatur.



**Abb. 6.2:** Betonage bei der Firma Doka GmbH

## 6.2 Betonkennwerte

### 6.2.1 Geometrie der Probekörper, Versuchsdurchführung

Zur Bestimmung der mechanischen Kennwerte des Betons wurden Druck- und Biegezugversuche an Betonwürfelproben beziehungsweise Prismen durchgeführt. Aus den beiden angemischten Chargen der Betonrezeptur wurden hierzu Würfelproben mit einer Kantenlänge von 150 mm und Prismen mit Abmessung 40x40x160 mm<sup>3</sup> betoniert. Pro Charge sind jeweils drei Probekörper untersucht worden. Die Untersuchungen wurden gemäß ÖNORM EN 12390 durchgeführt. Das Betonalter am Tag der Prüfung betrug 37 Tage. Bei den Druckversuchen wurden die einzelnen Probekörper in einer Druckprüfmaschine kraftgesteuert mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 35 kN/s bis zum Bruch belastet. Es wurde die Höchstlast aufgezeichnet und die Druckfestigkeit des Betons berechnet. Für übliche Genauigkeitsberechnungen lassen sich die weiteren Eigenschaften wie Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul anschließend von der Druckfestigkeit ableiten [41]. Die Biegezugversuche erfolgten an den Prismen in einem 3-Punkt-Biegeversuch. Dabei wurden die Prismen auf zwei Auflagern positioniert, während mittig eine Last aufgebracht wurde.

## 6.2.2 Versuchsergebnisse

Gemäß Formel 6.1 wird die beim Bruch der Probe gemessene Höchstlast herangezogen um die Würfeldruckfestigkeit  $f_{c,cube}$  der Probe zu bestimmen. Die mittlere Betondruckfestigkeit  $f_{cm,cube}$  entspricht dem Mittelwert der Würfeldruckfestigkeiten aller Proben (siehe Tabelle 6.2). Die Zylinderdruckfestigkeit kann vereinfacht aus der ermittelten Würfeldruckfestigkeit gemäß Formel 6.2 berechnet werden. Wie bereits im vorherigen Abschnitt erwähnt, kann der Elastizitätsmodul und die Betonzugfestigkeit anschließend anhand der Betondruckfestigkeit abgeschätzt werden. Hierzu gelten die Bestimmungen gemäß ÖNORM EN 1992 welche in Formel 6.3 und 6.4 dargestellt sind. In Tabelle 6.2 sind die ermittelten Materialkennwerte dargestellt. Zusätzlich sind die Ergebnisse aus der Biegezugprüfung  $f_{ctm,fl}$  gelistet. Abbildung 6.3 zeigt das Bruchbild einer Würfelprobe. Es sind die typischen regelförmigen Ausbrüche einer Würfelprobe erkennbar. Die grüne Farbe des Betons, welche im Bruchbild erkennbar ist, kann auf Schwefelverbindungen aus der Flugasche zurückgeführt werden.

$$f_{cm,cube} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{F_{max,i}}{A_{c,cube,i}} \quad (6.1)$$

mit:

$f_{cm,cube}$  mittlere Würfeldruckfestigkeit in [N/mm<sup>2</sup>]

$F_{max}$  Bruchlast in [N]

$A_{c,cube}$  Querschnittsfläche der Probe in mm<sup>2</sup>

$$f_{cm} = 0,8 * f_{cm,cube} \quad (6.2)$$

mit:

$f_{cm}$  mittlere Zylinderdruckfestigkeit

$$E_{cm} = 22000 * \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3} \quad (6.3)$$

mit:

$E_{cm}$  Mittelwert des Elastizitätsmoduls in [N/mm<sup>2</sup>]

$$f_{ctm} = 2,12 * \ln\left(1 + \frac{f_{cm}}{10}\right) \quad (6.4)$$

mit:

$f_{ctm}$  Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit des Betons [N/mm<sup>2</sup>]

**Tab. 6.2:** Ergebnisse der Druck- und Biegezugversuche

	Proben- bezeichnung	Gewicht [g]	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	F <sub>max</sub> [kN]	f <sub>c,cube</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	f <sub>c</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]
Charge 1	W1	7724	2,29	1589,13	70,63	56,50
	W2	7736,8	2,29	1598,61	71,05	56,84
	W3	7717	2,29	1591,53	70,73	56,58
Charge 2	W4	7965	2,36	1802,44	80,11	64,09
	W5	7885	2,34	1785,31	79,35	63,48
	W6	7864	2,33	1768,19	78,59	62,87
$f_{cm,cube} = 75,08 \text{ N/mm}^2$						
$E_{cm} = 40278,58 \text{ N/mm}^2$						
$f_{ctm} = 4,54 \text{ N/mm}^2$						
$f_{ctm,fl} = 11,14 \text{ N/mm}^2$ <sup>1)</sup>						
<p><sup>1)</sup> Biegezugfestigkeit ermittelt an drei Prismen mit 40x40x160 mm<sup>3</sup>.  Ergebnisse der drei Einzelversuche:  P1: <math>f_{ct,cl} = 11,37 \text{ N/mm}^2</math>  P2: <math>f_{ct,fl} = 10,39 \text{ N/mm}^2</math>  P3: <math>f_{ct,fl} = 11,67 \text{ N/mm}^2</math></p>						



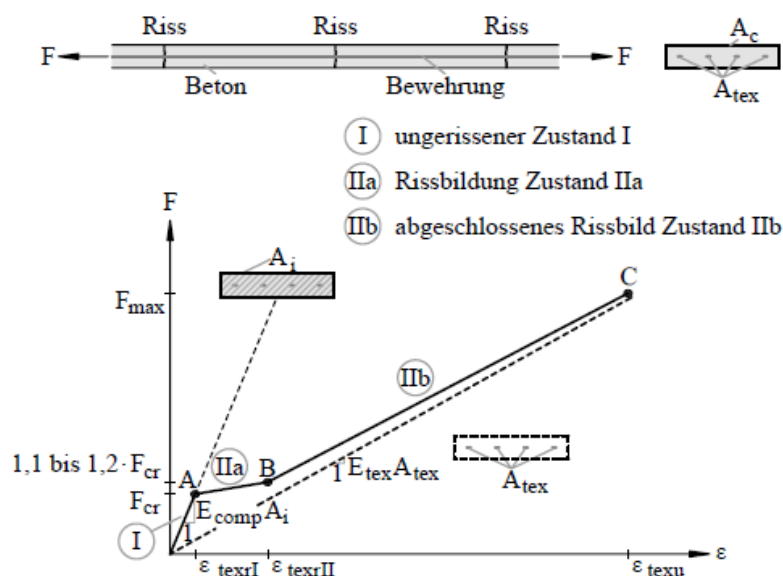
**Abb. 6.3:** Bruchbild der Würfelprobe W5

## 6.3 Zugversuche

Die textile Bewehrung ist für die Aufnahme der Zugkräfte im Verbundquerschnitt verantwortlich. Somit ist die Analyse des Zugtragverhaltens von großer Bedeutung, um das Werkstoffverhalten üblicherweise zu beschreiben. Anhand von einaxialen Zugversuchen (Dehnkörperversuchen) an dünnwandigen Plattenstreifen wird das Zugtragverhalten von textilbewehrtem Beton charakterisiert.

### 6.3.1 Allgemeines zum Zugtragverhalten

Das Tragverhalten von Textilbeton unter einaxialer Zugbelastung ähnelt über weite Bereiche jenem des Stahlbetons. In Abbildung 6.4 wird jedoch ersichtlich, dass die Arbeitslinie nur in drei anstelle von vier Bereichen unterteilt werden kann. Diese Tatsache ist darauf zurückzuführen, dass die textile Bewehrung im Gegensatz zum Stahl kein Fließvermögen besitzt.



**Abb. 6.4:** Qualitativer Verlauf der Zugkraft-Dehnungslinie, entnommen aus [6]

Der Zustand I der in Abbildung 6.4 dargestellten Arbeitslinie verdeutlicht den ungerissenen Zustand des Verbundquerschnitts ( $F \leq F_{cr}$ ). Zwischen Beton und textiler Bewehrung herrscht in diesem Abschnitt über die gesamte Länge Dehnungskompatibilität. Bis zum Erreichen der Erstrisskraft  $F_{cr}$  zeigt der Verbundquerschnitt ein nahezu linear elastisches Verhalten. Kulas beschreibt in [2] dass sich der Elastizitätsmodul des Verbundwerkstoffes  $E_{comp}$  im Zustand I gemäß Gleichung 6.5 ergibt.

$$E_{comp} = E_{tex} * \frac{A_{tex}}{A_{tex} + A_c} + E_c * \frac{A_c}{A_{tex} + A_c} \quad (6.5)$$

mit:

$E_{tex}$  Elastizitätsmodul der textilen Bewehrung

$E_c$  Elastizitätsmodul des Beton

$A_{tex}$  Querschnittsfläche der textilen Bewehrung

$A_c$  Bruttoquerschnittsfläche Beton



Hierbei wird die Summe der Elastizitätsmodule von Textil  $E_{\text{tex}}$  und Beton  $E_c$ , über die jeweiligem Flächenanteile gewichtet. Das Erreichen des Erstrisses ist in der Abbildung 6.4 durch den Punkt A gekennzeichnet. An diesem Punkt ist ein Auftreten der ersten Risse zu vermerken, da die vorhandene Zugspannung die Betonzugfestigkeit überschreitet. Kommt es nach dem Erreichen der Erstrisskraft zu einer weiteren Laststeigerung und infolgedessen zu einer fortschreitenden Rissbildung befindet sich der Verbundkörper im Zustand IIa. Das Auftreten weiterer Risse geschieht bis zu jenem Punkt, an dem die Verbundwirkung zwischen Beton und textiler Bewehrung nicht mehr ausreicht, um zwischen bereits vorhandener Risse so viel Last einzuleiten, sodass erneut die Betonzugfestigkeit erreicht wird. In der Abbildung 6.4 wird dieser Zustand durch die lineare Verbindung der Punkte A und B definiert. Wenn in keinem Querschnitt des Dehnkörpers mehr die Zugbruchdehnung erreicht werden kann, spricht man von einem abgeschlossenen Rissbild, auch Zustand IIb genannt. Die Dehnung des Betons und der textilen Bewehrung sind in diesem Zustand an jeder Stelle unterschiedlich. Bei weiterer Laststeigerung wird die Kraft im Riss von der textilen Bewehrung aufgenommen, sodass sich die bestehenden Risse weiter aufweiten. Die Spannungs-Dehnungslinie verläuft deshalb nahezu parallel zu jener der reinen Bewehrung. Der sogenannte Tension-Stiffening-Effekt, wie er auch im Stahlbeton auftritt, beschreibt das Mitwirken des Betons zwischen den Rissen. Dieser Effekt erklärt die horizontale Verschiebung der beiden Geraden. Dieser Effekt begründet auch die theoretisch höhere Steifigkeit des Dehnkörpers gegenüber dem Material der textilen Bewehrung [6].

Für das letztendliche Versagen des Dehnkörpers können drei Versagensmechanismen unterschieden werden [6]:

- **Zugbruchversagen:** hierbei führt die maximal gemessene Zugkraft  $F_{\text{max}}$  zum Bruch der Fasern der textilen Bewehrungsstruktur. Dieser Bruch erfolgt bei textiler Bewehrung schlagartig, da kein plastisches Arbeitsvermögen bei den typischerweise verwendeten Fasern vorhanden ist.
- **Delaminations- oder Spaltversagen:** hierbei treten im Dehnkörper vertikale Spaltrisse (Längsrisse) oder Trennrisse in den Bewehrungslagen auf. Herstellungsbedingte geometrische und physikalische Unterschiede der textilen Bewehrung beeinflussen diesen Versagensmechanismus.
- **Verankerungsversagen:** ist die Verankerungslänge der textilen Bewehrung im Dehnkörper nicht ausreichend, tritt diese Form des Versagens ein. Im Gegensatz zum Faserbruch, wird hierbei die Bewehrung aus dem Beton gezogen. Die Rovingfeinheit und die Tränkungsvarianten haben einen wesentlichen Einfluss auf die erforderliche Verankerungslänge.

### 6.3.2 Geometrie der Probekörper, Versuchsdurchführung

Im Zuge dieser Arbeit wurden Dehnkörper, welche mit biogen getränkten textilen Bewehrungsstrukturen bewehrt waren, untersucht. Hierbei wurden drei Prüfserien mit planmäßig zwei Einzelversuchen durchgeführt. In zwei Serien kam es zu vorzeitigen Brüchen, weshalb hier nur zwei Probekörper in der Auswertung berücksichtigt werden konnten. Die Ergebnisse werden mit Prüfserien verglichen, welche sich lediglich durch eine Epoxidharz Tränkung der textilen Bewehrungsstruktur unterscheiden. Die Dehnkörperversuche an mit Epoxidharz getränkten textilen Bewehrungen wurden im Zuge einer weiteren Masterarbeit am

Institut für Tragkonstruktionen der Technischen Universität untersucht [40]. Die Zwischenergebnisse werden in dieser Arbeit nicht explizit aufgelistet.

Die Dehnkörperversuche unterscheiden sich in der Geometrie der jeweiligen Prüfkörper und der Anzahl der Bewehrungslagen. Tabelle 6.3 zeigt die jeweiligen Abmessungen der Prüfkörper und der sich ergebende geometrische Längsbewehrungsgrad. Auch die Geometrien und Bewehrungslagen der Probekörper mit Epoxidharz getränkter Bewehrung werden aufgelistet. Die Bezeichnung der jeweiligen Prüfkörper sind durch den Buchstaben D gekennzeichnet. Prüfkörper gleicher geometrischer Abmessungen und einer übereinstimmenden Bewehrungslage werden zu einer Prüferserie zusammengefasst, V1-V3.

Der geometrische Längsbewehrungsgrad errechnet sich nach Formel 6.6. Er beschreibt das Verhältnis der im Querschnitt vorhandenen Fläche der textilen Bewehrung zur Brutto-Querschnittsfläche des Betons. Erstere ergibt sich aus der Multiplikation der Querschnittsfläche eines einzelnen Rovings (Formel 2.2) mit der im Querschnitt vorhandenen Anzahl der Einzelrovings. Die Bruttoquerschnittsfläche des Betons ist jene Fläche, die das Vorhandensein der textilen Bewehrung unberücksichtigt lässt. Die Eingangsgrößen zur Berechnung des geometrischen Bewehrungsgrades sind im Anhang B in Tabelle 1+2 dargestellt.

$$\rho_l = \frac{A_{tex}}{A_c} \quad (6.6)$$

mit:

$A_{tex}$  Querschnittsfläche der textilen Bewehrung

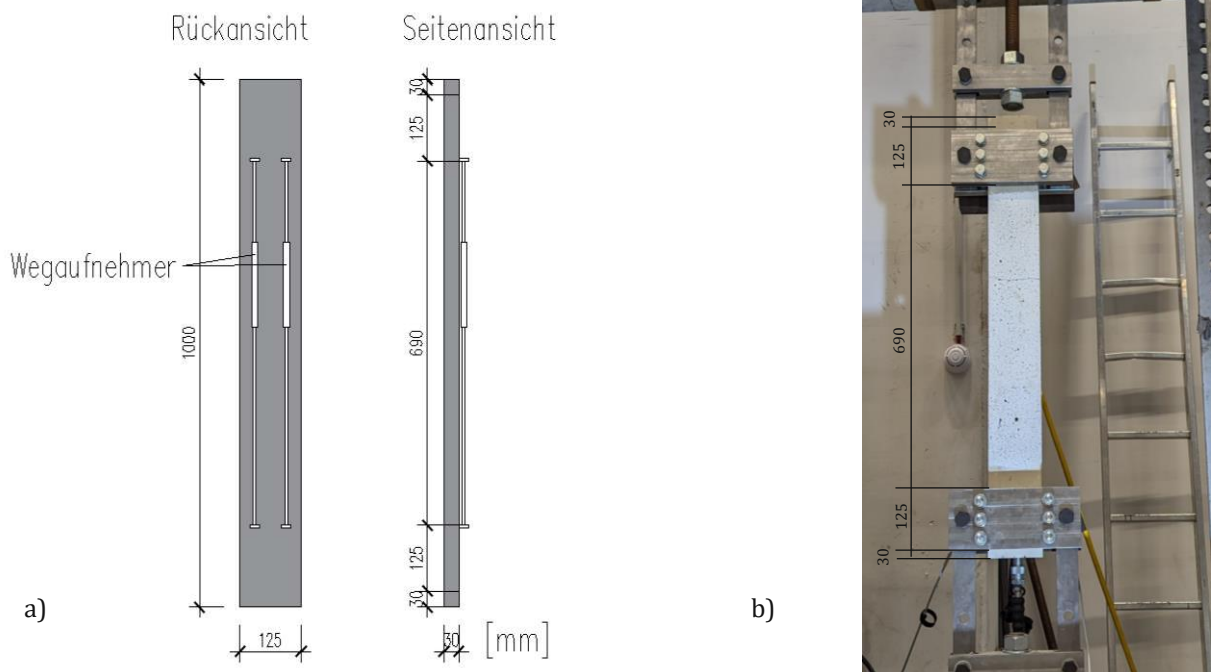
$A_c$  Bruttoquerschnittsfläche Beton

**Tab. 6.3:** Prüferserien der Zugversuche und Geometrie der Probekörper

Tränkung	Bezeichnung/ Prüferserie	Proben- länge l [mm]	Proben- breite b [mm]	Proben- stärke t [mm]	Anzahl Bewehrungs- lagen [-]	Geometrischer Bewehrungsgrad $\rho_l$ [‰]
biogen	D16 / V1-B	1000	125	30	1	2,43
biogen	D17 / V1-B	1000	125	30	1	2,43
biogen	D21 / V1-B	1000	125	30	1	2,43
biogen	D18 / V2-B	1000	125	30	2	4,89
biogen	D19 / V2-B	1000	125	30	2	4,89
biogen	D22 / V3-B	1000	125	40	2	3,65
biogen	D23 / V3-B	1000	125	40	2	3,65
biogen	D24 / V3-B	1000	125	40	2	3,65

Epoxid	D10 / V1-E	1000	125	30	1	2,43
Epoxid	D11 / V1-E	1000	125	30	1	2,43
Epoxid	D12 / V1-E	1000	125	30	1	2,43
Epoxid	D5 / V2-E	1000	125	30	2	4,89
Epoxid	D6 / V2-E	1000	125	30	2	4,89
Epoxid	D7 / V3-E	1000	125	40	2	3,65
Epoxid	D8 / V3-E	1000	125	40	2	3,65
Epoxid	D9 / V3-E	1000	125	40	2	3,65

Zur Durchführung der Dehnkörperversuche wurden die Betonprobekörper in die in Abbildung 6.5 ersichtliche Lasteinleitungsstruktur eingespannt. Die Einleitung der Zugkraft der Prüfmaschine in den Probekörper erfolgte durch Reibung. Hierzu wurde mittels hydraulischer Pressen ein Querdruck von 160 bar aufgebracht. Da der Anpressdruck steuerbar ist, kann während des Versuchs jederzeit nachgespannt werden. Die Innenseite der Stahlplatten war rau ausgeführt, wodurch der Reibverbund erhöht wurde. Mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1mm/min wurden alle Versuche weggesteuert, bis zu einem Versagen, das in der Regel in Form eines Zugbruchs der Bewehrung auftrat, durchgeführt. Die aufgebrachte Kraft und der Maschinenweg wurden als direkte Messgrößen während dem Versuch aufgenommen. Durch das Anbringen von induktiven Wegaufnehmer, auf der Rückseite des Prüfkörpers wurden zudem die Längenänderung aufgezeichnet.



**Abb. 6.5:** Dehnkörperversuch: a) Geometrie und Messtechnik b) Dehnkörper in der Prüfmaschine

### 6.3.3 Versuchsergebnisse

Aus der erhaltenen Kraft  $F$  und der Längenänderung  $\Delta L$ , lässt sich die Textilspannung  $\sigma_{\text{tex}}$  und die Textildehnung  $\varepsilon_{\text{tex}}$  gemäß Formel 6.7 berechnen. Somit können Spannungs-Dehnungs-Beziehungen abgeleitet werden, die das Werkstoffverhalten beschreiben. Dabei wird die während des Versuchs aufgenommene Kraft  $F$  auf die Querschnittsfläche der textilen Bewehrung  $A_{\text{tex}}$  bezogen. Die Dehnung ergibt sich aus dem Verhältnis der gemessenen Längenänderung  $\Delta L$  zur Ausgangslänge des Probekörpers  $L_0$ .

$$\sigma_{\text{tex}} = \frac{F}{A_{\text{tex}}}; \quad \varepsilon_{\text{tex}} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (6.7)$$

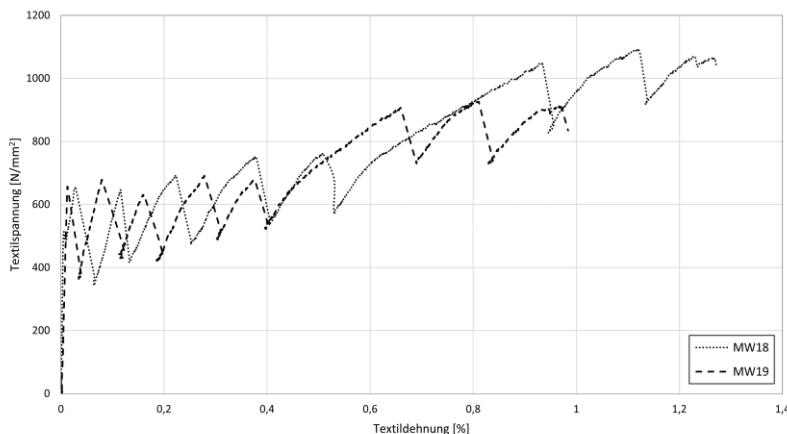
mit:

$\sigma_{\text{tex}}$  Textilspannung im Beton

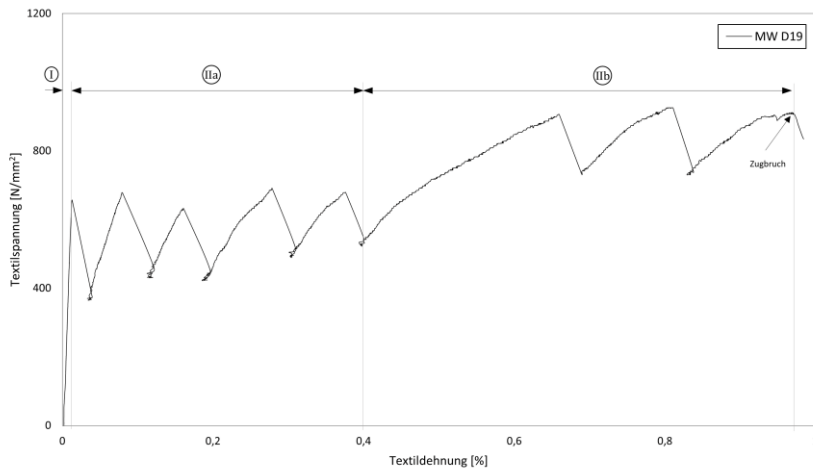
$\varepsilon_{\text{tex}}$  Textildehnung im Beton

In Abbildung 6.7 ist die Mittelwertkurve der beiden Wegaufnehmermessungen für den Probekörper mit der Bezeichnung D19/V2-B gezeigt. Anhand der Mittelwertkurve dieses Probekörpers wird die Unterteilung der Rissbildungsphasen (Phase I, Phase IIa, Phase IIb) wie in Kapitel 6.3.1 beschrieben, vorgenommen. Nach dem Erreichen der maximalen Bruchspannung versagte der Probekörper auf Grund eines Zugbruchs der Bewehrung. Das Zugbruchversagen ist in Abbildung 6.8 ersichtlich.

Abbildung 6.6 repräsentiert die Mittelwertkurven der gesamten Versuchsreihe V2-B. Die Mittelwertkurve ergibt sich dabei aus den beiden Wegaufnehmermessungen. Eine statistische Auswertung dieser Versuchsreihe ist in der Tabelle 6.4 angegeben. Die Spannungs-Dehnungs-Linien aller biogen getränkten Einzelversuche, und die Mittelwertkurven der einzelnen Versuchsreihen sowie zugehörige Auswertungen sind im Anhang B dargestellt.



**Abb. 6.6:** Mittelwertkurven der Einzelversuche aus Versuchsreihe V2-B



**Abb. 6.7:** Unterteilung der Rissbildungsphasen anhand der Spannungs-Dehnungslinie des Probekörpers D19/V2-B



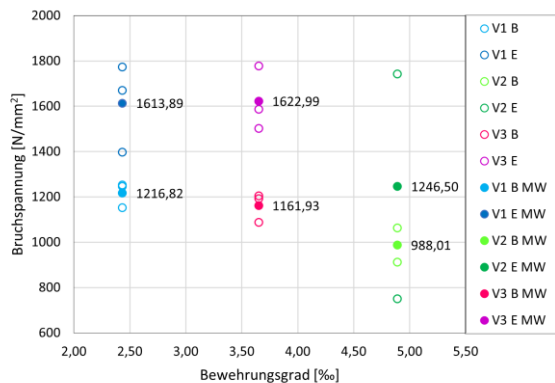
**Abb. 6.8:** Zugbruchversagen der Bewehrung des Versuchskörpers D19/V2-B

**Tab. 6.4:** Versuchsergebnisse der Prüferserie V2-B

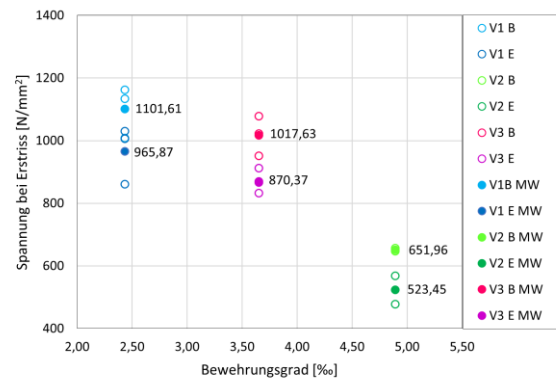
Tränkung	Bezeichnung/ Prüferserie	Bruchspannung [N/mm <sup>2</sup> ]	Bruchdehnung [‰]	Spannung bei Erstriss [N/mm <sup>2</sup> ]	Dehnung bei Erstriss [‰]
biogen	D18 / V2-B	1063,57	1,27	647,16	0,1157
biogen	D19 / V2-B	912,46	0,97	656,77	0,0128
<b>Mittelwert</b>		988,01	1,12	651,96	0,0643
<b>Standardabweichung</b>		75,55	0,15	4,81	0,0514

Aus den Spannungs-Dehnungs-Beziehungen aller Probekörper lässt sich die maximale Bruchspannung der einzelnen Versuche herauslesen. Diese wird in Abbildung 6.9 in einem Punktdiagramm in Abhängigkeit des Bewehrungsgrades aufgetragen, und mit den Ergebnissen der Zugversuche an Betonprobekörpern mit epoxidharzgetränkter Bewehrung verglichen. Hierbei stellen die vollausgefüllte Punkte die Mittelwerte einer jeden Versuchsreihe dar. Die maximale Bruchspannung eines jeden Einzelversuchs wird jeweils durch einfache Punkte

veranschaulicht. In Abbildung 6.10 wird zudem die Spannung bei Auftreten des Erstrisses der einzelnen Versuche dargestellt. Die Kennzeichnung folgt demselben Schema wie in Abbildung 6.9.



**Abb. 6.9:** Ergebnisse der Dehnkörperversuche-Bruchspannung in Abhängigkeit des Bewehrungsgrad



**Abb. 6.10:** Ergebnisse der Dehnkörperversuche-Spannung bei Erstriss in Abhängigkeit des Bewehrungsgrad

### 6.3.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Tatsache, dass die textile Bewehrung kein plastisches Fließvermögen besitzt, wird in den Abbildungen 6.6 und 6.7 ersichtlich. Nach dem Überschreiten der Bruchspannung versagten die Probekörper durch das Reißen der Faserstränge. In Abbildung 6.8 ist ersichtlich, dass nicht alle Fasern gleichzeitig gerissen sind, sondern es zu einem teleskopartigen Versagen der einzelnen Faserstränge gekommen ist. Dies ist auf eine uneinheitliche Spannungsverteilung in den Fasern zufolge unvollständiger Verankerung zurückzuführen. Die unmittelbar nach dem Versuch aufgenommenen Rissbilder aller anderen Versuchskörper sind zusammen mit den jeweiligen Spannungs-Dehnungslinien im Anhang B dargestellt.

Die in Abbildung 6.9 dargestellten Ergebnisse zeigen die Bruchspannungen in Abhängigkeit des Bewehrungsgrades aller durchgeführten Versuche. Klar ersichtlich ist, dass bei allen Versuchen, bei welchen die Bewehrung mit Epoxidharz getränkt wurde, eine deutlich höhere Bruchspannung erreicht wurde als bei jenen mit biogener Tränkung. Die ermittelte Bruchspannung beträgt  $\sigma_{\text{tex}} = 1623 \text{ N/mm}^2 \pm 115,36 \text{ N/mm}^2$  (eine Standardabweichung) und wurde innerhalb der Versuchsreihe V3-E erreicht. Der zugehörige Bewehrungsgrad liegt bei  $\rho_1 = 3,65 \text{ ‰}$ . Die Versuchsreihe V2-E kann für einen Vergleich nicht herangezogen werden, da hier eine deutliche Diskrepanz auf Grund eines Messfehlers auftritt. Die ermittelte maximale Bruchspannung der biogenen Versuchsreihe beträgt  $\sigma_{\text{tex}} = 1217 \text{ N/mm}^2 \pm 46,0 \text{ N/mm}^2$  (eine Standardabweichung). Diese konnte in der Versuchsreihe V1-B mit einem zugehörigen Bewehrungsgrad von  $\rho_1 = 2,43 \text{ ‰}$  erreicht werden. Für alle Versuchsreihen ist ersichtlich, dass jene Versuche mit den höchsten Bewehrungsgraden, die geringsten Bruchspannungen aufwiesen.

Das dargestellte Punktdiagramm in Abbildung 6.10 bildet die Spannung bei Auftreten des Erstrisses in Abhängigkeit des Bewehrungsgrades aller Versuche ab. Hierbei ist deutlich erkennbar, dass jene Probekörper, welche mit biogen getränkten Bewehrungsstrukturen versehen sind, höhere Spannungen bei Auftreten des Erstrisses aufweisen als jene Probekörper mit Epoxidharz getränkter Bewehrung. Als möglicher Grund hierfür kann eine höhere Betonzugfestigkeit des Betons, in welchem die biogen getränkte Textilbewehrung eingebettet ist, genannt werden. Prinzipiell war die Zusammensetzung der Betonmischung in beiden



Versuchsserien, Epoxidharz und biogenes Harz dieselbe, jedoch wurde zu unterschiedlichen Zeitpunkten mit unterschiedlichen Chargen betoniert. Die Druckversuche jenes Betons welcher als Matrix für die Epoxidharzbewehrung eingesetzt wurde ergaben deutlich geringere Druckfestigkeiten [40]. Die höchste Spannung vor Erreichen des Erstrisses wurde in der Versuchsreihe V1-B erreicht. Hierbei entspricht der Maximalwert der Spannung bei Erreichen des Erstrisses einen Wert von  $\sigma_{\text{tex}} = 1102 \text{ N/mm}^2 \pm 67,10 \text{ N/mm}^2$  (eine Standardabweichung) bei einem Bewehrungsgrad von  $\rho_1 = 2,43 \text{ ‰}$ . Mit dem höchsten Bewehrungsgrad von  $\rho_1 = 4,89 \text{ ‰}$  wie er in den Versuchsreihen V2-B und V2-E auftrat wurde die geringste Spannung bei Erstriss beobachtet.

Für die gesamte Beurteilung des Tragverhaltens einer getränkten gestickten textilen Bewehrung ist insbesondere die maximale Bruchspannung, von großer Bedeutung. Die Ergebnisse bei epoxidharzgetränkter Bewehrung lieferte hier höhere Bruchspannungen als die biogen getränkte Bewehrung. Weitere Überlegungen hinsichtlich der Anwendung sind aber sinnvoll.

Abschließend kann gesagt werden, dass mit dem biogenen Tränkungsmittel zwar geringere Bruchspannungen erzielt wurden, jedoch sollte auch berücksichtigt werden, dass die Anwendung nachhaltiger Tränkungsmittel im Vergleich zu konventionellem Epoxidharz noch neu ist. Demnach existiert großes Optimierungspotential, welches die Nachhaltigkeit und Leistungsfähigkeit in Einklang bringen kann.

## 6.4 Verbundversuche

Zur Beurteilung des Tragverhaltens von Textilbeton reicht es nicht, die einzelnen Materialien getrennt voneinander zu betrachten. Zwischen der Bewehrung und dem Beton ist ein ausreichender Verbund notwendig, um Kräfte aus dem Beton in die Bewehrung zu übertragen, und diese überhaupt bei der Lastabtragung zu aktivieren.

### 6.4.1 Allgemeines zum Verbundverhalten

Die im Stahlbetonbau üblichen Verbundeigenschaften lassen sich nicht vollständig auf den Textilbeton übertragen. Da die einzelnen Rovings der Textilien im Vergleich zur Stahlbewehrung eine wesentlich glattere Oberfläche aufweisen, fällt der mechanische Verbund (Scherverbund) wesentlich geringer aus. Somit wird der Verbund hauptsächlich durch Haft- und Reibkräfte aktiviert. Weiters muss unterschieden werden, ob die Bewehrungstextilien getränkt oder ungetränkt sind. Wie bereits erwähnt, steht bei ungetränkten Rovings auf Grund der kleinen Filamentdurchmesser der Beton lediglich mit den äußeren Filamenten in direktem Kontakt (äußerer Verbund). Somit werden die Filamente innerhalb des Rovings unterschiedlich stark belastet. Eine Tränkung der Rovings bewirkt das Mittragen der inneren Fasern zur Lastableitung. Ist der innere Verbund aber nicht ausreichend, kommt es zu einem teleskopartigen Auszug der Fasern. Somit ist auch der innere Verbund zwischen den Kern- und den Randfilamenten von großer Bedeutung. Zur Bestimmung des Verbundverhalten kommen bei textilbewehrten Bauteilen in der Regel Ausziehversuche in Form von single-sided-pull-out-Versuchen zum Einsatz [6].

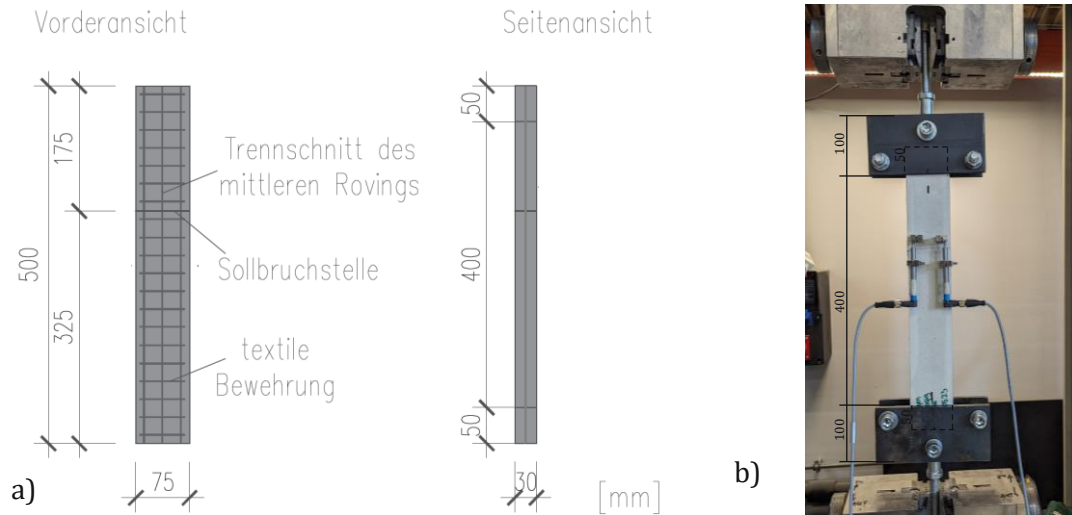
## 6.4.2 Geometrie der Probekörper, Versuchsdurchführung

Im Zuge dieser Arbeit wurde das Verbundverhalten an drei Versuchskörpern mit biogen getränkter textiler Bewehrung untersucht. Dazu wurden Ausziehversuche (single-sided-pull-out Tests) an den drei Probekörpern durchgeführt (siehe Abbildung 6.11). Auch hierbei werden die Ergebnisse mit einem Teil jener Versuchskörper verglichen, deren Bewehrung mit Epoxidharz getränkt wurde (Versuche mit Epoxidharz Tränkung in [40]). Die Geometrien der Versuchskörper sind sowohl für jene mit biogen getränkter Bewehrung und Epoxidharz getränkter Bewehrung in Tabelle 6.5 aufgelistet. Jeder Probekörper beinhaltet eine textile Bewehrung mit jeweils drei Rovings in Prüfrichtung. Um im Untersuchungsbereich einen Ertsriss zu initiieren, wurde eine Sollbruchstelle im oberen Drittel der Probe, durch Einlegen einer Trennschicht aus Kunststoff bereits vor dem Betonieren, erzeugt. Die äußeren beiden Rovings, die genau im Bereich des Kunststoffteils zu liegen kamen, wurden dort durchtrennt. Zusätzlich wurde der mittlere Roving, oberhalb der Sollbruchstelle im Abstand einer Maschenweite (25mm) durchtrennt. Diese Länge spiegelt die Verbundstrecke des auszuziehenden Rovings wider.

**Tab. 6.5:** Bezeichnungen und Geometrien der Prüfkörper für die Verbundversuche

Tränkung	Bezeichnung	Probenlänge l [mm]	Probenbreite b [mm]	Probenstärke t [mm]
biogen	B1	500	75	30
biogen	B2	500	75	30
biogen	B3	500	75	30
Epoxid	E5	500	75	30
Epoxid	E6	500	75	30
Epoxid	E7	500	75	30

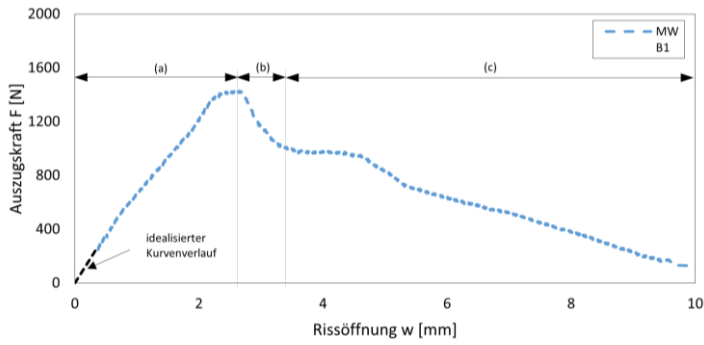
Zur Durchführung der Untersuchungen hinsichtlich dem Verbundverhalten der Probekörper, werden diese in eine Zugprüfmaschine eingespannt. Mit einer Klemmvorrichtung an beiden Probenenden wurde die Last in den Prüfkörper eingeleitet. Die Prüfkörper wurden mit einer Kraft von 200 N vorbelastet. Abschließend wurden alle Versuche weggesteuert mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1mm/min so lange durchgeführt, bis der Roving komplett ausgezogen war. Als direkte Messgrößen wird die Maschinenkraft  $F$ , der Maschinenweg  $s$  und die Rissöffnung  $w$  aufgezeichnet. Letztere wurde an der Sollbruchstelle mit Hilfe zweier Wegaufnehmer gemessen. In Abbildung 6.11 ist neben der Geometrie der Probekörper und der Messtechnik auch die Lasteinleitungsstruktur ersichtlich.



**Abb. 6.11:** Verbundversuch: a) Geometrie des Probekörpers b) Probekörper in der Prüfmaschine

### 6.4.3 Versuchsergebnisse

Aus den direkten Messergebnissen der Kraft  $F$  und der Rissöffnung  $w$  lassen sich Kraft-Rissöffnungsbeziehungen darstellen. Hierbei entspricht die gemessene Kraft  $F$  dem Auszugwiderstand der Faser. Die Mittelwertkurve dieser Beziehung ist in Abbildung 6.12 exemplarisch für den Versuche B1 dargestellt. Im Anhang C sind die Kraft-Rissöffnungsbeziehungen aller biogen getränkten Verbundversuche dargestellt. In der Abbildung 6.12 erfolgt die Aufteilung der Kraft-Rissöffnungskurve in folgende Bereiche: Der Bereich (a) ist durch einen ansteigenden Ast gekennzeichnet. Dieser verdeutlicht einen etwaigen Formschlusses zwischen textiler Bewehrung und Betonmatrix. In diesem Bereich können bereits Relativverschiebungen wahrgenommen werden, weshalb von keiner Kraftübertragung zufolge Adhäsion auszugehen ist. Der Bereich (b) ist gekennzeichnet durch einen abfallenden Ast nach Erreichen der Maximallast. Hierbei beginnt das Abscheren des Tränkungsmediums. Dieser Bereich kann als Übergangsbereich zum Bereich (c) definiert werden. Den Bereich (c) zeichnet ein leicht ansteigender beziehungsweise abfallender Ast aus. In diesem Bereich ist eine signifikante Öffnung des bereits existierenden Risses an der Sollbruchstelle zu beobachten, während eine Laststeigerung nur mehr wenig, bis gar nicht möglich ist. Der Roving wird allmählich ausgezogen. Im Gegenstück verblieb in der Regel die äußere Beschichtung des Tränkungsmediums. Abbildung 6.14 zeigt die maximale Rissöffnung, sowie den mit dem ausgezogenen Roving verbleibende Teil des Prüfkörpers B1. Die in der Abbildung strichliert dargestellte Verbindung zwischen dem Nullpunkt und der aufgetragenen Vorlast von 200 N stellt den idealisierten Kurvenverlauf dar.

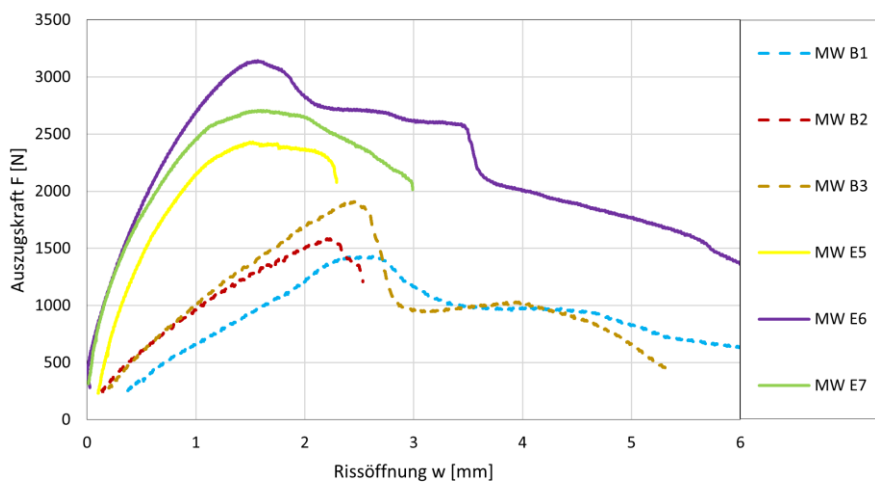


**Abb. 6.12:** Ergebnis des Textilauszugversuchs B1, und Darstellung signifikanter Bereiche



**Abb. 6.13:** Einseitiger Ausziehversuch. Links: maximale Rissöffnung an der Sollbruchstelle. Rechts: ausgezogener Roving

In Abbildung 6.14 sind die Kraft-Rissöffnungsbeziehungen für die unterschiedlichen Serien aller in Tabelle 6.5 aufgelisteten Probekörper ersichtlich. Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass das Erreichen der Maximalkraft bei unterschiedlichen Rissöffnungen auftritt. Ebenso ist klar ersichtlich, dass für jene Probekörper mit Epoxidharz getränkter Bewehrung eine deutlich höhere Last zum Auszug des Rovings benötigt wird.



**Abb. 6.14:** Ergebnis der Verbundversuche: Kraft-Rissöffnungsbeziehung der Einzelversuche

## 6.4.4 Diskussion der Versuchsergebnisse

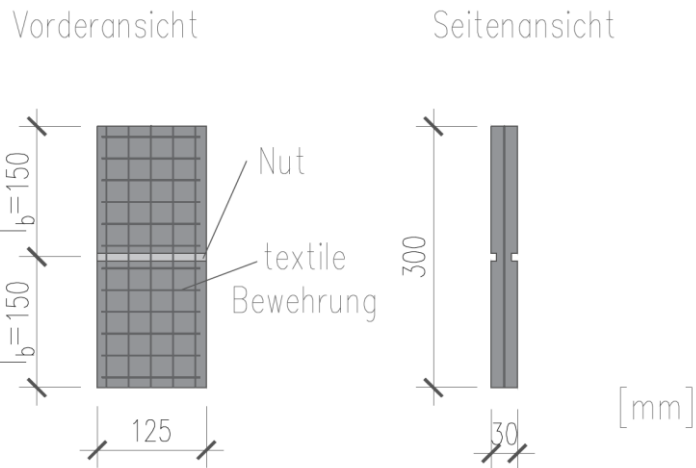
In Abbildung 6.14 ist ein deutlicher Unterschied zwischen den Kraft-Rissöffnungskurven der Versuchsreihen mit biogener Tränkung und Epoxidharz ersichtlich. Jene Probekörper, welche mit biogen getränkten Bewehrungsstrukturen versehen waren, wiesen höhere Rissöffnungen bei Erreichen der Maximallast und dem Beginn des Abscherens des Tränkungsmittels auf. Grund hierfür könnte sein, dass die biogen getränkte textile Bewehrung nachgiebiger ist als die mit Epoxidharz getränkte textile Bewehrung. Zudem war die Last, welche zum Ausziehen des Rovings benötigt wird, bei der Versuchsreihe der biogenen getränkten Bewehrungsstrukturen deutlich geringer. Nach Durchführung der Versuche wurde festgestellt, dass für die biogen getränkten Textilien die äußere Beschichtung in einer Hälfte des Probenstücks verblieb. Im Gegenstück, wie in Abbildung 6.13 ersichtlich, liegen die Fasern somit ohne äußere Schicht des Tränkungsmittels vor. Das weist darauf hin, wie auch in den rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen festgestellt wurde (Kap. 5.2.5), dass die Haftung des Tränkungsmittels an den inneren Fasern nicht ausreichend vorhanden ist. Unterstützt wird diese Annahme zusätzlich durch die Aufnahme aus den digitalmikroskopischen Untersuchungen (Abbildung 5.5), bei welcher ersichtlich ist, dass die inneren Fasern nicht mit dem Tränkungsmittel beschichtet sind. Abschließend kann gesagt werden, dass auch hier noch Optimierungspotential hinsichtlich der Methodik bei der Tränkung besteht.

## 6.5 Verankerungsversuche

Um zu vermeiden, dass die textile Bewehrung unter Einwirkung von Zugkräften aus dem Beton ausgezogen wird, bedarf es einer ausreichenden Verankerungslänge. Es wurden Versuche durchgeführt, um diese erforderliche Verankerungslänge zu bestimmen, und somit sicherzustellen, dass der Probekörper die aufgebrachten Kräfte aufnehmen kann ohne zu versagen. Hierzu werden beidseitige Ausziehversuche (double-sided-pull-out Tests) durchgeführt.

### 6.5.1 Geometrie der Probekörper, Versuchsdurchführung

Für die Untersuchungen wurden in dieser Arbeit vier Probekörper mit biogen getränkter Bewehrung getestet. Auch hier wird ein Vergleich zwischen Probekörpern mit Epoxidharz getränkten textilen Bewehrungsstrukturen (epoxidharzgetränkte Versuche in [40]) durchgeführt. Die erforderliche Verankerungslänge wird durch eine schrittweise Vergrößerung der Probekörperlänge und der damit einhergehenden Verbundstrecke bestimmt. Die jeweiligen Probekörper wurden mittels einer Kreissäge zurechtgeschnitten. Der Probekörper wurde quer zur Längsrichtung beidseitig mit einer Säge genutet, um eine Sollbruchstelle zu erzeugen. In Abbildung 6.15 ist der Probekörper V17 mit einer einer Verbundlänge von 150mm ersichtlich. Die Abmessungen der Probekörper sowie die Verbundlängen mit biogenen und Epoxidharz getränkten Bewehrungen sind in Tabelle 6.6 aufgelistet.



**Abb. 6.15:** Probekörper für den Verankerungsversuch V17

**Tab. 6.6:** Bezeichnung und Geometrien der Prüfkörper für die Verankerungsversuche

Tränkung	Bezeichnung	Probenlänge $l$ [mm]	Probenbreite $b$ [mm]	Probenstärke $t$ [mm]	Verbundlänge $l_b$ [mm]
biogen	V14	150	125	30	75
biogen	V15	200	125	30	100
biogen	V16	250	125	30	125
biogen	V17	300	125	30	150
Epoxid	V10	150	125	30	75
Epoxid	V11	200	125	30	100
Epoxid	V12	250	125	30	125
Epoxid	V13	300	125	30	150

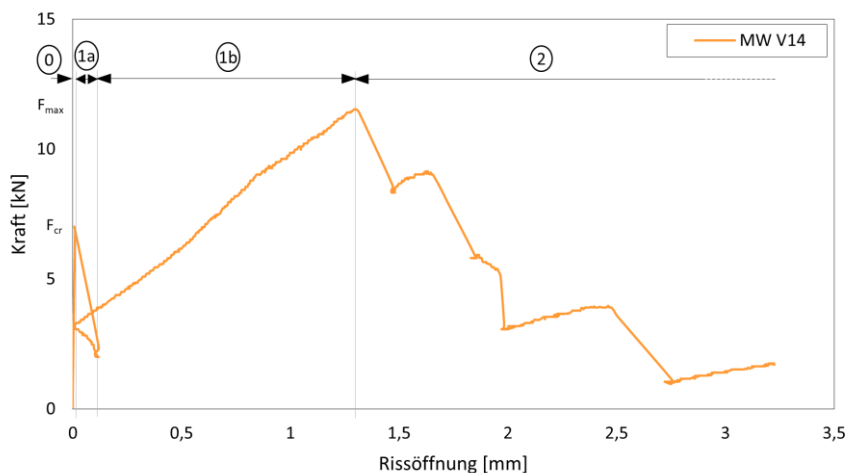
Zur Durchführung der Versuche werden die einzelnen Probekörper ebenfalls in die in Abbildung 6.5 ersichtliche Zugprüfmaschine eingespannt. Die Einleitung der Zugkraft in den Probekörper wurde auch hier durch einen aufgebrachtten Querdruck mit Hilfe einer hydraulischen Presse gewährleistet. Je nach Probenlänge wird ein unterschiedlicher Querdruck aufgebracht, um die gleiche Querdruckspannung zu erreichen. Für die Probekörper V14 und V10 wurde ein Druck von 100 bar aufgebracht. Für Prüfkörper mit einer Länge von 200mm wurde ein Querdruck von 130 bar aufgebracht. Die restlichen Probekörper wurden mit 160 bar beansprucht. Alle Versuche wurden weggesteuert durchgeführt, mit einer Prüfgeschwindigkeit von 53 s/mm. Während des Versuchs wurde die aufgebrachtte Kraft und die Längenänderung der Probe durch das Anbringen von drei Wegaufnehmern (zwei vorne, einer hinten) gemessen.



## 6.5.2 Versuchsergebnisse

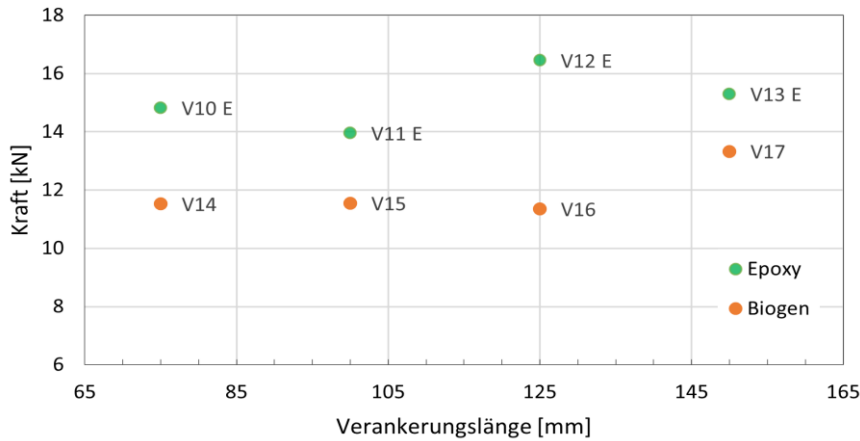
Aus den direkt gemessenen Ergebnissen lassen sich wieder Kraft-Rissöffnungskurven darstellen. Exemplarisch wird dies für den Versuch V14 in Abbildung 6.15 dargestellt. Die Abbildung zeigt dabei die sich aus den Wegaufnehmern ergebende Mittelwertkurve. Die Mittelwertkurven der restlichen Versuche mit biogener Tränkung sind in Anhang D ersichtlich. Die Kurve in Abbildung 6.15 wird in Anlehnung an Kulas [2] in folgende Bereiche unterteilt:

- Bereich 0: In diesem Bereich treten keine Relativverschiebungen zwischen der Bewehrung und dem Beton auf, das heißt zwischen den beiden Materialien herrscht starrer Verbund. In diesem Bereich ist der Prüfkörper ungerissen.
- Bereich 1a: Nach dem Erreichen der Risskraft  $F_{cr}$  entsteht in der Sollbruchstelle ein Riss und die Prüfkraft fällt ab.
- Bereich 1b: Einzelne Bereiche gehen nach dem Lastabfall in den nachgiebigen Verbund über, während sich allerdings weitere Bereiche noch im starren Verbund befinden. Bis zum Erreichen der maximalen Kraft  $F_{max}$  ist eine weitere Laststeigerung möglich.
- Bereich 2: Nachdem die maximale Kraft  $F_{max}$  überschritten wurde, beginnt die Kraft abzufallen, und die Bewehrung wird ausgezogen.



**Abb. 6.16:** Ergebnis des Verankerungsversuchs V14, und Darstellung der signifikanten Bereiche

In Abbildung 6.16 wird die maximale Kraft eines jeden Einzelversuchs gegen die Verankerungslänge in einem Punktdiagramm aufgetragen. Die orange dargestellten Punkte stellen dabei die Maximallasten jener Probekörper mit biogen getränkter Bewehrung dar. Hingegen stellen die grünen Punkte jene Maximallasten der Probekörper mit Epoxidharz getränkter Bewehrung dar. Es ist ersichtlich, dass die Probekörper mit Epoxidharz getränkter Bewehrung höhere Maximallasten aufwiesen als jene mit biogener Tränkung.



**Abb. 6.17:** Ergebnis der Einzelversuche der Verankerungsversuche, Maximale Kraft in Abhängigkeit der Verankerungslänge

### 6.5.3 Diskussion der Ergebnisse

Die Abweichung der Ergebnisse der Einzelversuche einer jeden Serie, biogen und Epoxidharz, zeigen nur geringe Unterschiede. Es ist lediglich ein gering ansteigender Trend der maximalen Kraft in Abhängigkeit der Verankerungslänge zu erkennen. Eine Erhöhung der erforderlichen Verankerungslänge bedeutet keine signifikante Laststeigerung bis zum Erreichen der Maximallast, und somit dem Auszug des Rovings. Bei beiden Versuchsserien ist also bereits mit einer kurzen Verbundlänge eine ausreichende Verankerungslänge gegeben, sodass die Bruchlast aufgenommen werden kann, ohne dass die Bewehrung aus dem Probekörper gezogen wird. Mit den bisherigen Beobachtungen in dieser Arbeit übereinstimmend wurde auch in dieser Untersuchung geringe Bruchlasten für die biogen getränkten Textilien festgestellt. Während in der Versuchsreihe der biogenen Probekörper mit einer Verankerungslänge von 75mm eine durchschnittliche Kraft von 11 kN aufgenommen werden konnte, wurde bei den Epoxidharz getränkten Textilien eine durchschnittliche Last von 14 kN dokumentiert.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit befasst sich mit dem innovativen und leistungsfähigen Werkstoff Textilbeton. Insbesondere wird auf die Thematik der Tränkung der textilen Fasern, welche eine essenzielle Rolle bei der Lastabtragung spielen, eingegangen. Hauptaugenmerk liegt hierbei auf der nachhaltigen Tränkung von Basaltfasern, durch biogene Tränkungsmittel.

Textilbeton, im Vergleich zum Stahlbeton, zeichnet sich insbesondere durch erhöhte Zugfestigkeiten und Resistenz gegen Korrosion aus, wodurch schlanke Bauteile realisiert werden können. Die in dieser Arbeit verwendeten textilen Bewehrungsstrukturen aus Basaltfasern wurden mit der Methodik der Stickerei in Vorarlberg hergestellt. Im Vergleich zu anderen Herstellungsverfahren ermöglicht dieser Prozess individuelle und komplexe Bewehrungsstrukturen herzustellen, durch die eine optimierte Lastabtragung innerhalb des Bauteils gewährleistet werden kann. Intensiv wurde in dieser Arbeit der Aspekt der Tränkung von textilen Bewehrungsstrukturen zum Einsatz in Beton betrachtet. In zahlreichen Forschungsergebnissen konnte bereits die Sinnhaftigkeit der Tränkung festgehalten werden, unter anderem, um die Mitwirkung der inneren Fasern bei der Lastabtragung zu gewährleisten. Weiters wurde bereits gezeigt, dass konventionelle Tränkungsmittel wie Epoxidharz und Styrol-Butadien effiziente Tränkungsmittel von textilen Bewehrungsstrukturen in Betonbauteilen darstellen. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Untersuchung der Leistungsfähigkeit eines biogenen Tränkungsmittels. Die Erforschung dieser Thematik im Zusammenhang mit dem Hochleistungswerkstoff Textilbeton ist sehr relevant, um hierbei eine nachhaltigere und ressourcenschonendere Methodik zur Produktion und Verarbeitung von textilen Bewehrungen zu etablieren. Zur Untersuchung der Leistungsfähigkeit des biogenen Tränkungsmittels wurden experimentelle Laboruntersuchungen an Betonprobekörpern mit biogen getränkten Bewehrungsstrukturen sowie verschiedene mikroskopische Untersuchungen an den getränkten textilen Flächengebilden und Einzelrovings durchgeführt. Die experimentellen Versuche im Labor umfassten Zug-, Verbund- und Verankerungsversuche. Um die Leistungsfähigkeit des biogenen Tränkungsmittels einschätzen zu können, wurden die Ergebnisse aus den Versuchen mit Ergebnissen an Betonprobekörpern bewehrt mit epoxidharzgetränkten textilen Bewehrungsstrukturen verglichen. Die Ergebnisse der Dehnkörper(zug)versuche wiesen für die Epoxidharz getränkten Bewehrungsstrukturen hinsichtlich der maximalen Bruchspannung deutlich bessere Ergebnisse als die mit biogen getränkten Bewehrungsstrukturen auf. Hingegen konnte bei Probekörpern mit biogener Tränkung, eine höhere Spannung bei Auftreten des Erstrisses vermerkt werden. Für Untersuchungen hinsichtlich des Verbundverhaltens wurden einseitige Ausziehversuche durchgeführt. Durch diese Versuche konnte ebenfalls für Betonprobekörper mit Epoxidharz getränkter Bewehrungsstruktur bessere Ergebnisse erzielt werden. Hierbei war die maximal aufzubringende Last, welche zum Ausziehen des Rovings benötigt wird, deutlich höher als bei Probekörpern mit biogen getränkter Bewehrungsstruktur. Aus den Verankerungsversuchen konnte sowohl für die Versuchsreihen mit biogener Tränkung als auch für jene mit Epoxidharz Tränkung festgestellt werden, dass bereits kurze Verankerungslängen ausreichen, um die theoretische Bruchlast übertragen zu können, ohne dass es zum Ausziehen des Rovings kommt. Zum besseren Verständnis der Interaktion zwischen Faser und Tränkungsmittel wurden neben digitalmikroskopischen Untersuchungen auch

rasterelektronmikroskopische Untersuchungen an getränkten textilen Bewehrungsstrukturen und Einzelrovings durchgeführt. Der Grad der Durchtränkung spielt eine wichtige Rolle in Bezug auf die Beteiligung der einzelnen Fasern im Roving an der Lastabtragung der inneren Fasern. Die digitalmikroskopischen Untersuchungen ließen eine nicht ausreichend gute Tränkung der inneren Fasern, bei beiden Tränkungsmitteln vermuten. Für genauere Untersuchungen wurden weiters rasterelektronmikroskopische Untersuchungen durchgeführt. Hier konnte festgestellt werden, dass speziell bei den Einzelrovings keine ausreichende Haftung der jeweiligen Tränkungsmittel an den Fasern gegeben war. Weiters konnten hier sowohl an einzelnen Fasern des textilen Flächengebildes und des Einzelrovings Beschädigungen an der Oberfläche der Fasern beobachtet werden. Ein augenscheinlicher Unterschied der getränkten Strukturen, welche in biogenem Tränkungsmittel beziehungsweise in Epoxidharz eingebettet waren, und der die unterschiedlichen Festigkeiten erklären würde konnte durch diese Untersuchungen jedoch nicht festgestellt werden. Bei einer energiedispersiven Röntgenmikroanalyse beider Tränkungsmittel wurde in beiden Harzen das Auftreten der gleichen Elemente, jedoch mit unterschiedlichen Massenanteilen registriert. Weitere Rückschlüsse auf die physikalisch-chemischen Eigenschaften des biogenen Tränkungsmittels konnten dadurch nicht erzielt werden.

Die Tränkung textiler Bewehrungsstrukturen mit biogenen Tränkungsmitteln ist ein breites Forschungsfeld. Die experimentellen Untersuchungen im Labor haben gezeigt, dass mit dem biogenen Tränkungsmittel noch keine vergleichbare Leistungsfähigkeit zu mit Epoxidharz getränkten Bewehrungsstrukturen erzielt werden konnte. Durch die mikroskopischen Untersuchungen konnte eine unzureichende Haftung des Tränkungsmittels an den inneren Fasern sowohl bei biogener als auch bei Epoxidharz Tränkung beobachtet werden.

Um einen Werkstoff zu entwickeln der unter Anderem den bautechnischen Anforderungen genügt und gleichzeitig nachhaltiger ist, muss es gelingen Leistungsfähigkeit und Nachhaltigkeit miteinander zu vereinen. Aus dieser Arbeit wird geschlussfolgert, dass weiterhin Potential zur Optimierung biogener Tränkungsmittel vor allem hinsichtlich dem Prozess der Tränkung selbst aber auch der Zusammensetzung des Tränkungsmittels besteht.

Abschließend sei betont, dass weitere Forschung an Textilbeton unter Berücksichtigung des Aspekts der Nachhaltigkeit erforderlich ist, um den Hochleistungsverbundwerkstoff weiterzuentwickeln. Mit der in Vorarlberg beheimateten Textilstickerei zeigt Österreich großes Potenzial die Anwendung von Textilbeton nachhaltig mitzugestalten.

# Literaturverzeichnis

- [1] F. Gehring, S. Albrecht, S. Homolka, P. Leistner, V. Thome, und S. Seifert, „Aus Altbeton wird Beton – ein innovativer Recyclingansatz“, *Bauphysik*, Bd. 37, Nr. 5, S. 296–300, 2015.
- [2] C. H. Kulas, „Zum Tragverhalten getränkter textiler Bewehrungselemente für Betonbauteile“, Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, 2013.
- [3] Y. Jiang, S. Wang, W. Dong, T. Kaneko, M. Chen, und D. Shi, „High-Strength, Degradable and Recyclable Epoxy Resin Based on Imine Bonds for Its Carbon-Fiber-Reinforced Composites“, *Materials*, Bd. 16, Nr. 4, Art. Nr. 4, Jan. 2023.
- [4] „Carbonfasern“. Zugegriffen: 8. Oktober 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hanser-elibrary.com/doi/epdf/10.3139/9783446460805>
- [5] M. Curbach und F. Jesse, „Eigenschaften und Anwendung von Textilbeton“, *Beton-Stahlbetonbau*, Bd. 104, Nr. 1, S. 9–16, 2009.
- [6] M. G. Egger, „Gestickte Bewehrungen für Textilbeton“, Dissertation, Leopold-Franzens Universität Innsbruck, Innsbruck, 2022.
- [7] M. Molter, „Zum Tragverhalten von textilbewehrtem Beton“, Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, 2005.
- [8] F. Jesse und M. Curbach, „Verstärken mit Textilbeton“, in *Beton-Kalender 2010*, John Wiley & Sons, Ltd, 2009, S. 457–565.
- [9] C. Cherif, Hrsg., *Textile Werkstoffe für den Leichtbau: Techniken - Verfahren - Materialien - Eigenschaften*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011.
- [10] J. Militký, V. Kovačič, und J. Rubnerová, „Influence of thermal treatment on tensile failure of basalt fibers“, *Eng. Fract. Mech.*, Bd. 69, Nr. 9, S. 1025–1033, Juni 2002.
- [11] T. Deák und T. Czigány, „Chemical Composition and Mechanical Properties of Basalt and Glass Fibers: A Comparison“, *Text. Res. J.*, Bd. 79, Nr. 7, S. 645–651, Mai 2009.
- [12] R. Teschner, „Basaltfasern“, in *Glasfasern*, R. Teschner, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer, 2021, S. 207–215.
- [13] B. Mahltig, „Basalt Fibers“, in *Inorganic and Composite Fibers*, 9 Bde., B. Mahltig und Y. Kyosev, Hrsg., in The Textile Institute Book Series., Woodhead Publishing, 2018, S. 195–217.
- [14] V. Fiore, T. Scalici, G. Di Bella, und A. Valenza, „A review on basalt fibre and its composites“, *Compos. Part B Eng.*, Bd. 74, S. 74–94, Juni 2015.
- [15] J. Sim, C. Park, und D. Y. Moon, „Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures“, *Compos. Part B Eng.*, Bd. 36, Nr. 6, S. 504–512, Jan. 2005.
- [16] Ya. V. Lipatov, S. I. Gutnikov, M. S. Manylov, E. S. Zhukovskaya, und B. I. Lazoryak, „High alkali-resistant basalt fiber for reinforcing concrete“, *Mater. Des.*, Bd. 73, S. 60–66, Mai 2015.
- [17] A. Younes, A. Seidel, S. Rittner, C. Cherif, und R. Thyroff, „Innovative textile Bewehrungen für hochbelastbare Betonbauteile“, *Beton- Stahlbetonbau*, Bd. 110, Nr. S1, S. 16–21, 2015.
- [18] „Geschichte – Vorarlberger Stickereiwirtschaft“, Vorarlberger Stickereiwirtschaft. Zugegriffen: 14. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sticker.at/geschichte/>
- [19] „MedSens“, Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG. Zugegriffen: 14. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://projekte.ffg.at/projekt/3978612>
- [20] „V-trion GmbH - Technologies“, V-trion. Zugegriffen: 14. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.v-trion.com/technologies/>
- [21] „Tailored Technologies Völkl“, Völkl. Zugegriffen: 14. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://volkl.com/de-at/tailored-technologies>



- [22] red, vorarlberg.ORF.at, „Neuartiger Textilbeton für Krumbachbrücke“, vorarlberg.ORF.at. Zugegriffen: 14. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://vorarlberg.orf.at/stories/3162935/>
- [23] „ZSK STICKMASCHINEN Open House 2023 - die ZSK Hausmesse in Krefeld.“ Zugegriffen: 9. Oktober 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://zsk.de/openhouse>
- [24] A. Kolkmann, „Methoden zur Verbesserung des inneren und äußeren Verbundes technischer Garne zur Bewehrung zementgebundener Matrices“, RWTH Aachen, Aachen, 2008.
- [25] M. Curbach, J. Hegger, F. Schladitz, M. Tietze, und M. Lieboldt, Hrsg., *Handbuch Carbonbeton: Einsatz nichtmetallischer Bewehrung*. Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und Technische, 2023.
- [26] V. Fiore und A. Valenza, „5- Epoxy resins as a matrix material in advanced fiber-reinforced polymer (FRP) composites“, in *Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications*, J. Bai, Hrsg., in Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, Woodhead Publishing, 2013, S. 88–121.
- [27] M. Sharma, S. Gao, E. Mäder, H. Sharma, L. Y. Wei, und J. Bijwe, „Carbon fiber surfaces and composite interphases“, *Compos. Sci. Technol.*, Bd. 102, S. 35–50, Okt. 2014.
- [28] L. Szabó u. a., „Lignin as a Functional Green Coating on Carbon Fiber Surface to Improve Interfacial Adhesion in Carbon Fiber Reinforced Polymers“, *Materials*, Bd. 12, Nr. 1, Art. Nr. 1, Jan. 2019.
- [29] C. McSwiggan und A. Fam, „Bio-based resins for flexural strengthening of reinforced concrete beams with FRP sheets“, *Constr. Build. Mater.*, Bd. 131, S. 618–629, Jan. 2017.
- [30] A. Fam, A. Eldridge, und M. Misra, „Mechanical characteristics of glass fibre reinforced polymer made of furfuryl alcohol bio-resin“, *Mater. Struct.*, Bd. 47, Nr. 7, S. 1195–1204, Juli 2014.
- [31] M. A. Hofmann, A. T. Shahid, M. Machado, M. Garrido, J. C. Bordado, und J. R. Correia, „GFRP biocomposites produced with a novel high-performance bio-based unsaturated polyester resin“, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, Bd. 161, 2022.
- [32] M. A. Hofmann, A. T. Shahid, M. Garrido, M. J. Ferreira, J. R. Correia, und J. C. Bordado, „Biobased Thermosetting Polyester Resin for High-Performance Applications“, *ACS Sustain. Chem. Eng.*, Bd. 10, Nr. 11, S. 3442–3454, März 2022.
- [33] C. Boursier Niutta, R. Ciardiello, A. Tridello, und D. S. Paolino, „Epoxy and Bio-Based Epoxy Carbon Fiber Twill Composites: Comparison of the Quasi-Static Properties“, *Materials*, Bd. 16, Nr. 4, S. 1601, Jan. 2023.
- [34] M. R. M. Hafiezal, A. Khalina, Z. A. Zurina, M. D. M. Azaman, und Z. M. Hanafee, „Thermal and Flammability Characteristics of Blended Jatropha Bio-Epoxy as Matrix in Carbon Fiber-Reinforced Polymer“, *J. Compos. Sci.*, Bd. 3, Nr. 1, S. 6, März 2019.
- [35] M. A. Hofmann, „Sustainable bio-based resins and fibre-polymer composites for civil engineering structural applications“, Dissertation, Universität Lissabon, Lissabon, 2022.
- [36] D. Wetjen, „Wechselwirkung von Carbonfasern, Schlichte und epoxidbasierter polymerer Matrix in carbonfaserverstärkten Kunststoffen“, Dissertation, Universität Augsburg, Augsburg.
- [37] L. Hahn, S. Rittner, D. Nuss, M. Ashir, und C. Cherif, „Development of Methods to Improve the Mechanical Performance of Coated Grid-Like Non-Crimp Fabrics for Construction Applications“, *Fibres Text. East. Eur.*, Bd. 27, S. 51–58, Feb. 2019.
- [38] KEYENCE Deutschland, „Einführung in die Digitalmikroskopie Band 1-4“, KEYENCE. Zugegriffen: 15. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.keyence.de/support/user/microscope-documents/vhx-6000.jsp>
- [39] G. W. Ehrenstein, „Rasterelektronenmikroskopie REM – FEM – EDX“, in *Mikroskopie-Lichtmikroskopie, Polarisations, Rasterkraftmikroskopie, Fluoreszenzmikroskopie, Rasterelektronenmikroskopie*, Erlangen-Nürnberg: Carl Hanser, 2020, S. 228.
- [40] C. Durnwalder, noch nicht abgeschlossene Masterarbeit, Technische Universität Wien, Wien, voraussichtlich 2023.
- [41] J. Feix und R. Walkner, *Betonbau - Grundlagen der Bemessung nach EC2*. Innsbruck: Studia Universitätsverlag, 2012.

# Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 2.1:</b> Einteilung der textilen Faserstoffe, in Anlehnung entnommen aus [9] .....	7
<b>Abb. 2.2:</b> Multifilamentgarn bzw. Roving, mit Änderungen entnommen aus [8].....	10
<b>Abb. 2.3:</b> Kettenwirkmaschine. Links: Rovings orientiert in Schussrichtung, Rechts: Rovings orientiert in Kettrichtung, entnommen aus [17] .....	13
<b>Abb. 3.1:</b> Prinzipskizze des TFP-Verfahrens, entnommen aus [6] .....	16
<b>Abb. 3.2:</b> Mehrkopfstickmaschine, entnommen aus [23] (Quelle: ZSK Stickmaschinen).....	16
<b>Abb. 3.3:</b> Befestigung des Funktionsmaterials am Stickgrund, entnommen aus [6]. Links: Bezeichnung von Fixier- und Knotenfaden am biaxialen Flächengelege. Rechts: Befestigung des Knotenfadens mit Nadeln am Stickgrund im Fall einer Soutache-Schiffchen-Stickmaschine .....	16
<b>Abb. 4.1:</b> Spannungs-Dehnungsverteilung im Roving, (links) ohne Tränkung und (rechts) vollständig getränkt. Entnommen aus [17].....	18
<b>Abb. 4.2:</b> Chemischer Aufbau des Epoxidharzes basierend auf Bisphenol A, entnommen aus [2] .....	20
<b>Abb. 4.3:</b> Strukturelle Zusammensetzung von Styrol-Butadien, entnommen aus [2].....	20
<b>Abb. 4.4:</b> Drei Interaktionsmodelle der beschichteten Faser mit dem Tränkungsmittel, entnommen aus [36].....	27
<b>Abb. 4.5:</b> Prinzipdarstellung des Foulardierens, entnommen aus [2] .....	28
<b>Abb. 5.1:</b> Komponenten des Digitalmikroskop VHX 6000 .....	30
<b>Abb. 5.2:</b> Probenpräparation mittels Diamantsäge, digitalmikroskopische Aufnahme des Querschnitts. Links: Einzelroving getränkt in Epoxidharz, rechts: Einzelroving getränkt in biogenem Harz .....	31
<b>Abb. 5.3:</b> Probenpräparation mittels Handsäge, digitalmikroskopische Aufnahme des Querschnitts. Links: Einzelroving getränkt in Epoxidharz, rechts: Einzelroving getränkt in biogenem Harz .....	31
<b>Abb. 5.4:</b> Fehlstellen auf der Oberfläche und Luftblasen unter der Oberfläche der Beschichtung. Links: Roving getränkt mit Epoxidharz, Rechts: Roving getränkt mit biogenem Harz.....	32
<b>Abb. 5.5:</b> erkennbare Farbunterschiede an einem Roving in Längsrichtung, getränkt mit biogenem Tränkungsmittel.....	32
<b>Abb. 5.6:</b> Epoxidharzgetränkter Roving, entnommen aus einem gerissenen Betonprobekörper, nach einem einaxialen Zugversuch.....	33
<b>Abb. 5.7:</b> Betonprobekörper mit eingebetteter epoxidharzgetränkter textiler Bewehrung.....	33
<b>Abb. 5.8:</b> Komponenten des REM Quanta FEG 250.....	35

<b>Abb. 5.9:</b> In Epoxidharz eingebettete Proben. Links: Längsschnitte der Proben, Rechts: Querschnitte der Proben und ungetränkte Fasern .....	36
<b>Abb. 5.10:</b> REM-Untersuchung an Probe a) Längsschnitt eines Einzelrovings getränkt in Epoxidharz 1) 70-fache Vergrößerung 2) 500-fache Vergrößerung Teilabschnitt (a) 3) 500-fache Vergrößerung Teilabschnitt (b) 4) 3000-fache Vergrößerung.....	38
<b>Abb. 5.11:</b> REM-Untersuchung an Probe b) Längsschnitt eines Einzelrovings getränkt in biogenem Harz 1) 70-fache Vergrößerung 2) 500-fache Vergrößerung 3) 3000-fache Vergrößerung 4) 10000-fache Vergrößerung .....	39
<b>Abb. 5.12:</b> REM-Untersuchung an Probe c) Längsschnitt eines Rovings aus dem mit Epoxidharz getränkten textilen Flächengebilde. 1) 70-fache Vergrößerung 2) 1000-fache Vergrößerung 3) 500-fache Vergrößerung 4) 4000-fache Vergrößerung Teilabschnitt (a) 5) 4000-fache Vergrößerung Teilabschnitt (b) 6) 5000-fache Vergrößerung.....	41
<b>Abb. 5.13:</b> REM-Untersuchung an Probe d) Querschnitt eines Einzelrovings getränkt in Epoxidharz 1) 100- fache Vergrößerung 2) 2000-fache Vergrößerung 3) 5000-fache Vergrößerung Teilabschnitt (a) 4) 5000-fache Vergrößerung Teilabschnitt (b).....	43
<b>Abb. 5.14:</b> REM-Untersuchung an Probe e) Querschnitt eines Einzelrovings getränkt in biogenem Harz 1) 72-fache Vergrößerung 2) 1000-fache Vergrößerung 3) 6000-fache Vergrößerung 4) 20000-fache Vergrößerung .....	44
<b>Abb. 5.15:</b> REM-Untersuchung an Probe f) Querschnitt eines Kreuzungspunktes aus dem mit Epoxidharz getränkten textilen Flächengebilde. 1) 100-fache Vergrößerung 2) 500-fache Vergrößerung Teilabschnitt (a) 3) 500-fache Vergrößerung Teilabschnitt (b) 4) 2000-fache Vergrößerung Teilabschnitt (c) 5) 10000-fache Vergrößerung 6) 2000-fache Vergrößerung Teilabschnitt (d).....	46
<b>Abb. 5.16:</b> REM-Untersuchung an Probe g) ungetränkte beschlichtete Fasern. 1) 100-fache Vergrößerung 2) 1000-fache Vergrößerung .....	47
<b>Abb. 6.1:</b> Getränkte textile Bewehrung aus Basaltfasern.....	52
<b>Abb. 6.2:</b> Betonage bei der Firma Doka GmbH .....	53
<b>Abb. 6.3:</b> Bruchbild der Würfelprobe W5 .....	55
<b>Abb. 6.4:</b> Qualitativer Verlauf der Zugkraft-Dehnungslinie, entnommen aus [6] .....	56
<b>Abb. 6.5:</b> Dehnkörperversuch: a) Geometrie und Messtechnik b) Dehnkörper in der Prüfmaschine .....	59
<b>Abb. 6.6:</b> Mittelwertkurven der Einzelversuche aus Versuchsreihe V2-B.....	60
<b>Abb. 6.7:</b> Unterteilung der Rissbildungsphasen anhand der Spannungs-Dehnungslinie des Probekörpers D19/V2-B.....	61
<b>Abb. 6.8:</b> Zugbruchversagen der Bewehrung des Versuchskörpers D19/V2-B .....	61
<b>Abb. 6.9:</b> Ergebnisse der Dehnkörperversuche- Bruchspannung in Abhängigkeit des Bewehrungsgrad .....	62
<b>Abb. 6.10:</b> Ergebnisse der Dehnkörperversuche- Spannung bei Erstriss in Abhängigkeit des Bewehrungsgrad .....	62

**Abb. 6.11:** Verbundversuch: a) Geometrie des Probekörpers b) Probekörper in der Prüfmaschine ..... 65

**Abb. 6.12:** Ergebnis des Textilauszugversuchs B1, und Darstellung signifikanter Bereiche ..... 66

**Abb. 6.13:** Einseitiger Ausziehversuch. Links: maximale Rissöffnung an der Sollbruchstelle. Rechts: ausgezogener Roving ..... 66

**Abb. 6.14:** Ergebnis der Verbundversuche: Kraft-Rissöffnungsbeziehung der Einzelversuche... 66

**Abb. 6.15:** Probekörper für den Verankerungsversuch V17 ..... 68

**Abb. 6.16:** Ergebnis des Verankerungsversuchs V14, und Darstellung der signifikanten Bereiche ..... 69

**Abb. 6.17:** Ergebnis der Einzelversuche der Verankerungsversuche, Maximale Kraft in Abhängigkeit der Verankerungslänge..... 70

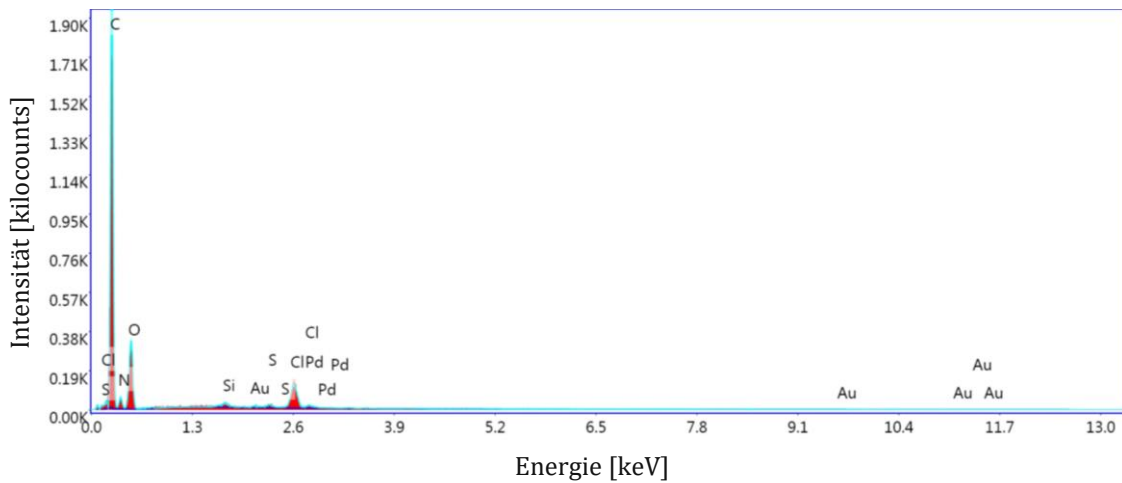
# Tabellenverzeichnis

<b>Tab. 2.1:</b> Vergleich der Dimensionen zwischen Textilbeton und Stahlbeton, Zahlenwerte aus [5] .....	5
<b>Tab. 2.2:</b> Zusammensetzung von Basaltfasern, Vergleich der Massenanteile aus [10] und [11] ....	8
<b>Tab. 2.3:</b> Bereiche der Massenanteile der Oxide von Basaltfasern für die Endlosfaserherstellung (Roving), mit Änderungen entnommen aus [12].....	8
<b>Tab. 2.4:</b> mechanische Eigenschaften der Basalt- und Glasfasern, Werte entnommen aus [2] .....	9
<b>Tab. 6.1:</b> Zusammensetzung der Betonrezeptur.....	52
<b>Tab. 6.2:</b> Ergebnisse der Druck- und Biegezugversuche .....	55
<b>Tab. 6.3:</b> Prüfserien der Zugversuche und Geometrie der Probekörper .....	58
<b>Tab. 6.4:</b> Versuchsergebnisse der Prüfserie V2-B.....	61
<b>Tab. 6.5:</b> Bezeichnungen und Geometrien der Prüfkörper für die Verbundversuche .....	64
<b>Tab. 6.6:</b> Bezeichnung und Geometrien der Prüfkörper für die Verankerungsversuche .....	68

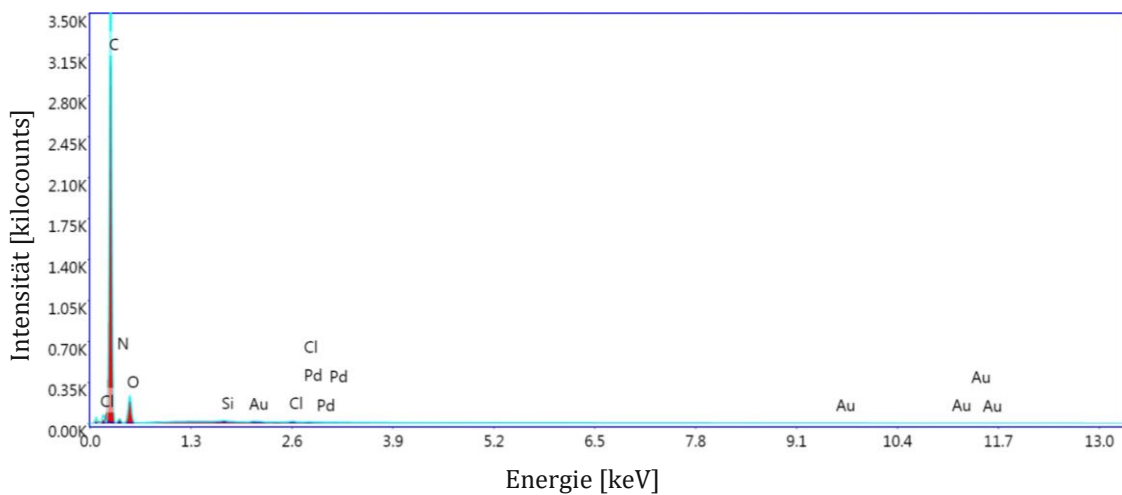


# Anhang A: Linienprofile der EDX-Analyse

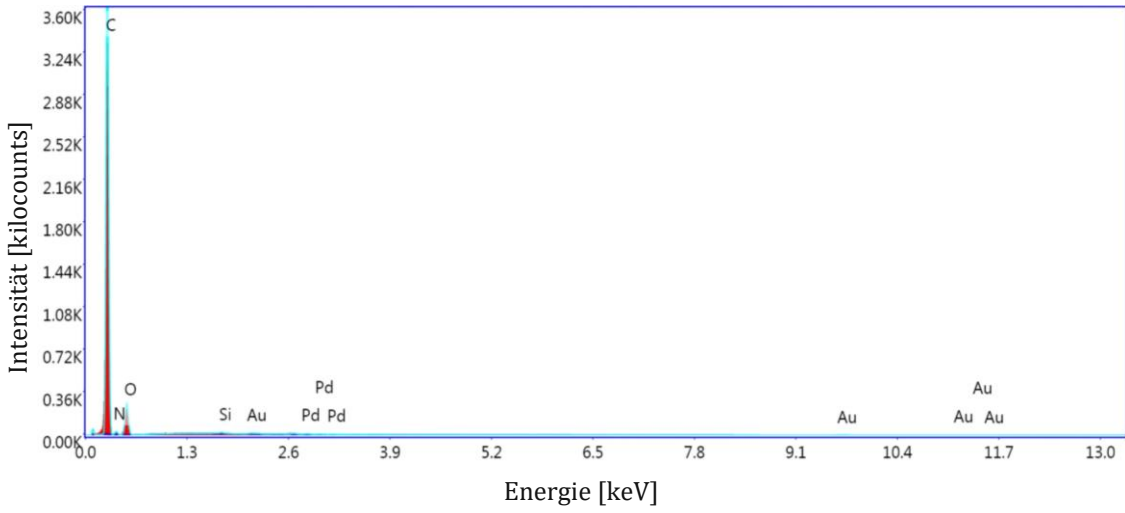
## (i) Epoxidharz mit welchem der Einzelroving getränkt wurde



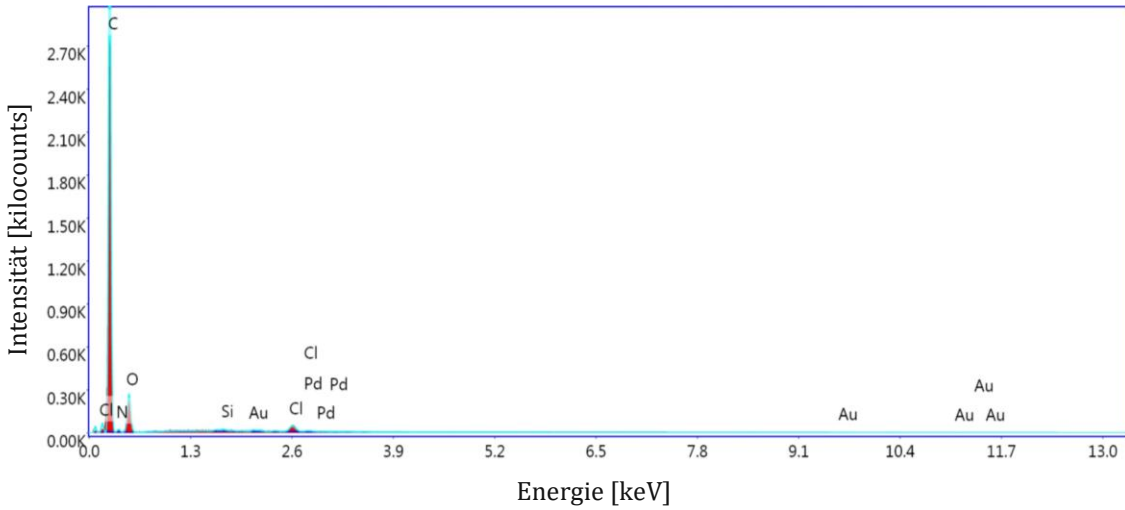
## (ii) biogenes Harz mit welchem der Einzelroving getränkt wurde



**(iii) Epoxidharz mit welchem die textile Bewehrungsstruktur getränkt wurde**



**(iv) Epoxidharz welches als Einbettungsmatrix der Proben verwendet wurde**



# Anhang B: Dehnkörperversuche

## (i) Eingangsgrößen zur Berechnung

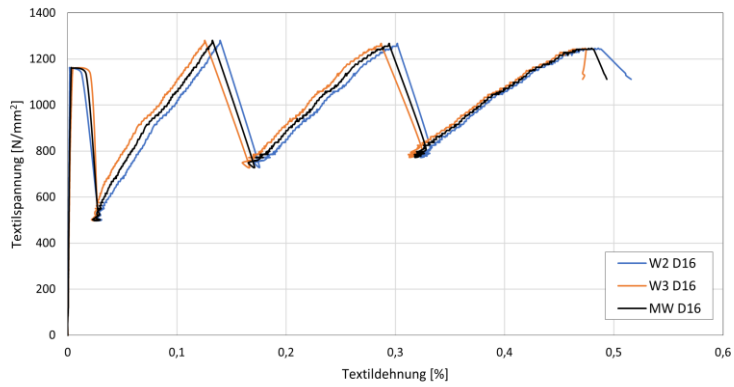
**Tabelle 1:** Eingangsgrößen textilspezifisch

Feinheit f [tex]	Dichte Basalt $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Querschnittsfläche Roving $a_{\text{tex}}$ [mm <sup>2</sup> ]	Rovingabstände s [mm]
4800	2,63	1,83	25

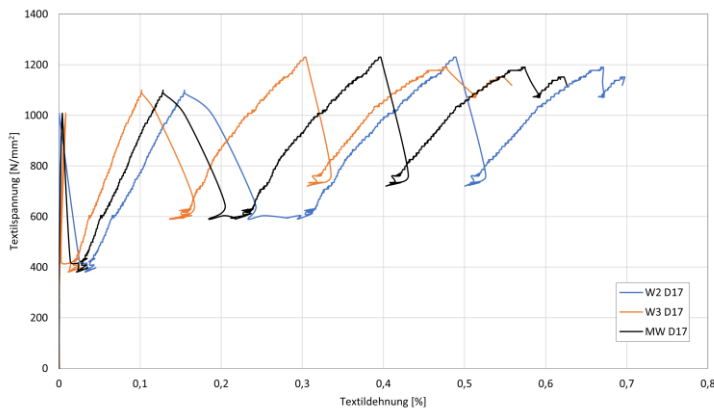
**Tabelle 2:** Eingangsparameter in Abhängigkeit des Betonquerschnitts und der Bewehrungslagen

	Breite Betonquerschnitt b [mm]	Dicke Betonquerschnitt t [mm]	Beton Brutto Querschnittsfläche $A_{\text{c,Brutto}}$ [mm <sup>2</sup> ]	Textile Bewehrung Querschnittsfläche $A_{\text{tex}}$ [mm <sup>2</sup> ]	Beton Netto Querschnittsfläche $A_{\text{c,netto}}$ [mm <sup>2</sup> ]
<b>V1-B</b>	125	30	3750	9,13	3740,87 <sup>1)</sup>
<b>V2-B</b>	125	30	3750	18,25	3731,75 <sup>2)</sup>
<b>V3-B</b>	125	40	5000	18,25	4981,75 <sup>3)</sup>
<sup>1)</sup> Einlagige Bewehrung mit fünf Rovings im Betonquerschnitt <sup>2)</sup> Zweilagige Bewehrung mit zehn Rovings im Betonquerschnitt <sup>3)</sup> Zweilagige Bewehrung mit zehn Rovings im Betonquerschnitt					

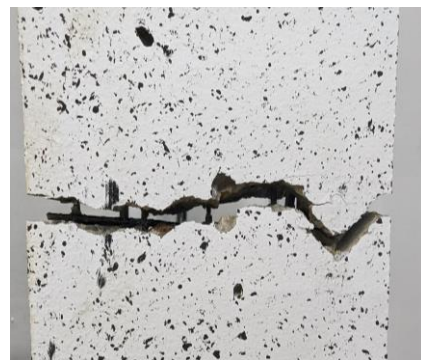
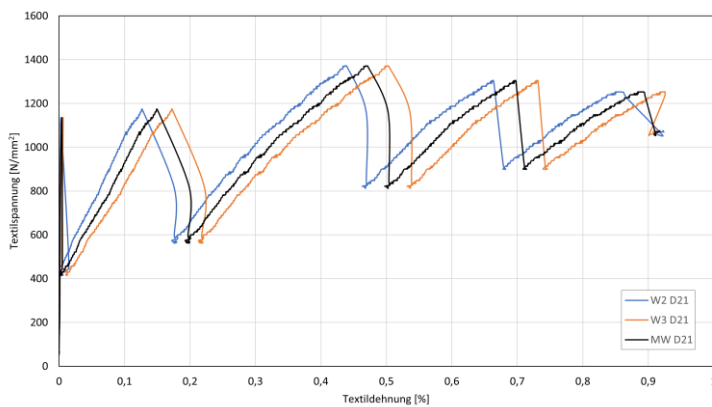
## (ii) Versuchsreihe V1-B



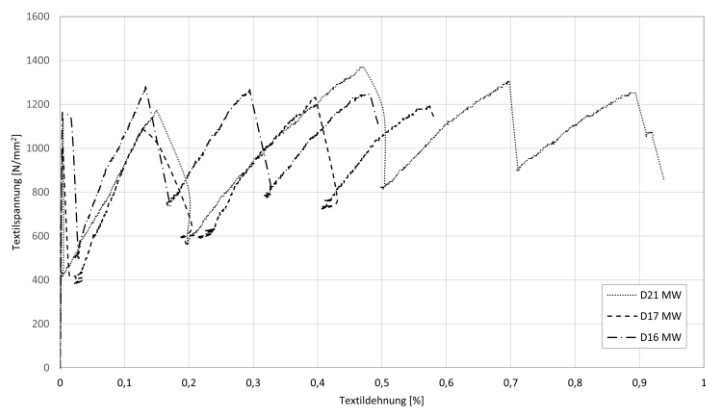
**Abbildung 1:** Spannungs-Dehnungs-Linie D16/V1-B und zugehöriger Bruchkörper nach Erreichen der Bruchspannung



**Abbildung 2:** Spannungs-Dehnungs-Linie D17/V1-B und zugehöriger Bruchkörper nach Erreichen der Bruchspannung



**Abbildung 3:** Spannungs-Dehnungs-Linie D21/V1-B mit zugehörigem Bruchkörper nach Erreichen der Bruchspannung



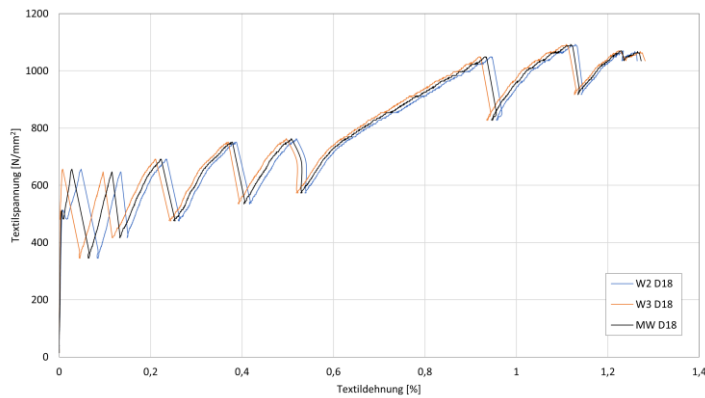
**Abbildung 4:** Mittelwertkurven der Versuchsreihe V1-B

**Tabelle 3:** Versuchsergebnisse der Versuchsreihe V1-B

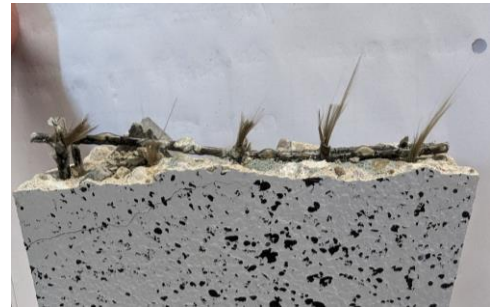
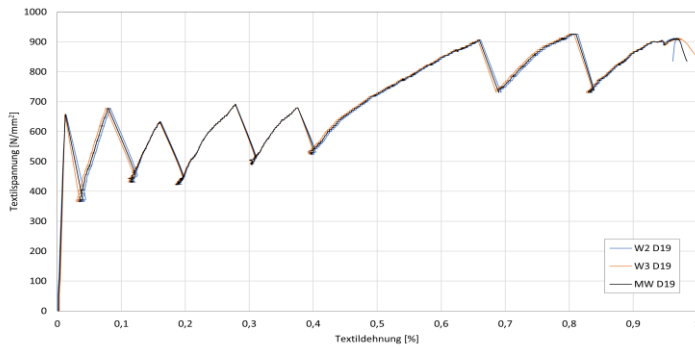
Tränkung	Bezeichnung/ Prüfserie	Bruchspannung [N/mm <sup>2</sup> ]	Bruchdehnung [%]	Spannung bei Erstriss [N/mm <sup>2</sup> ]	Dehnung bei Erstriss [%]
biogen	D16 / V1-B	1246,16	0,48	1162,67	0,0034
biogen	D17 / V1-B	1151,86	0,62	1008,17	0,0041
biogen	D21 / V1-B	1252,42	0,89	1134,00	0,0045
<b>Mittelwert</b>		1216,82	0,66	1101,61	0,0040
<b>Standardabweichung</b>		46,00	0,17	67,10	0,0005



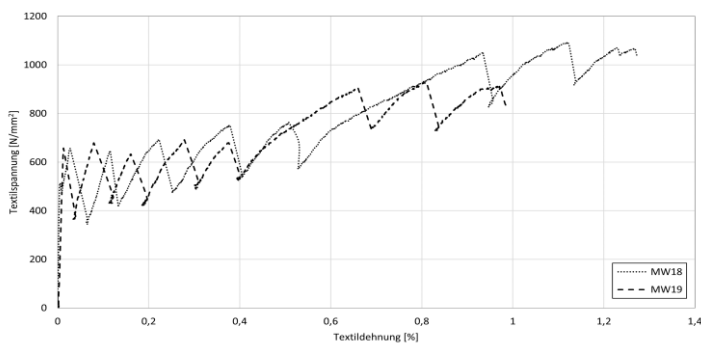
### (iii) Versuchsreihe V2-B



**Abbildung 5:** Spannungs-Dehnungs-Linie D18/V2-B und zugehöriger Bruchkörper nach Erreichen der Bruchspannung



**Abbildung 6:** Spannungs-Dehnungs-Linie D19/V2-B und zugehöriger Bruchkörper nach Erreichen der Bruchspannung

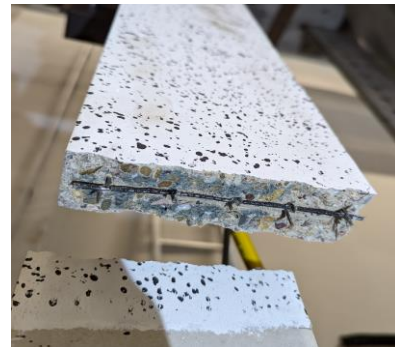
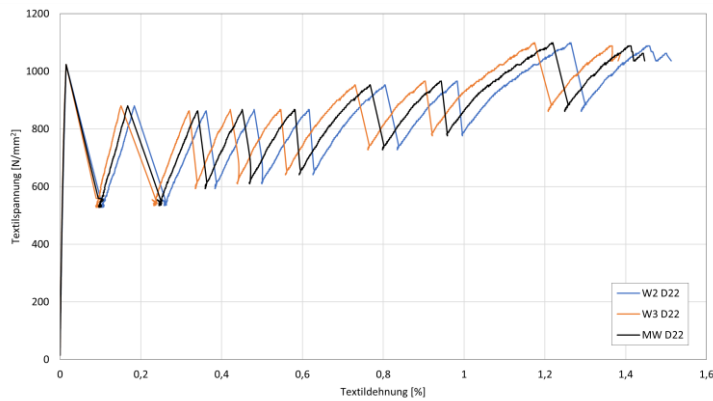


**Abbildung 7:** Mittelwertkurven der Versuchsreihe V2-B

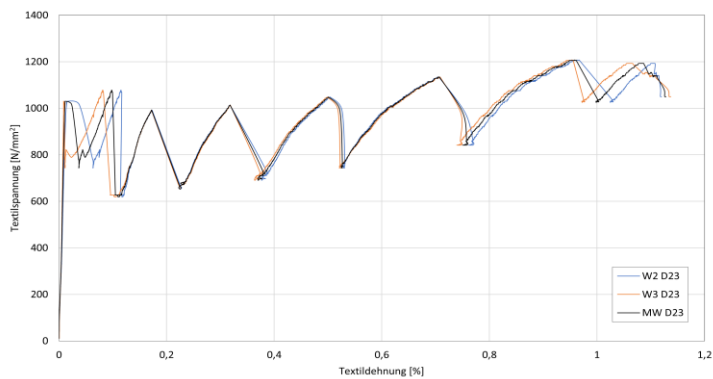
**Tabelle 2:** Versuchsergebnisse der Versuchsreihe V2-B

Tränkung	Bezeichnung/ Prüfserie	Bruchspannung [N/mm <sup>2</sup> ]	Bruchdehnung [%]	Spannung bei Erstriss [N/mm <sup>2</sup> ]	Dehnung bei Erstriss [%]
biogen	D18 / V2-B	1063,57	1,27	647,16	0,1157
biogen	D19 / V2-B	912,46	0,97	656,77	0,0128
<b>Mittelwert</b>		988,01	1,12	651,96	0,0643
<b>Standardabweichung</b>		75,55	0,15	4,81	0,0514

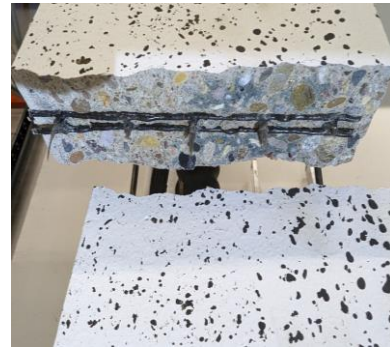
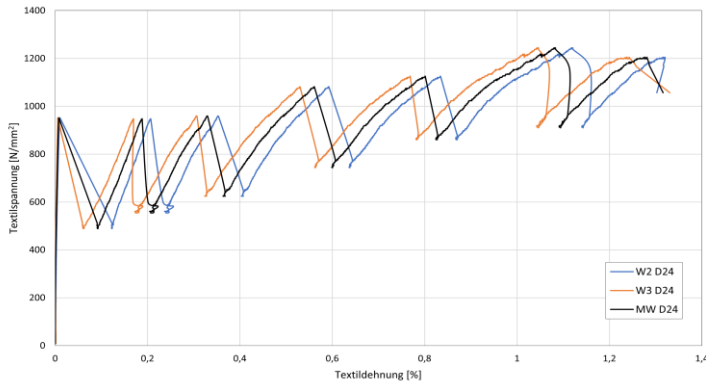
**(iv) Versuchsreihe V3-B**



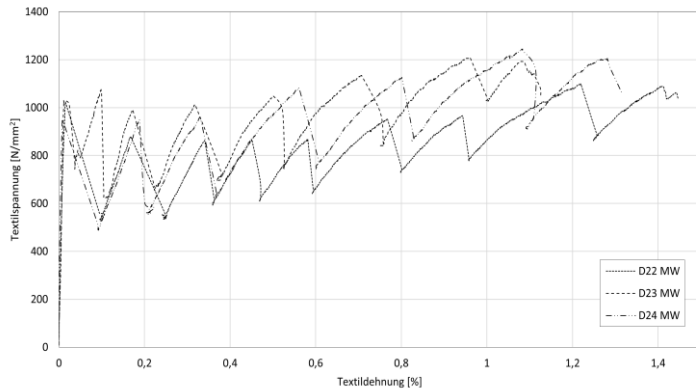
**Abbildung 8:** Spannungs-Dehnungs-Linie D22/V3-B und zugehöriger Bruchkörper nach Erreichen der Bruchspannung



**Abbildung 9:** Spannungs-Dehnungs-Linie D23/V3-B und zugehöriger Bruchkörper nach Erreichen der Bruchspannung



**Abbildung 10:** Spannungs-Dehnungs-Linie D24/V3-B und zugehöriger Bruchkörper nach Erreichen der Bruchspannung



**Abbildung 11:** Mittelwertkurven der Versuchsreihe V3-B

**Tabelle 3:** Versuchsergebnisse der Versuchsreihe V3-B

Tränkung	Bezeichnung/ Prüfserie	Bruchspannung [N/mm <sup>2</sup> ]	Bruchdehnung [%]	Spannung bei Erstriss [N/mm <sup>2</sup> ]	Dehnung bei Erstriss [%]
biogen	D22 / V1-B	1088,27	1,41	1023,20	0,0150
biogen	D23 / V1-B	1192,30	1,09	1077,86	0,0981
biogen	D24 / V1-B	1205,23	1,28	951,83	0,0079
<b>Mittelwert</b>		1161,93	1,26	1017,63	0,0403
<b>Standardabweichung</b>		52,35	0,13	51,60	0,0410

# Anhang C: Verbundversuche

## (v) Versuch B1

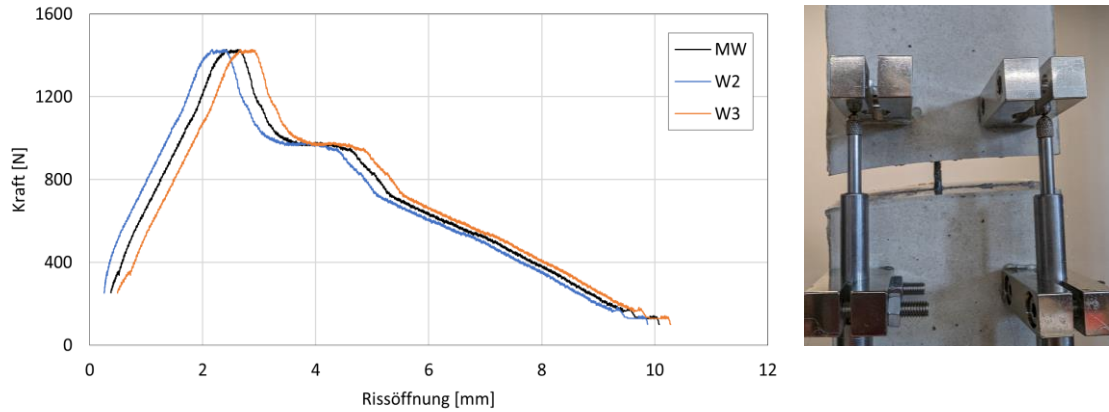


Abbildung 12: Kraft-Rissöffnungskurve des Versuchs B1 und zugehörige Rissöffnung am Probekörper

## (vi) Versuch B2

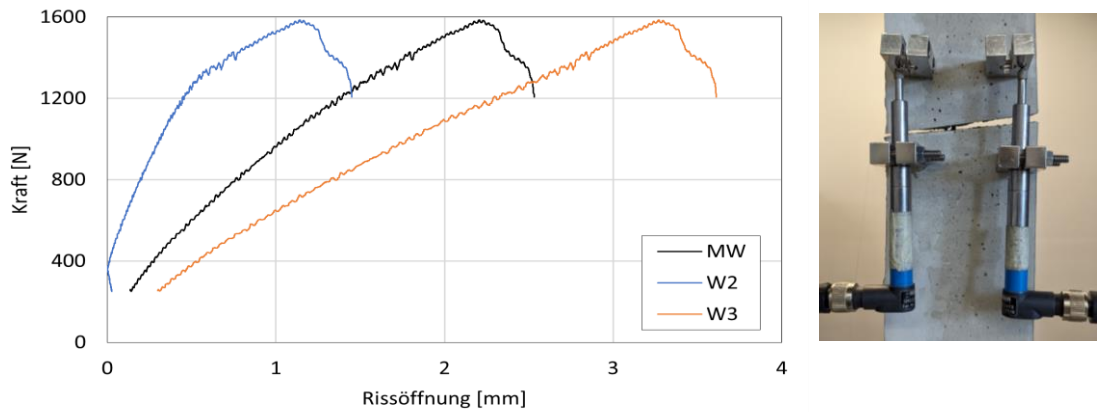
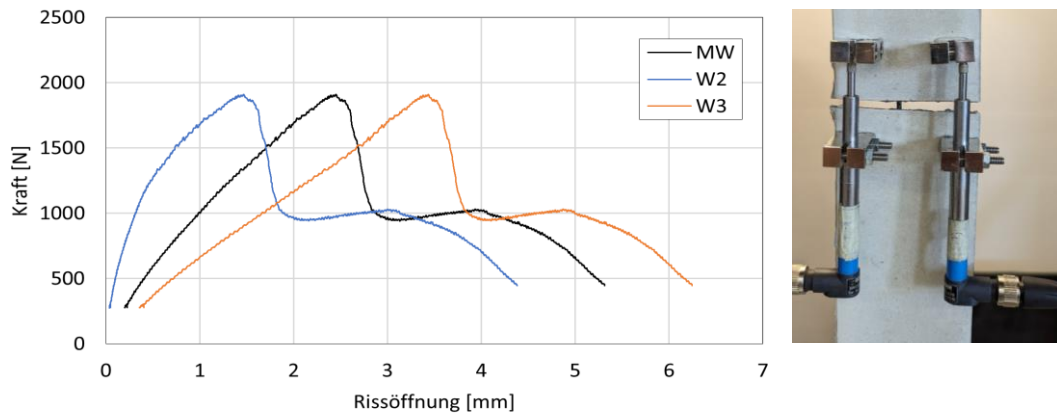


Abbildung 13: Kraft-Rissöffnungskurve des Versuchs B2 und zugehörige Rissöffnung am Probekörper

## (vii) Versuch B3



**Abbildung 14:** Kraft-Rissöffnungskurve des Versuchs B3 und zugehörige Rissöffnung am Probekörper



# Anhang D: Verankerungsversuche

## (viii) Versuch V14-V17

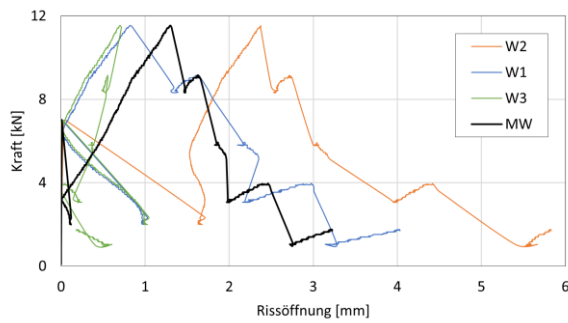


Abbildung 15: Kraft-Rissöffnungskurve V14

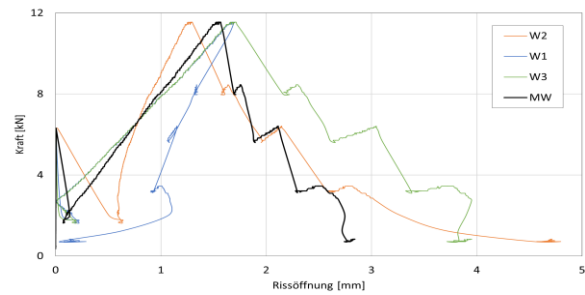


Abbildung 16: Kraft-Rissöffnungskurve V15

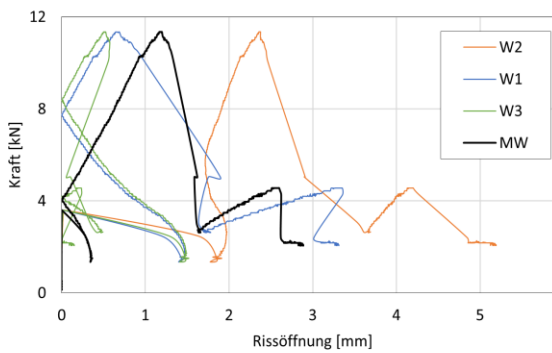


Abbildung 17: Kraft-Rissöffnungskurve V16

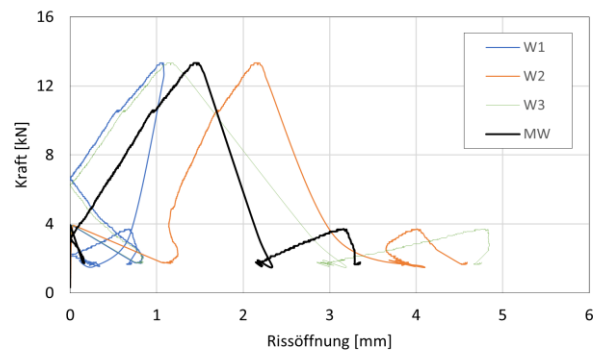


Abbildung 18: Kraft-Rissöffnungskurve V17