

Master's Thesis

Usage of wound fiber reinforcement for the production of concrete components with resolved geometries

submitted in satisfaction of the requirements for the degree

Diplom-Ingenieur

of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

Diplomarbeit

Einsatz gewickelter Faserbewehrungen zur Herstellung von Betonbauteilen mit aufgelösten Geometrien

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Maximilian Johann Alexander Gaßner, BSc

Matr.Nr.: 11802522

unter der Anleitung von

O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. M.Eng **Johann Kollegger**

Assistant Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Philipp Preinstorfer, BSc**

Institut für Tragkonstruktionen
Forschungsbereich Stahlbeton- und Massivbau
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13, 1040 Wien, Österreich

Wien, im März 2024

Danksagung

Bedanken möchte ich mich bei Herrn O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. M.Eng Johann Kollegger und Herrn Assistant Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Philipp Preinstorfer, BSc, welche mir die Bearbeitung dieses spannenden Themas ermöglicht haben. Besonders Herr Assistant Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Philipp Preinstorfer hat mir durch seine kompetente Betreuung und Unterstützung während des Verfassens dieser Arbeit eine großartige Einführung in das wissenschaftliche Arbeiten gegeben. Durch seine Expertise und der Möglichkeit auch Versuche im Labor durchzuführen, konnte ich viel lernen.

Ein besonderer Dank gebührt meinen Eltern und Großeltern, die mich seit jeher bedingungslos unterstützt und seit meiner Kindheit dazu ermutigt haben, stets wissbegierig zu sein. Ohne die menschliche und finanzielle Unterstützung meiner Eltern wäre ich heute nicht an dem Punkt, an dem ich mich befinde, und meine universitäre Ausbildung wäre nur schwer möglich gewesen.

Weiters möchte ich mich auch besonders bei meiner Partnerin Corina Schnaubelt bedanken, welche stets Verständnis für die viele Zeit aufgebracht hat, die ich für meine Ausbildung brauchte und mir eine wichtige Stütze war. Ohne sie hätte ich wahrscheinlich nicht dieses Studium in Wien begonnen und mein Lebensweg wäre ein anderer geworden.

Bedanken möchte ich mich auch bei meiner Freundesgruppe, die durch den guten Zusammenhalt und die verlässliche Unterstützung mein Studium bereichert und erleichtert hat. Ohne unsere Gruppe wäre meine Studienzzeit nicht das gewesen, was sie war. Allen voran möchte ich meinem lieben Freund Philipp Grasl danken, mit dem ich unzählige intensive Stunden für Prüfungsvorbereitung und Projektarbeiten verbracht habe. Stets mit großer Zielstrebigkeit und einer gebührenden Portion Humor. Vielen Dank für die schöne gemeinsame Zeit!

Herzogenburg im März 2024

Maximilian Gaßner

Kurzfassung

Diese Arbeit behandelt die vielversprechenden Potentiale nichtmetallischer Bewehrungen im Bauwesen als sinnvolle Ergänzung zum konventionellen Stahlbetonbau. Hochleistungsfasern, umgeben von einer Kunststoffmatrix, bieten hohe Zugfestigkeiten und Korrosionsbeständigkeit. Der Einsatz von Hochleistungswerkstoffen kann einen Wandel von massiven Bauteilen mit hohem Ressourcenverbrauch hin zu effizienten Bauteilen, die optimal dem Kraftfluss folgen, bewirken. Insbesondere im Zusammenhang der Korrosionsbeständigkeit eröffnet der Einsatz nichtmetallischer Bewehrungen großes Potential für eine materialeffiziente, filigrane Formsprache, die bereits in historischen Bauwerken Anwendung fand. Im Rahmen ganzheitlicher Baukonzepte, die die Ressourcennutzung und Kosten über den gesamten Lebenszyklus von Bauwerken berücksichtigen, könnten Bauteile mit nichtmetallischer Bewehrung zukünftig eine größere Rolle spielen und ihr volles Potential entfalten.

Im ersten Abschnitt wird darauf eingegangen, wie ein materialeffizienter Umgang mit Baustoffen ökologische, aber auch ökonomische Vorteile bringen kann. Dazu wird anhand von historischen Bauwerken der damalige Zugang zu komplexer Bauteilgeometrie unter dem Gesichtspunkt der hohen Materialkosten zu der Zeit gezeigt, und thematisiert, wie nichtmetallische Bewehrungen aufgetretene Schäden hätten verhindern können. Es werden die Ausgangsmaterialien und die Materialeigenschaften von nichtmetallischer Bewehrung verglichen, sowie der durch die hervorragenden Eigenschaften ermöglichte erweiterte Gestaltungsspielraum in Sanierung und Neubau hervorgehoben. Dafür werden Anwendungen in verschiedenen Baukontexten gezeigt und ein Überblick über die technischen, gestalterischen und nachhaltigen Aspekte nichtmetallischer Bewehrungen im Bauwesen gegeben. Im zweiten Abschnitt der Arbeit wird speziell auf Faserverbundkunststoffe (FVK) aus Basalt eingegangen. Es wird eine Versuchsreihe zur Bestimmung der Zugfestigkeit unterschiedlich hergestellter FVK durchgeführt und die, durch die Anisotropie des Werkstoffes bedingten, aufgetretenen Probleme thematisiert. Die Versuchsergebnisse der verschiedenen Produkte werden anschließend ausgewertet und interpretiert. Weiters erfolgt die Evaluierung einer neuen Methode der Bewehrungsapplikation anhand von zwei dünnwandigen Hohlkastenträgern. Diese Methode zeichnet sich dadurch aus, dass die Bewehrungsstränge in Form einer Wicklung aufgebracht werden. Dadurch lassen sich theoretisch vollautomatisiert Betonstrukturen mit aufgelösten Geometrien realisieren. Das Anwendungspotential wird anhand eines realen Projekts demonstriert.

Mit dieser Arbeit wird demonstriert wie durch den Einsatz von automatisierten und roboterassistierten Fertigungstechniken in Zukunft eine effiziente und maßgeschneiderte Bewehrungsführung für diverse Anwendungsfälle durch die gewickelte Bewehrungsapplikation geschaffen werden kann. Die bereits in Planung befindliche Erstanwendung der untersuchten Wickeltechnik zeigt, dass auch neue Fertigungstechniken relativ schnell in der Praxis implementiert werden können und nährt die Hoffnung auf weitere neue Anwendungsgebiete. Weitere Forschungsschritte könnten darin bestehen, den Einfluss der Wicklungsführung auf das Tragverhalten verschiedener Bauteile näher zu untersuchen oder auch herauszufinden, wie ausgehend von einer gegebenen Geometrie und Belastungssituation eine möglichst effiziente gewickelte Bewehrungsführung gefunden werden kann.

Abstract

This thesis delves into the promising potential of non-metallic reinforcements in construction as a substantive adjunct to traditional reinforced concrete structures. High-performance fibers, enveloped within a polymeric matrix, furnish notable tensile strength and corrosion resistance. The integration of such high-performance materials holds the prospect of transitioning construction from monolithic components characterized by extensive resource consumption to streamlined elements that effectively trace the flow of forces. Particularly within the purview of corrosion resistance, non-metallic reinforcements present considerable promise for fostering a material-efficient, intricately detailed design paradigm, as exemplified by historical edifices. Embedded within comprehensive construction paradigms that meticulously consider resource allocation and lifecycle costs, components featuring non-metallic reinforcement may emerge as increasingly pivotal, thereby unleashing their full potential.

The initial segment of this thesis examines the potential advantages of adopting a material-efficient approach in construction, elucidating both ecological and economic gains. Historical structures serve as exemplars to illustrate the historical methodology of handling intricate component geometries, considering the prevailing high material costs of the era, and underscore how non-metallic reinforcement could have averted ensuing damages. A comprehensive comparison of the fundamental materials and properties of non-metallic reinforcement is conducted, accentuating the expanded design flexibility for refurbishment and novel construction scenarios facilitated by its exceptional attributes. Diverse applications across construction contexts are showcased, providing an encompassing overview of the technical, design, and sustainability facets of non-metallic reinforcement within the construction domain. The subsequent section of this thesis delves specifically into fiber-reinforced plastics (FRP) derived from basalt. A series of tests is executed to ascertain the tensile strength of diversely manufactured fiber-reinforced composites, shedding light on challenges arising from the anisotropy inherent in the material. Subsequent analysis and interpretation of the test outcomes for various products are presented. Additionally, an innovative reinforcement application method is assessed through the utilization of two slender box girders. Notably, this method involves the application of reinforcement strands in a winding configuration, theoretically enabling the realization of fully automated concrete structures with intricate geometries. The practical application potential is demonstrated through a tangible project.

This thesis illustrates the potential of employing automated and robot-assisted production techniques for the development of efficient and tailored reinforcement guidance across diverse applications, particularly through wound reinforcement application. The early applications of the scrutinized winding technology, currently in the planning stage, indicate the expeditious implementation of novel production techniques in practice, fostering expectations for additional areas of application. Subsequent research endeavors might involve a more intricate examination of the impact of winding guidance on the load-bearing behavior of various components, or the exploration of optimal wound reinforcement guidance strategies based on specific geometries and load scenarios.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	13
1.1	Ausgangslage	13
1.2	Zielsetzung	13
1.3	Abgrenzung	14
2	Erweiterter Gestaltungsspielraum durch nichtmetallische Bewehrungen	15
2.1	Allgemeines	15
2.2	Historie von komplexen Geometrien im Betonbau	15
2.3	Einsatz von Faserverbundkunststoffen und Produkten im Betonbau	17
2.3.1	Historischer Überblick	17
2.3.2	Fasern	18
2.3.3	Bewehrung aus nichtmetallischen Faserverbundkunststoffen	23
2.4	Anwendungsbeispiele	30
2.4.1	Erhaltung und Ertüchtigung von bestehenden Bauwerken	30
2.4.2	Hochbau	31
2.4.3	Brückenbau	33
2.4.4	Schalenskonstruktion	35
2.4.5	Spezialanwendungen	36
2.5	Berechnungsgrundlagen und Normierung	37
2.5.1	Duktilität vs. Verformungskapazität	37
2.5.2	Bestehende Regelwerke im Vergleich	37
3	Gewickelte Basaltbewehrung	41
3.1	Allgemein	41
3.2	Zugversuche an unterschiedlichen Basaltgarnen	41
3.2.1	Versuchsaufbau und Zielsetzung	41
3.2.2	Probleme bei der Versuchsdurchführung	43
3.2.3	Versuchsdurchführung mit ausbetonierten Stahlrohren	43
3.2.4	Interpretation der Versuchsergebnisse	45
3.3	Gewickelte Träger	46
3.3.1	Allgemein	46
3.3.2	Versuchsergebnisse der Prüfung im Labor	47
3.3.3	Versuchssimulation mit ATENA 2D	49
3.3.4	Photogrammetrische Versuchsauswertung	51
3.3.5	Vergleich der Simulation mit den Versuchsergebnissen	55
4	Ausblick Einsatzmöglichkeiten	57
4.1	Stützenkonstruktion Flying Roof	57
4.2	Biegebemessung	58
5	Zusammenfassung und Ausblick	62

A	Versuchsauswertungen Zugversuch	70
A.1	Zugversuche vom 21.12.2023 mit UHPC verfüllten Stahlrohren - Einzelne Plots .	70
A.2	Zugversuche vom 27.11.2023 mit verschiedenen Verankerungen - Einzelne Plots .	71
A.3	Vergleich der Zugversuche von gleichen Probereihen	73
B	Versuch: Gewickelte Träger	75
B.1	Versuchsauswertung - Labordaten	75
B.2	Last Verformungsdiagramme Atena Standardeinstellung	75
B.3	Neues Materialmodell nach Červenka	76
C	Berechnungsergebnisse INCA2	77

Abbildungsverzeichnis

2.1	Salginatobelbrücke, geplant von Maillart 1929, entnommen aus [12] und [13]. . .	16
2.2	Flugzeughangar in Orvieto, geplant von Nervi 1938, in Anlehnung an [15].	16
2.3	Palazetto dello Sport in Rom, geplant von Nervi 1957, in Anlehnung an [15]. . .	17
2.4	Prinzipieller Aufbau von textiler Bewehrung, entnommen aus [19].	18
2.5	Carbonfasern unterschiedlicher Feinheit 67–3300 tex, in Anlehnung an [23]. . . .	19
2.6	Materialvergleich: FVK und Stahl, Zugfestigkeiten und Spannungsdehnungsbeziehung, entnommen aus [5].	20
2.7	a) Basaltgestein, Foto von Franz P. Sauerteig. und b) Schematischer Ablauf des Düsenziehverfahrens, in Anlehnung an [33].	21
2.8	Ablaufprozess im Pultrusionsverfahren, in Anlehnung an [5].	24
2.9	Bewehrungsstäbe aus FVK, entnommen aus [21].	25
2.10	Beispiele für Textilien, in Anlehnung an [21].	26
2.11	Fertigung von Bewehrungsmatten, in Anlehnung an [5].	26
2.12	Einbau von frischem Textilbeton, entnommen aus [45] und [44].	28
2.13	Mechanische Eigenschaften von verschiedenen FVK-Produkten, entnommen aus [21].	29
2.14	Ertüchtigungsmaßnahmen von Bestandstragwerken, in Anlehnung an [53, 57, 58].	31
2.15	(a) Vorgespannte Trapezplatten aus Textilbeton, entnommen aus [16] und (b) aufgelöstes Deckenelement, entnommen aus [59].	32
2.16	(a) Fassadenplatten mit Lochbild, entnommen aus [60] und (b) Fassadenplatten Gestaltungsmöglichkeiten betoShell®, Foto: Ben Vulkers [61].	32
2.17	Textilbetonbrücke in Oschatz, nach [53] und [62].	33
2.18	Ansicht und Querschnitt der Textilbeton-Fußgängerbrücke in Albstadt-Lautlingen, entnommen aus [63].	34
2.19	Variantenuntersuchung der Fußgängerbrücke in Albstadt-Ebingen, entnommen aus [64].	35
2.20	Schalenkonstruktion aus Textilbeton, nach [66] und [65].	35
2.21	FVK in der Anwendung in der Geotechnik, entnommen aus [67].	36
3.1	Probekörper für Zugversuche, hergestellt aus Basaltfasern.	42
3.2	Verschiedene Versuchsausführungen	43
3.3	Versuchsaufbau zur Bestimmung der Zugtragfähigkeit, angelehnt an [79].	44
3.4	Vergleich der Zugversuchsdurchführungen mit und ohne UHPC-Verankerung für die 9600 tex unidirektionalen Garne (links) und 4800 tex geflochtenen Garne (rechts).	44
3.5	Vergleich der erreichten Zugfestigkeiten (Mittelwert und Standardabweichung). .	45
3.6	Variante 1 der gewickelten Träger	46
3.7	Variante 2 der gewickelten Träger	46
3.8	Bewehrungsführung der beiden gewickelten Trägervarianten	47
3.9	Versagensbilder von Variante 1 (links) und Variante 2 (rechts)	47
3.10	Kraft-Verformung-Beziehung von Variante 1 und 2 der Versuche	48
3.11	Querkrafttragmechanismen, in Anlehnung an [5].	48
3.12	Modellbildung in ATENA, Variante 1 (links) und Variante 2 (rechts)	50

3.13	Ergebnisvisualisierung der Simulation für Variante 1, Spannung in der Zugbewehrung (links) und Rissbild (rechts)	50
3.14	Ergebnisvisualisierung der Simulation für Variante 2, Spannung der Bewehrung (links) und Rissbild (rechts)	51
3.15	Kraft-Verformung-Beziehung von Variante 1 und 2 aus den Simulationen	51
3.16	Prinzip der digitalen Bildkorrelation, in Anlehnung an [81].	52
3.17	Rissentwicklung Variante 1	53
3.18	Rissentwicklung Variante 2	54
3.19	Rissöffnung des maßgebenden Schubrisses beider Trägervarianten	55
3.20	Vergleich der Kraft-Verformung-Beziehungen der Versuchsdurchführung mit jenen der Simulation.	56
4.1	Visualisierung der geplanten Konstruktion, © Basalt+.	57
4.2	Visualisierung der geplanten Konstruktion, © Basalt+.	58
4.3	a) Versagen der Textilbewehrung und b) Versagen der Betondruckzone, entnommen aus [7].	59
4.4	Vorbemessung auf Querschnittsniveau mit INCA2.	59
4.5	Abschätzung der Ganghöhe für die gewickelte Bewehrung.	60
4.6	Bewehrungskonzept	61
B.1	Kraft-Zeitverlauf von Variante 1 und 2 der Versuche	75
B.2	F-u-Beziehung von Versuch und Atena Simulation (sbeta)	75
B.3	F-u-Beziehung von Versuch und Atena Simulation (nonlinear cementitious)	76
B.4	F-u-Beziehung von Versuch und Atena Simulation Variante 1	76
B.5	F-u-Beziehung von Versuch und Atena Simulation Variante 2	76
C.1	Berechnung LF1 - ULS	77
C.2	Berechnung LF2 - Anprall	77

Tabellenverzeichnis

2.1	Durchmesser verschiedener Fasern, nach [24].	19
2.2	Materialeigenschaften verschiedener Fasern, nach [5]	19
2.3	Textilbetonrezepturen und zugehörige Druckfestigkeit nach 28 Tagen ¹	28
2.4	Materialkennwerte von verschiedenen FVK-Produkten, erstellt von Grasl [51]	30
2.5	Übersicht der Regelwerke zu FVK-bewehrten Betonbauteilen	37
3.1	UHPC Betonrezeptur	44
3.2	Sika Grout 312 ²	46
3.3	Basaltwicklung	46
3.4	Basaltstäbe ²	46
3.5	Einstellungen für das Materialmodell SBeta, abweichend der voreingestellten Werte	49
3.6	Basalttextil-verschmiert	49
3.7	Basaltstab DN16	49

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Ausgangslage

Beton ist weltweit nach Wasser die am häufigsten verwendete Ressource [1]. Demnach stellt Beton den am meisten verwendeten Baustoff der Welt dar. Trotz der Covid-19-Pandemie, welche zu einem historischen Rückgang der globalen CO₂ Emissionen führte, erreichten allein die Emissionen des Baubereiches bereits im Jahr 2021 mit einem Anteil von ca. 37 % der globalen CO₂ - Emissionen wieder einen neuen Rekordwert [2]. In einem Artikel verfasst von Thaler [3] bestätigt Ildiko Merta auch, dass Beton mit einem Anteil von 90 Prozent zwar das mit Abstand häufigst eingesetzte Baumaterial weltweit ist, aber trotz seines Rufes per se keine schlechtere Ökobilanz als andere Baumaterialien aufweist. Lediglich die enorme Menge an Beton und Zement ist ausschlaggebend für den großen Anteil an den weltweiten CO₂ - Emissionen. Rein die Zementproduktion ist für ca. 5% bis 7% der weltweiten CO₂ - Emissionen verantwortlich [3] [4].

Umwelttechnisch ist es somit interessant, möglichst volumseffiziente Bauteile aus Beton herzustellen, um so die verbaute Menge reduzieren zu können. Mit dem Einsatz von nichtmetallischen Bewehrungselementen kann genau dies erreicht werden. Wie in Curbach et al. [5] erläutert, liegt dies hauptsächlich daran, dass nichtmetallische Bewehrung im Gegensatz zur Stahlbewehrung nicht korrodiert und somit die Lebensdauer der Bauteile erhöht wird. Außerdem können die Instandhaltungskosten über den gesamten Lebenszyklus des Bauwerks hinweg reduziert werden. Zudem ermöglicht nichtmetallische Bewehrung die Reduzierung der Betondeckung auf ein Minimum von wenigen Millimetern und bietet eine höhere Zugfestigkeit (1200 bis über 3000 N/mm² je nach Fasermaterial im Vergleich zu 500 bis 600 N/mm² bei Stahlbewehrung), was die Herstellung dünnerer und filigranerer Bauwerke ermöglicht. Abhängig von der Anwendung können so bis zu 80 % an Beton eingespart werden: eine enorme Menge an Material, das so nicht hergestellt, transportiert, aber auch nicht recycelt oder entsorgt werden muss [5].

1.2 Zielsetzung

Aufbauend auf die zuvor definierte Ausgangslage ist es das Ziel dieser Arbeit herauszuarbeiten, wie der Einsatz von nichtmetallischer Bewehrung bei komplex geformten Geometrien erfolgen kann. Das Ziel besteht darin, durch die Verwendung von Hochleistungsbaustoffen möglichst materialeffiziente Bauteile herzustellen. Dafür wird zu Beginn der Arbeit ein Überblick über historische Anwendungsbeispiele von geometrisch anspruchsvollen Formen gegeben, sowie Gründe aufgezeigt, warum heute ein Trend hin zu massigen Bauteilen mit hohem Materialverbrauch zu sehen ist. Anschließend soll eine neue Fertigungstechnik für die Bewehrungsapplikation auf ihre Machbarkeit untersucht, und anhand von softwaregestützten Simulationen und Versuchen im Labor deren Einsatzpotential überprüft werden. Abschließend soll anhand eines konkreten

Bauvorhabens die Einsatzmöglichkeiten der neuen Bewehrungstechnik getestet werden.

1.3 Abgrenzung

Diese Arbeit soll einen Überblick über die derzeit in Verwendung befindlichen nichtmetallischen Bewehrungsprodukte liefern und anhand von ausgewählten bereits realisierten Beispielprojekten die vielseitigen Einsatzmöglichkeiten aufzeigen. Auf den Berechnungsvorgang selbst wird nur grundsätzlich eingegangen, dieser aber nicht näher erläutert. An dieser Stelle sei für einen genaueren Einblick in die Bemessung an die Arbeiten von Krug [6], Rempel et al. [7] oder Curbach et al. [5] verwiesen.

Die Herstellung der Versuchsträger und die Durchführung der Versuche, welche in Kapitel 3 ausgewertet werden, sind nicht Bestandteil dieser Arbeit, lediglich die aus den Versuchen gewonnenen Daten wurden ausgewertet und interpretiert. Für die Stützkonstruktion, welche am Ende von Kapitel 3 erläutert wird, wurde keine detaillierte Bemessung angefertigt, sondern anhand der verfügbaren Daten eine überschlagsmäßige Vorbemessung durchgeführt.

Kapitel 2

Erweiterter Gestaltungsspielraum durch nichtmetallische Bewehrungen

2.1 Allgemeines

Ziel dieses Kapitels ist es, einen kurzen Überblick über historische Bauweisen mit komplexen Geometrien und deren Entstehung zu geben. Anschließend wird eine Zusammenfassung zu Faserverbundkunststoffen (FVK), ihren Bestandteilen, Eigenschaften sowie möglichen Produkten für den Einsatz im Bauingenieurwesen angeführt. Darauf aufbauend werden anhand von Anwendungsbeispielen im Hoch- und Brückenbau sowie bei Tragwerkserhaltungsmaßnahmen die Einsatzmöglichkeiten dieser neuen Bauprodukte aufgezeigt. Abschließend wird auf Berechnungsmethoden eingegangen und der gegenwärtige Normenstand im Zusammenhang mit nichtmetallischer Bewehrung betrachtet.

2.2 Historie von komplexen Geometrien im Betonbau

Durch die Entwicklung von hydraulisch gebundenen Bindemitteln und der industriellen Herstellung dieser wurde zu Beginn des 19. Jahrhunderts, insbesondere durch Joseph Aspdin (1779–1855) und dessen Sohn William Aspdin (1815–1864), mit dem sogenannten Portlandzement der Grundstein für die Verbreitung der Betonbauweise gelegt [8].

In Zusammenhang mit der Entwicklung von Bindemitteln erkannte man, dass es von Vorteil ist, Drahtgewebe und Eiseneinlagen zur Erhöhung der Zugfestigkeit einzubauen. Während sich der Franzose Joseph Louis Lambot (1814–1887) 1855 mit der Herstellung von Eisenbetongegenständen für den Einsatz im Schiffsbau beschäftigte, veröffentlichte der französische Ingenieur und Bauunternehmer Francois Coignet (1814–1888) 1861 ein Buch mit Grundregeln zur Verstärkung von Beton durch Eiseneinlagen anhand von Ausführungsbeispielen. Thaddeus Hyatt (1816–1901) beschrieb 1877 erstmals die Verbundwirkung zwischen Beton und Eiseneinlagen aus Versuchserkenntnissen in seinem Buch. Aber erst der ebenfalls französische Gärtner Joseph Monier (1833–1906) ließ sich ab 1867 die Kombination von Beton mit Metallgitter in mehreren Patenten schützen [9].

Eine optimale Bewehrungsführung lässt sich an einer Analyse der Hauptspannungen ablesen. In der Mechanik bezeichnen die Hauptspannungsverläufe jene theoretischen Linienverläufe in einem Baukörper, entlang derer sich keine Schubspannungen, sondern ausschließlich Druck- und Zugspannungen entwickeln. Diese stehen als solche senkrecht zueinander. Bei den Hauptspannungsrichtungen handelt es sich demnach um jene Richtungen im Baukörper, entlang welcher sich die maximalen Spannungen einstellen. Ein Spannungszustand, etwa ausgelöst durch eine Biegebeanspruchung, kann durch die Hauptspannungen in Druck- und Zugverläufe (Trajektorien) dargestellt werden. Risse bilden sich in erster Linie entlang der Hauptzugspannungstrajektorien weshalb es vernünftig ist, den Baukörper entlang der Hauptspannungen mit Rippen oder Stahleinlagen zu verstärken [10].

Der Schweizer Bauingenieur Robert Maillart (1872 – 1940), ein Pionier im Stahlbetonbau, schuf durch seine detaillierte Erforschung der Kraftverläufe im Stahlbeton, konsequente Berechnung und Liebe zum konstruktiven Detail äußerst effiziente Bauwerke. Diese erfüllten nicht nur höchste ingenieurtechnische Standards, sondern zeichnen sich auch durch ästhetische Eleganz aus. Ein herausragendes Beispiel ist die Salginatobelbrücke bei Schiers im Kanton Graubünden. Eine Dreigelenk-Bogen-Brücke, die 1930 fertiggestellt wurde, und in Abbildung 2.1 dargestellt ist. Bis heute erfüllt sie gestalterische Anforderungen an Übersichtlichkeit, Nachvollziehbarkeit des Kräfteverlaufs, Ästhetik und Eleganz und bleibt durch ihren klassischen Charakter zeitlos [11].



Abb. 2.1: Salginatobelbrücke, geplant von Maillart 1929, entnommen aus [12] und [13].

Besonders an den Bauwerken von Pier Luigi Nervi (1891-1979), welcher zu den einflussreichsten Ingenieuren des 20. Jahrhunderts zählt, lässt sich ein Tragwerksverständnis auf Basis der Hauptspannungsrichtungen erkennen. Nervi ordnete linienförmige Verstärkungsrippen an Tragwerksstellen wo Hauptspannungen zu erwarten sind an. Damit entstanden Baukörper, die nicht einfach zu verwirklichen waren, jedoch den Werkstoff Stahlbeton effizient einsetzten und darüber hinaus auch noch ästhetisch beeindruckend waren. Der Flugzeughangar der italienischen Luftwaffe in Orvieto, erbaut 1938 (Abbildung 2.2) und der kleine Sportpalast, Palazetto dello Sport (Abbildung 2.3), erbaut 1956 in Rom sind exemplarische Beispiele von Pier Luigi Nervis beeindruckenden Bauwerken. Nervi war nicht nur ein Ingenieur, sondern auch Bauunternehmer, der seine Aufträge durch Wettbewerbsvorteile gewinnen musste und dafür auch die Abwicklung des Bauprozesses selbst effizient und günstig planen musste. Das Ergebnis waren Gebäude, die Effizienz in der strukturellen Form mit Effizienz in Herstellung und Bau verbanden [14].

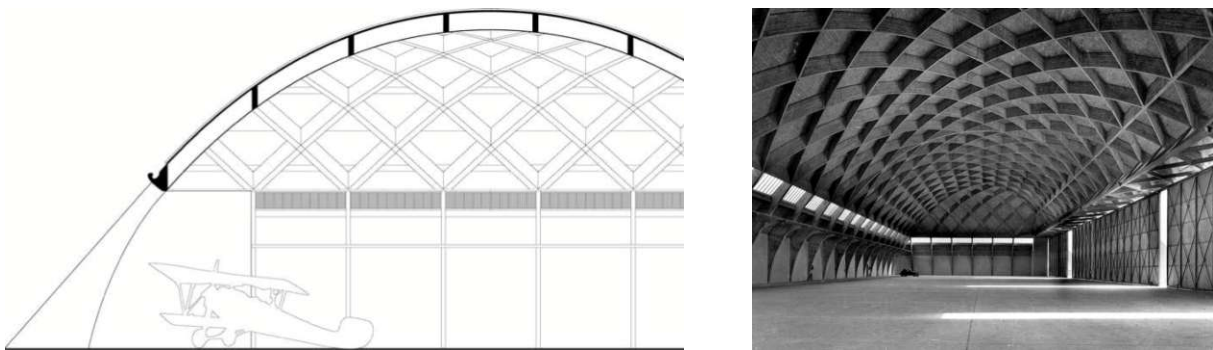


Abb. 2.2: Flugzeughangar in Orvieto, geplant von Nervi 1938, in Anlehnung an [15].

Das Hauptaugenmerk von damaligen Bauwerken lag auf einer möglichst materialsparenden Konstruktionsart, um den Hauptkostenfaktor, nämlich die Baumaterialien, niedrig halten zu können. Bei gegenwärtigen Bauwerken werden hingegen aufgrund von hohen Lohnkosten vermehrt einfache geometrische Formen eingesetzt. Rechteckige, im rechten Winkel zueinander stehende Bauteile, benötigen zwar mehr Material als jene aus Maillarts oder Nervis Entwürfen, können auf der Baustelle jedoch schnell und einfach hergestellt werden und sparen somit teure Arbeitszeit im Bauablauf ein. Sowohl bei früheren als auch bei heutigen Bauaufträgen sind die Kosten der entscheidende Faktor bei der Vergabe. Im Hinblick auf ökologische Aspekte und deren Berücksichtigung in der gesamtwirtschaftlichen Betrachtung von Bauwerken könnte sich durch den Einsatz neuer Baumaterialien der Fokus wieder hin auf eine materialeffizientere Bauweise ergeben.

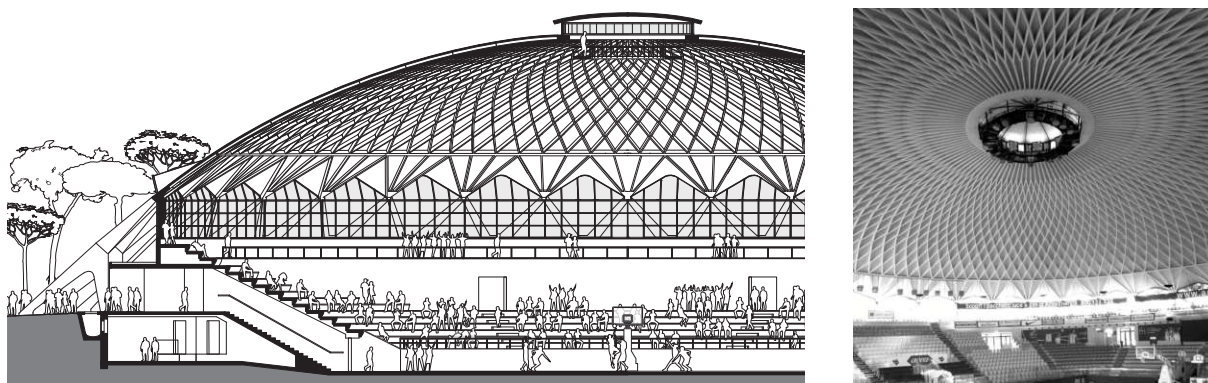


Abb. 2.3: Palazetto dello Sport in Rom, geplant von Nervi 1957, in Anlehnung an [15].

Neben den Errichtungskosten spielt auch die Dauerhaftigkeit eine wesentliche Rolle in gegenwärtigen Konstruktionsprinzipien. Vorgespannte dünnwandige Bauteile aus Beton, Faltwerke oder Schalelemente waren früher wegen ihrer Leichtigkeit, Wirtschaftlichkeit und Ästhetik weit verbreitet. Heute sind solche Tragwerke im Bauwesen quasi von der Bildfläche verschwunden, hauptsächlich aufgrund von Schadensfällen, die meist auf Bewehrungskorrosion durch eine zu geringe Betondeckung zurückzuführen sind. Für eine Renaissance dieser eleganten Bauteile sind korrosionsbeständige Bewehrungen erforderlich, beispielsweise aus faserverstärktem Kunststoffen (FVK). Dadurch können werkstoffgerechte Bauteile konstruiert werden, die leicht, dauerhaft und aufgrund des geringen Materialverbrauchs auch nachhaltig sind [16].

2.3 Einsatz von Faserverbundkunststoffen und Produkten im Betonbau

2.3.1 Historischer Überblick

Wie in Curbach et al. [5] ausgeführt, wurden in den vergangenen Jahrzehnten weltweit verschiedene faserbasierte Alternativen für den herkömmlichen Bewehrungsstahl entwickelt. Bereits Mitte der 1990er Jahre wurde das Potential von textilbewehrtem Beton erkannt und Forscher der TU Dresden und RWTH Aachen stellten erste gezielte Untersuchungen zum Potential textiler Bewehrungen mit Fasern aus alkaliresistentem Glas an. Etwa 10 Jahre später, ab Mitte der 2000er Jahre verlagerte sich der Fokus hin zu Bewehrungen auf Basis von Carbonfasern und das Wissen über den neuartigen Baustoff wurde durch erste Praxisprojekte verbreitet [5].

Seit wenigen Jahren werden vermehrt Fasern aus Basalt erforscht. Die Herstellung von Basaltfasern erfordert weniger Arbeitsschritte und verbraucht dabei auch deutlich weniger Energie im Vergleich zu Kohlenstofffasern. Darüber hinaus sind Basaltfasern in der Regel kostengünstiger als Kohlenstofffasern. Aufgrund der laufenden Genese durch vulkanische Aktivitäten (jährlich bilden sich bis zu 1 km³ Basaltgestein, ca. 2,6 Milliarden Tonnen) und seines extrem großen Vorkommens ist der Rohstoff Basalt praktisch als unerschöpflich anzusehen [17].

2.3.2 Fasern

Wie von Burtscher [17] beschrieben, ist eine Faser grundsätzlich ein, im Verhältnis zu ihrem geringen Durchmesser, extrem lang ausgedehntes, flexibles Element. Je nach Ausgangsmaterial kann man Fasern in zwei Hauptgruppen, die natürlichen und die synthetischen Fasern einteilen [18]. Die heute für Faserverbundkunststoffe im Bauwesen verwendeten Fasern können alle den synthetischen Fasern zugeordnet werden.

Laut Curbach et al. [5] lassen sich Fasern aufgrund ihrer Länge in Kurzfasern und Endlosfasern unterscheiden. Kurzfasern bestehend aus Glas, Stahl oder Kunststoff werden der zementbasierten Umgebungsmatrix ungerichtet zugegeben, um eine Erhöhung der Widerstandswerte zu erreichen. Zur baupraktischen Anwendung kommt dies beispielsweise für hoch beanspruchte Industriefußböden oder zur Ertüchtigung von bestehenden Tragwerken. Bei endlosfaser-basierten Bewehrungen handelt es sich um eine Vielzahl von gebündelten, parallel nebeneinanderliegenden Fasern, auch Filamente genannt. Im allgemeinen Sprachgebrauch werden diese gerichteten Faserbündel auch oft als Garne oder spezifischer als Rovings bezeichnet. Die Filamente werden in eine Kunststoffmatrix eingebettet und können unter dem Begriff Faserverbundkunststoffe (FVK) zusammengefasst werden. Die umhüllende Kunststoffmatrix, oft auch als Tränkung oder Imprägnierung bezeichnet, schützt dabei die feinen Filamente (Durchmesser zwischen 5 und 50 μm) vor mechanischer Beschädigung, sorgt für einen Verbund zwischen den einzelnen Fasern und stellt die korrekte Faserausrichtung sicher. In Abbildung 2.4 ist der prinzipielle Aufbau von Textilbewehrung aus orthogonal angeordneten Filamentgarne ersichtlich.

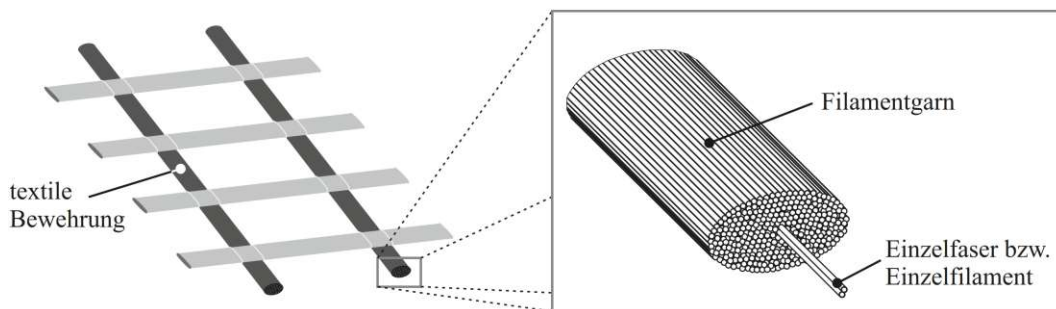


Abb. 2.4: Prinzipieller Aufbau von textiler Bewehrung, entnommen aus [19].

Die Eignung einer Faser als Betonbewehrung erfordert das Erfüllen spezifischer Anforderungen. Die Materialien müssen sowohl im alkalischen Milieu als auch nach der Passivierung korrosionsbeständig sein. Zudem sind ein hoher Elastizitätsmodul (E-Modul), hohe Festigkeit und wirtschaftliche Aspekte entscheidend für die Verwendbarkeit. Im Hoch- und Ingenieurbau zeigt sich das größte Potenzial für den Einsatz von Textilbeton für Fasern aus alkaliresistentem Glas (AR-Glas) und Carbon [20]. Die Entwicklung von Basaltfasern, die aufgrund der sehr hohen Verfügbarkeit des Rohstoffs einen klaren Vorteil bieten, befindet sich noch in einem frühen

Stadium, was zu einer derzeit noch etwas begrenzten Produktpalette führt [21].

Als Maß für die Stärke des Filamentgarns wird nach DIN 6905-1 [22] die Feinheit in der Einheit tex angegeben. Ein tex entspricht dabei einer längenbezogenen Masse von einem Gramm pro 1000 m Länge. In Abbildung 2.5 sind Carbonfasern mit unterschiedlicher Feinheit von 67 bis 3300 tex und einer Filamentanzahl von 1000 bis 50000 ersichtlich [23]. Die Tabelle 2.1 bietet einen Überblick über die Durchmesser verschiedener Fasertypen, einschließlich menschlichem Haar, durch Angabe der ungefähren Durchmesser in Mikrometern (μm). Um die Querschnittsfläche eines Produktes zu bestimmen, wird zusätzlich die Dichte des Materials benötigt. Die Querschnittsfläche eines Carbonfilamentgarns von $1,81 \text{ mm}^2$ ergibt sich beispielsweise als Quotient einer von Dichte $1,77 \text{ g/cm}^3$ und einer Feinheit von 3200 tex (3200 g/km) [5].

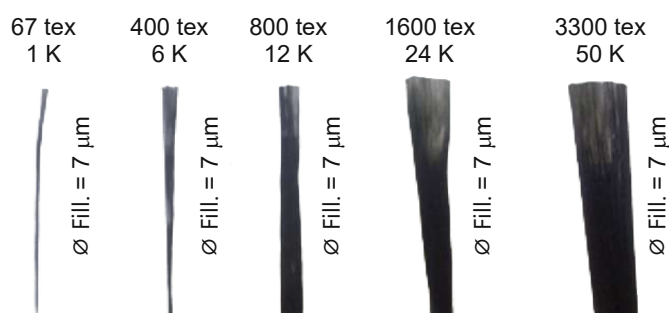


Abb. 2.5: Carbonfasern unterschiedlicher Feinheit 67–3300 tex, in Anlehnung an [23].

Durchmesser verschiedener Fasern	
menschliches Haar	50-80 μm
Glasfaser	ca. 25-30 μm
Carbonfaser	ca. 7 μm
Basaltfaser	ca. 10-15 μm

Tab. 2.1: Durchmesser verschiedener Fasern, nach [24].

In Abbildung 2.6 ist ein Vergleich der physikalischen und geometrischen Eigenschaften der am häufigsten verwendeten Fasermaterialien zu herkömmlichen Bewehrungsstahl dargestellt. Die Zugfestigkeit von Faserverbundkunststoffen sind signifikant höher als jene von Bewehrungsstahl, was in einer geringeren benötigten Querschnittsfläche bei gleicher Belastung resultiert. Während die Spannungs-Dehnungs-Beziehung bei Bewehrungsstahl ein ausgeprägtes duktilen Verhalten mit plastischem Fließbereich zeigt, können die Fasermaterialien allesamt mit einem linear elastischen Verhalten bis zum Versagen beschrieben werden. Wichtig zu beachten ist jedoch, dass bei Glas- und Basaltfasern, vor allem in alkalischem Milieu, die Langzeitfestigkeit signifikant geringer ist als die Kurzzeitfestigkeit [25]. Typische Kurzzeitzugfestigkeiten und Elastizitätsmodule der verschiedenen Fasermaterialien sind in Tabelle 2.2 den Kennwerten von Bewehrungsstahl gegenübergestellt.

Tab. 2.2: Materialeigenschaften verschiedener Fasern, nach [5]

	Stahl	Glas	Basalt	Carbon
Zugfestigkeit in N/mm^2	550	1200	1500	3000
E-Modul in N/mm^2	210.000	73.000	88.000	230.000
Dichte in g/cm^3	7,85	2,7	2,6	1,8

Als weiteres potenzielles Material für FVKs würden sich Aramidfasern anbieten, da sie herausragende mechanische Eigenschaften aufweisen. Allerdings sind sie kostenintensiver in der Herstellung und neigen zur Wasseraufnahme. Dies kann dazu führen, dass das verstärkte Element bei sich ändernden Nass-/Trockenbedingungen anfällig für Längsrisse wird [26].

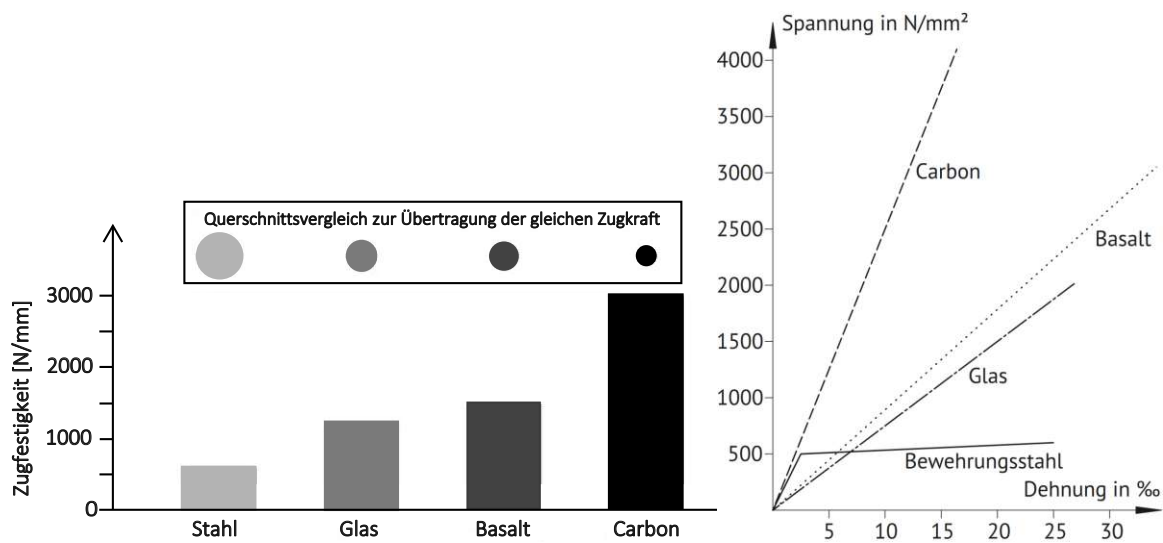


Abb. 2.6: Materialvergleich: FVK und Stahl, Zugfestigkeiten und Spannungsdehnungsbeziehung, entnommen aus [5].

2.3.2.1 Glasfasern

Glasfasern werden aus den gleichen Rohstoffen wie das klassische Flachglas hergestellt. Je nach gewünschtem Glasfasertyp können durch Zugabestoffe die Fasereigenschaften beeinflusst werden. Beispielsweise kann durch die Zugabe von Zirkonoxid (ZrO_2) die Alkalibeständigkeit verbessert werden. Solche alkaliresistenten Glasfasern (AR Glas) finden im alkalischen Milieu von Beton ihren Einsatz.[27]

Das Spannungs-Dehnungsverhalten ist wie bei den meisten Fasern nahezu linear elastisch bis zum Bruch. Die Zugfestigkeit von im Betonbau einsetzbaren Glasfasern liegt im Bereich von 1000–2500 N/mm^2 und ist damit etwa 2- bis 5-mal so hoch wie die Zugfestigkeit von herkömmlicher Stahlbewehrung. Der E-Modul unter Zugbeanspruchung liegt im Bereich von 70 000–80 000 N/mm^2 [5].

Im Gegensatz zu Stahlbewehrungen rosten Glasfasern nicht, es zeigt sich jedoch ein materialbedingter, degressiv verlaufender, langsamer Festigkeitsabfall über die Lebensdauer hinweg, der aber ebenfalls auf Korrosion zurückzuführen ist. Glasfasern zeigen eine hohe Beständigkeit gegenüber den meisten Chemikalien und weisen eine niedrige Wärmeleitfähigkeit auf. Sie sind nicht magnetisch und elektrisch nicht leitend, was eine Kontaktkorrosion bei einem hybriden Einsatz von Stahl- und Glasbewehrung ausschließt [28].

2.3.2.2 Basaltfasern

Das basische Vulkangestein Basalt, das häufigste magmatische Gestein der Erdkruste, dient als Ausgangsstoff für die Herstellung von Basaltfasern [29][30]. In Abbildung 2.7 ist ein natürliches Basaltvorkommen in Irland mit einem Säulendurchmesser von 30 bis 35 cm ersichtlich. Gut zu erkennen ist die fünf- bis siebenseitige Säulenstruktur, welche sich häufig senkrecht zu den oberen und unteren Abkühlungsflächen bildet [31].

Basaltfasern sind glasige Fasern (ähnlich den Glasfasern), die durch schnelle Abkühlung der Schmelze im Ziehprozess ohne Kristallisation erstarren. Sie werden aus Basaltgestein ohne chemische Additive hergestellt [27]. Zu Beginn des Herstellungsprozesses wird das Basaltgestein zerkleinert, bei 1300 bis 1700 °C aufgeschmolzen und in einem Schmelzspinnprozess, meist durch das Düsenziehverfahren zu feinen Endlosfasern verarbeitet [5].

Bei dem in Abbildung 2.7 dargestellten Düsenziehverfahren handelt es sich um einen kontinuierlichen Prozess. Je nach gewünschter Filamentanzahl werden hunderte oder tausende feinste Ziehdüsen mit Durchmessern von 1–2 mm eingesetzt. Die Schmelze fließt hierbei schwerkraftbedingt aus und wird über schnell drehende Spinnmaschinen abgezogen, unmittelbar danach abgekühlt und beschichtet. Nach der Beschichtung werden die Filamente gebündelt und als Rovinge aufgewickelt [5]. Der Faserdurchmesser variiert dabei abhängig von der Arbeitstemperatur der Düsen, der Bohrungsgröße im Düsenboden und der Geschwindigkeit bzw. Drehzahl des Spulprozesses [32].

Die Herstellung der Basaltfaser benötigt weniger Energie als die Herstellung von Glasfasern, da die spezifische Schmelzenergie von Basalt deutlich unter jener von Glas liegt. Zusätzlich weist Basalt im Vergleich zu ähnlichen Faserstoffen weitere ökologische und gesundheitliche Vorteile auf. Dies umfasst eine geringere Umweltbelastung während der Produktion und Entsorgung sowie ein reduziertes Gesundheitsrisiko während der Verarbeitung und Anwendung [32].

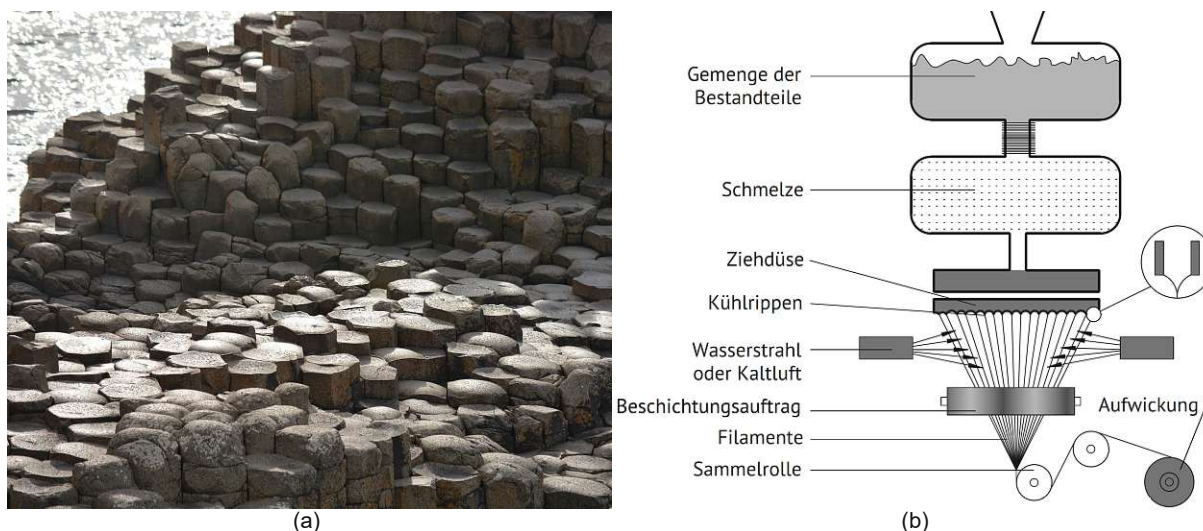


Abb. 2.7: a) Basaltgestein, Foto von Franz P. Sauerteig. und b) Schematischer Ablauf des Düsenziehverfahrens, in Anlehnung an [33].

Ähnlich wie bei Glasfasern liegt das spezifische Gewicht von Basaltfasern bei ca. $2,75 \text{ g/cm}^3$. Mit einem E-Modul unter Zugbeanspruchung von bis zu $110\,000 \text{ N/mm}^2$ und einer Zugfestigkeit bis zu 4840 N/mm^2 der Basaltfilamente liegen die mechanischen Kennwerte über jenen der Glasfaserfilamente [5]. Ebenfalls ähnlich zu Glasfasern zeigt sich eine Festigkeitsreduktion über die Lebensdauer, die Rate der Festigkeitsreduktion beträgt laut Sim et al. [25] hierbei aber nur ca. die Hälfte jener von Glasfasern. In dazu abweichenden Studien konnten aber auch andere Ergebnisse gezeigt werden, was auf Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung des Ausgangsgesteins zurückzuführen sein kann.

Der nichtmagnetische Charakter von Glasfasern und Basaltfasern ermöglicht ihre Anwendung für Betonkonstruktionen, in denen elektromagnetisch empfindliche Geräte untergebracht werden sollen, wie z.B. in Krankenhäuser in der Nähe von MRT-Räumen, oder bei Umspannstationen oder empfindlichen Forschungseinrichtungen [34].

2.3.2.3 Carbonfasern

Carbonfasern werden durch einen äußerst komplexen Prozess aus Kohlenstoff hergestellt. Die Carbonfasern für den Einsatz im Hochleistungssegment werden hauptsächlich aus Polyacrylnitril (PAN) durch kontrollierte Pyrolyse hergestellt und müssen mindestens einen Kohlenstoffgehalt von 90% aufweisen [23].

Im Verlauf des mehrstufigen Herstellungsprozesses spielt die verwendete Temperatur eine entscheidende Rolle. Je nach verwendetem Material und den Temperaturen während der Karbonisierung oder Graphitisierung kann entweder die Zugfestigkeit oder die Steifigkeit verbessert werden [35]. Für den Einsatz als Bewehrung in Betonbauteilen werden hauptsächlich HT-Fasern (High Tenacity, hohe Zähigkeit) verwendet, vor allem aufgrund ihrer niedrigen Kosten im Vergleich zu anderen Carbonfasertypen. Zusätzlich zeichnen sie sich durch hohe Bruchdehnungen aus, was eine ausreichende Verformungskapazität im Traglastzustand ermöglicht [20].

Die Dichte der HT-Fasern liegt zwischen $1,74$ und $1,80 \text{ g/cm}^3$, was etwa viermal geringer als bei herkömmlicher Stahlbewehrung ($7,85 \text{ g/cm}^3$) ist. Die Zugfestigkeit von 3000 bis 4000 N/mm^2 ist 5- bis 8-mal höher als bei Stahlbewehrung (500 – 550 N/mm^2). Der Zug-E-Modul liegt zwischen 200.000 und 250.000 N/mm^2 und ist vergleichbar mit Stahl, obwohl das Spannungs-Dehnungsverhalten sich stark vom Stahl unterscheidet und durch ein sprödes Materialverhalten mit einer Bruchdehnung im Bereich von $1,2$ – $1,6\%$ charakterisiert ist [5]. Wie von Micelli und Nanni [36] untersucht, zeichnen sich Carbonfasern im Gegensatz zu Glas- oder Basaltfasern durch eine hohe Haltbarkeit und Langzeitfestigkeit aus.

Die Wärmeleitfähigkeit von Carbonfasern ist sehr gering, sie weisen jedoch eine sehr hohe elektrische Leitfähigkeit auf. Insbesondere bei der Weiterverarbeitung in Kombination mit anderen Materialien ist demnach die Möglichkeit der Kontaktkorrosion zu beachten. Wie in Curbach et al. [5] beschrieben, kann diese Eigenschaft aber auch gezielt genutzt werden, beispielsweise um Informationen und Energie zu übertragen. Die Carbonbewehrung kann somit zur Datenübertragung, als Sensor, als Heizelement oder Stromkollektor eingesetzt werden [5].

2.3.2.4 Matrix

Wie von Belaunde Vargas [18] erläutert wird, lässt sich die Festigkeit von Garnen oder Rovings in den meisten Fällen nicht direkt von der Festigkeit der Einzelfilamente ableiten. Dies liegt an der ungleichmäßigen Belastung der einzelnen Filamente in einem Roving, was zu einer frühzeitigen Zerstörung einzelner Fasern führt. Imprägnierungen und Tränkungen können diesem Umstand entgegenwirken, die maximale Festigkeit der Einzelfilamente wird jedoch auch dadurch nicht erreicht.

Wie Curbach et al. [5] beschreiben, werden die Begriffe Tränkung, Imprägnierung und Beschichtung oft gleichbedeutend verwendet und beziehen sich darauf, dass die beschichteten Filamente der Filamentgarne mit einem weiteren Material, einer Matrix verbunden werden. Während Beschichtung traditionell das Aufbringen eines Stoffes auf eine Oberfläche bedeutet, das Ziel des Prozesses jedoch ist, dass die Matrix das Garn nicht nur äußerlich umschließt, sondern auch zwischen den Filamenten innerhalb des Garns angeordnet wird, verwendet man auch den Begriff der Imprägnierung. Dieser beschreibt einen Prozess, bei dem das gesamte Garn homogen mit dem Matrixmaterial durchdrungen wird. Aufgrund der häufigen Anwendung von Tränkungsprozessen wird auch dieser Begriff genutzt, der sowohl die Imprägnierung als auch die Beschichtung einschließt. Der Begriff Tränkung hat sich besonders in Bezug auf Faserverbundwerkstoffe etabliert und bezeichnet sowohl das Material als auch den Prozess selbst. Das Tränkungsmittel ist neben dem Fasermaterial ein entscheidender Bestandteil der Bewehrung und stellt den inneren und zu einem erheblichen Teil auch den äußeren Verbund sicher. Es ermöglicht einen inneren Verbund, indem es die Filamente fest miteinander verbindet. Dadurch kann der gesamte Querschnitt des Garns effektiv zur Lastabtragung genutzt werden. Dazu muss das Tränkungsmittel eine niedrige Viskosität aufweisen, um einen hohen Imprägnierungsgrad gewährleisten zu können.

Nicht nur die Qualität des inneren Verbundes, sondern auch die des äußeren Verbundes an der Kontaktfläche zwischen Bewehrung und Beton hängt maßgeblich von der Art und Verteilung des Tränkungsmittels ab [5]. Sie muss durch eine hohe Kohäsionsfestigkeit die Übertragung der Verbundkräfte sicherstellen, eine hohe Steifigkeit im ausgehärteten Zustand aufweisen und gleichzeitig möglichst langlebig und temperaturbeständig sein [21].

Gängige Materialien sind Duroplastpolymerharze, welche in ihrer ursprünglichen Form flüssig oder feste Stoffe mit niedrigem Schmelzpunkt sind. Sie werden durch einen Katalysator und Wärme oder einer Kombination aus beiden ausgehärtet. Im Gegensatz zu thermoplastischen Harzen können ausgehärtete feste Duroplastharze nicht in ihre ursprüngliche flüssige Form umgeformt werden. Die in der Verbundwerkstoffindustrie am häufigsten verwendeten duroplastischen Harze sind Epoxid-, Polyester- und Vinylesterharze. Zusätze und Füllstoffe können mit dem Harz gemischt werden, um Leistungsverbesserungen zu erzielen, die Eigenschaften der Verbundwerkstoffe anzupassen und die Kosten zu reduzieren [29].

2.3.3 Bewehrung aus nichtmetallischen Faserverbundkunststoffen

Wie in Barisic [37] ausgeführt wird, können Faserverbundkunststoffe (FVK) im Wesentlichen in drei Produktkategorien eingeteilt werden. Stäbe und Textilien finden, durch ihrer Ähnlichkeit zu bereits verwendeten Bewehrungsprodukten aus Stahl, vor allem im Neubau Verwendung. Lamellen werden gemäß Schlaich et al. [38] vorrangig zur Verstärkung der Zugzone oder zur Erhöhung des Schubwiderstands von Bauteilen aus Stahlbeton bei beispielsweise Nutzungsänderungen oder

zur Sanierung von Schäden eingesetzt.

Reichenbach et al. [21] befragten 20 Hersteller in Europa zu nichtmetallischen Bewehrungsprodukten für Neubauten und lieferten insbesondere folgende Erkenntnisse:

- Eindimensionale Bewehrungsstäbe werden hauptsächlich aus Glas in Kombination mit Epoxidharz oder Vinylesterharz produziert.
- Es gibt große Unterschiede in den Materialeigenschaften von verschiedenen Herstellern, selbst bei der Verwendung gleicher Fasern und Matrizen. Dieser Umstand lässt sich auf die nicht vorhandene Standardisierung des Herstellungsprozesses der Produkte zurückführen.
- Es besteht eine große Preisspanne, die stark von Fasertyp, Durchmesser, Faser-Volumen-Verhältnis, Oberflächenbeschaffenheit und Bestellmenge abhängt.
- Die Oberflächenbeschaffenheit der Produkte variiert stark.
- Zwei- und dreidimensionale Bewehrungen sind verfügbar.
- Ein Formen der Bewehrung ist möglich, allerdings mit einem gewissen Festigkeitsverlust verbunden.

Auf den nachfolgenden Seiten werden die wichtigsten Produkttypen von nichtmetallischer Bewehrung kurz erläutert.

2.3.3.1 Stäbe

Eindimensionale (1D) geformte faserverstärkte Kunststoff-Bewehrungen, wie zu sehen in Abbildung 2.9, zeichnen sich durch eine Hauptorientierung in Längsrichtung aus, vergleichbar mit herkömmlichen Stahlbewehrungsstäben. Im Gegensatz zu Stahl weisen FVK jedoch ein anisotropes Materialverhalten auf, was zu überlegenen mechanischen Eigenschaften in Längsrichtung führt, wobei die tatsächlichen Größen stark von den verwendeten Fasern, den Matrizen sowie dem Faservolumenverhältnis abhängt [39].

Die Herstellung von Stäben erfolgt in der Regel durch das Strangzieh- oder Pultrusionsverfahren, welches in Abbildung 2.8 dargestellt ist. In diesem Prozess werden Faserbündel zunächst in einem Harzbad getränkt. Anschließend werden die Rovings in ihre gewünschte Form gebracht und die Oberfläche kann gegebenenfalls profiliert werden. Nach dem Aushärten unter Wärmezufuhr werden die Stäbe schließlich in einer Abzugsvorrichtung auf die gewünschte Länge zugeschnitten.

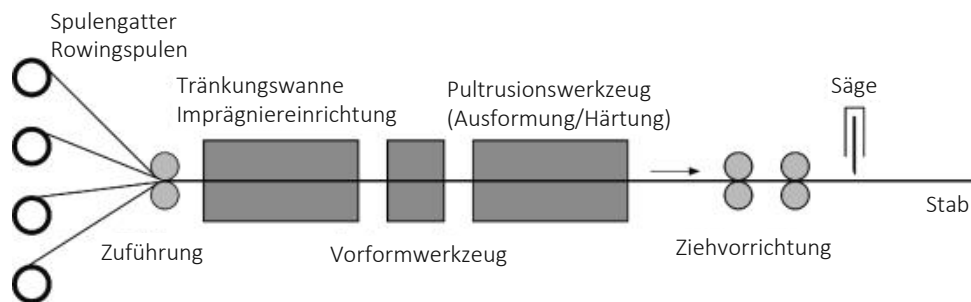


Abb. 2.8: Ablaufprozess im Pultrusionsverfahren, in Anlehnung an [5].

Um als Betonbewehrung eingesetzt werden zu können, müssen die Stäbe in der Lage sein, hohe Verbundkräfte über eine vergleichsweise kurze Verankerungslänge zu übertragen. Dies wäre mit einer glatten Staboberfläche nicht realisierbar [5]. Weitere gebräuchliche Oberflächenbehandlungstechniken, um den Verbund mit dem Beton zu verbessern, sind neben der Profilierung der Querschnitte bereits während der Pultrusion¹, das spiralförmige Umwickeln des Stabes mit einem Garn oder Faden oder auch eine Sandbeschichtung der Oberfläche mit feinem Quarzsand sowie das nachträgliche Aufbringen von Rippenstrukturen [40] [21].



Abb. 2.9: Bewehrungsstäbe aus FVK, entnommen aus [21].

2.3.3.2 Textilien

Zur Erzeugung zwei- oder dreidimensionaler Strukturen werden Einfachgarne oder Mehrfachgarne in diversen Verfahren, die von Verkreuzungen der Einzelgarne (Gewebe, Geflechte) bis zur Ausbildung von Fadenschlaufen (Gestricke, Gewirke) reichen, weiterverarbeitet. Der Herstellungsprozess von textilen Flächengebilden stellt hohe Anforderungen an die Ausgangsmaterialien. Diese sollen einerseits eine gute textile Verarbeitbarkeit aufweisen, und andererseits eine effiziente Imprägnierbarkeit gewährleisten. Zusätzlich müssen die entstehenden Flächengebilde für den Einsatz als Bewehrungsstrukturen in Beton eine offene Struktur aufweisen, um eine Durchdringung zu ermöglichen, und gleichzeitig eine hohe Verschiebesteifigkeit besitzen. Diese teils gegensätzlichen Anforderungen bieten Raum für verschiedene Herstellungsmethoden, von denen sich bisher vorrangig das nähgewirkte Gelege durchgesetzt hat [5][35].

In Abbildung 2.10 sind Textilerzeugnisse unterschiedlicher Hersteller ersichtlich. Die Produkte a, bis f wurden gestrickt, das Produkt g mit Kupplungen und das Produkt h gewebt hergestellt. Bei den meisten textilen Produkten wird zwischen Kettfäden, welche in Produktionsrichtung verlaufen und Schussfäden, welche quer dazu verlaufen unterschieden.

In Abbildung 2.11 ist schematisch der Herstellungsprozess des Kettenwirkens dargestellt. Aufgrund von baulichen Anforderungen und der Marktnachfrage werden in der Regel Matten mit

¹während der Pultrusion ist eine Profilierung jedoch nur radial möglich

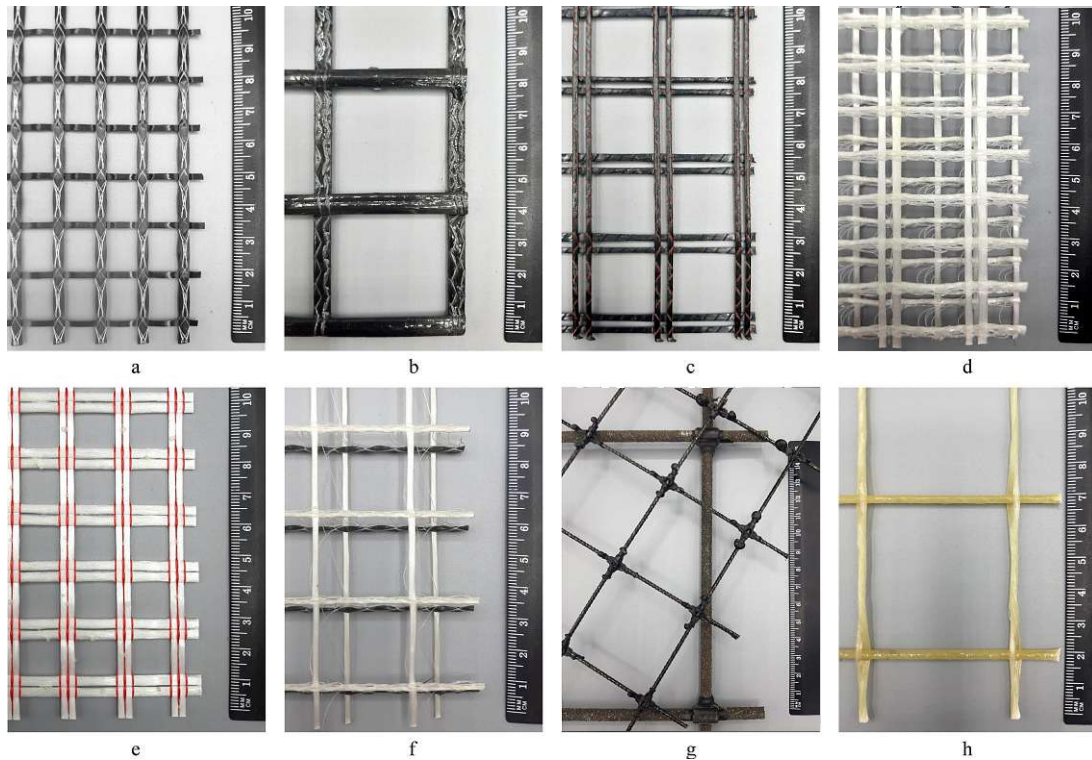


Abb. 2.10: Beispiele für Textilien, in Anlehnung an [21].

Garnen in den Richtungen 0° und 90° hergestellt. Es besteht jedoch grundsätzlich auch die Möglichkeit, Matten mit mehr als nur zwei Fadenlagen und in anderen Lagenwinkeln als 0° und 90° zu produzieren. Mithilfe von Multiaxialkettenwirkmaschinen können beispielsweise bis zu sieben Fadenlagen, bestehend aus parallel abgelegten Garnen in nahezu beliebigen Richtungen, erzeugt und miteinander verbunden werden. Dadurch können auch zwei- drei- oder vierlagige Matten mit 0° -, $\pm 45^\circ$ - und 90° -Richtungen entstehen. Durch die Ausrichtung der Fadenlagen entsprechend den Wirkungsrichtungen der im Bauteil zu erwartenden Kräfte kann die Herstellung von belastungsgerechten Textilbewehrungen erfolgen [5].

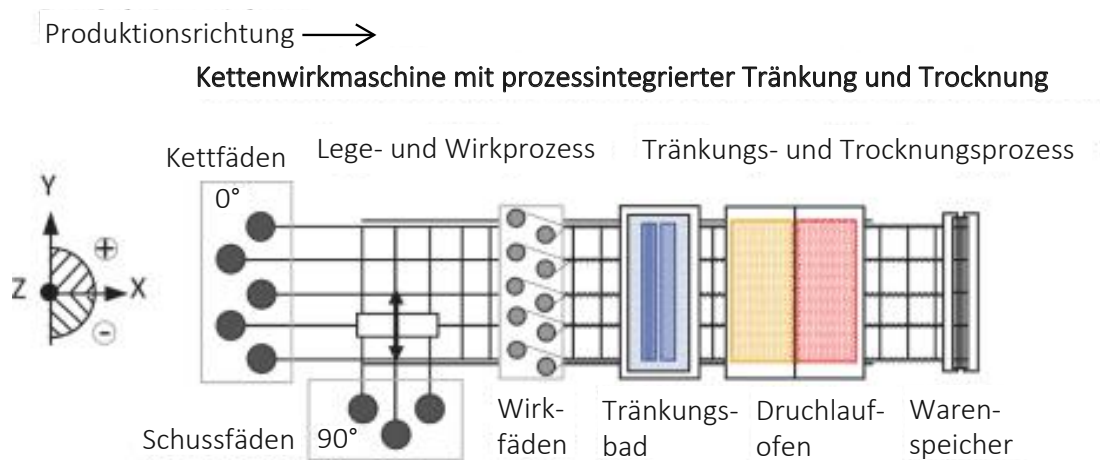


Abb. 2.11: Fertigung von Bewehrungsmatten, in Anlehnung an [5].

Die Imprägnierung der Textilien erfolgt in der Regel in einem separaten Arbeitsschritt nach der Produktion. Im Gegensatz zu FVK-Stäben ist eine Aufbringung der Matrizen durch Pultrusion aufgrund der quer verlaufenden Stränge nicht möglich. Daher erfolgt der Auftrag hauptsächlich durch das Durchführen der Textilien durch einen Beschichtungstank, wobei die Matrix durch Druckenwendung über Walzen in die Rovings gedrückt wird [41].

Im Unterschied zu FVK-Stäben weisen Textilbewehrungen bereits aufgrund des Herstellungsprozesses eine gewisse Rauheit und makroskopische Änderung der Querschnittsabmessungen auf. Dies resultiert bei gewirkten Gelegen aus der Kompression der Faserstränge am Schnittpunkt des Längs- und Querstrangs, wo sie durch einen Strickfaden miteinander verbunden werden. Die entscheidenden Bindungsmechanismen variieren je nach verwendetem Imprägniermaterial und der Größe der sich regelmäßig wiederholenden Variation der Querschnittsdimensionen. Adhäsion und Reibung spielen eine Rolle, insbesondere bei einem weichen Imprägniermaterial und geringer Variation der Querschnittsdimensionen. Einige Hersteller bieten zur weiteren Verbesserung der Verbundeigenschaften ihrer Textilprodukte eine zusätzliche Sandbeschichtung an [42] [21].

2.3.3.3 Feinkornbeton

Der erweiterte Gestaltungsspielraum von Textilbeton, bedingt durch die nicht rostende Bewehrung und die daraus resultierende Reduktion der Betondeckung, stellt zusätzliche Anforderungen an die Betonmatrix. Um eine gute Durchdringung des meist engmaschigen Bewehrungsnetzes zu gewährleisten, wird in den meisten bisher veröffentlichten Rezepturen ein Größtkorn von max. 4 mm verwendet. Im Vergleich dazu beträgt die übliche Größtkorngröße im Stahlbetonbau 32 mm bzw. bei dichter Bewehrungsführung 16 oder 8 mm. Für Textilbetonrezepturen wäre aufgrund des geringen Größtkorn lt. Neitzel und Mitschang [43] eine Bezeichnung als Mörtel denkbar. Diese Bezeichnung kann dem Potential und dem Anwendungsbereich des Baustoffes aber nicht gerecht werden. Nach Curbach und Jesse [20] hat sich demnach die Bezeichnung Feinbeton durchgesetzt. Ausgehend von der stofflichen Zusammensetzung und den Festigkeiten, welche in der Regel für Fertigteile- und Ortbetone C50/60 betragen, sind die Feinbetone den Hochleistungsbetonen zuzuordnen [9] [44].

In Tabelle 2.3 sind zwei Betonrezepturen angeführt, welche von Schneider et al. [45] speziell für Carbonbeton im Zuge eines Optimierungsprozesses innerhalb des Projektes C³[46] entwickelt wurden. Die erste Betonrezeptur, NF-1-150-8, zählt zu den hochfesten Betonen mit einer erreichten Festigkeit von 85,0 MPa. Der Bindemittelgehalt beträgt 353 kg, bei einem Wassergehalt von 150 kg, was zu einem W/B-Wert von 0,425 führt. Ein Kompositzement, bestehend aus Portlandzementklinker, Flugasche und Kalksteinmehl, wurde als Bindemittel verwendet, wobei der Leimgehalt durch zusätzliches Kalksteinmehl gesteuert wurde. Quarzsand im geringen Korngrößenbereich wurde entsprechend den Anforderungen an die optimale Korngrößenverteilung hinzugefügt. Der hohe Bindemittelanteil und der gleichzeitig niedrige Wassergehalt führen zwangsläufig zu einer eingeschränkten Verarbeitbarkeit des Betons. Der Frischbeton weist eine sehr hohe Viskosität auf, die jedoch durch Zugabe von Hochleistungsfließmitteln aus Polycarboxylatether reduziert werden kann. In Abbildung 2.12 ist der Einbau von frischem Textilbeton dargestellt[35]. Im Vergleich dazu enthält der Beton HF-2-145-5 neben dem Kompositzement zusätzliche reaktive Mikrofüller in Form von hüttensandhaltigen Mikrozementen. Der Bindemittel-Wasser-Wert (W/B) konnte aufgrund des geringen Wasseranspruchs des Bindemittels auf 0,23 reduziert werden. Diese Betonmischung zeigte selbstverdichtende Eigenschaften und erreichte nach dem Aushärten eine Festigkeit von 136,7 MPa. Beide Betone aus Schneider et al. [45] weisen zudem im Vergleich zu Normalbetonen eine verbesserte Ökobilanz auf, die durch den niedrigen Klinkeranteil und die

Nutzung großteils lokaler Ressourcen bedingt ist [35].

Tab. 2.3: Textilbetonrezepturen und zugehörige Druckfestigkeit nach 28 Tagen¹

Bestandteile	NF-1-150-8	HF-2-145-5
CEM II/C-M (S-LL) 42,5 R	353	-
BMK-D5-1	-	621
Easyflow IIa	172	-
BCS 413	175	250
Sand 0/2	625	530
Kies 2/8	900	-
Split 2/5	-	837
Wasser	150	145
Fließmittel	8	16
Betondruckfestigkeit 28d [MPa]	85,0	136,7

BMK-D5-1: hochfestes Bindemittelkonzept Deuna 5-1
 Easyflow IIa: Kalksteinmehl BCS 413: Quarzsand

¹zusammengefasst nach Schneider et al. [45] in Anlehnung an [35]



Abb. 2.12: Einbau von frischem Textilbeton, entnommen aus [45] und [44].

Insbesondere bei Konstruktionen mit nichtmetallischer Bewehrung stellt die Anwendung von Salzwasser als Mischwasser für Beton, eine vielversprechende Alternative dar, um den globalen Frischwasserverbrauch in der Bauindustrie zu reduzieren. Mit einem breiten Interesse an dieser Thematik hat die Forschung in den letzten Jahren sowohl grundlegende als auch angewandte Erkenntnisse hervorgebracht. Die Auswirkungen von Salzwasser auf Hydratationsprozesse, die Betonmikrostruktur und die Wechselwirkung mit zementären Zusatzstoffen sind gut erforscht. Die Arbeit von Ahmed et al. [47] bietet einen umfassenden Überblick über den aktuellen Kenntnisstand über die Wechselwirkung zwischen Bewehrung und Salzwasserbeton und führt aus, dass die Haltbarkeit vor allem durch die Art des FVK-Produktes und der Oberflächenbehandlung beeinflusst wird. Dennoch besteht noch Forschungsbedarf, insbesondere im Hinblick auf die Langzeitbeständigkeit von Salzwasserbeton. Zudem bleiben trotz des bereits erreichten Erkenntnisstandes die fehlenden Normen und Spezifikationen eine Herausforderung für die breite Anwendung dieser innovativen Betonvariante. In Anbetracht des weltweit enormen Frischwasserverbrauchs in der Bauindustrie kann Salzwasserbeton insbesondere in Regionen mit Wasserknappheit, abgelegenen Inselgebieten sowie nach Naturkatastrophen mit gleichzeitigem Bedarf an Wiederaufbau und Frischwasserknappheit als vielversprechende Lösung betrachtet werden [47] [48].

2.3.3.4 Materialeigenschaften der Bewehrungsprodukte

In Abbildung 2.13 sind verschiedene Bewehrungsprodukte nach unterschiedlicher Stabgröße (1D Produkte) bzw. Garnfeinheit (2D Produkte) sowie nach dem verwendeten Matrixmaterial kategorisiert und die Zugfestigkeit sowie der E-Modul der Produkte aufgetragen. Es zeigt sich, dass FVK-Stäbe und Textilien aus Carbon im Vergleich zu Produkten aus Basalt und Glas eine höhere Zugfestigkeit und einen höheren Elastizitätsmodul aufweisen. Die Zugfestigkeit variiert mit dem Durchmesser der Stäbe, während sich der Elastizitätsmodul nicht wesentlich ändert. Wie bereits in Abbildung 2.6 gezeigt, kann die Spannungs-Dehnungs-Beziehung von FVK als linear elastisch bis zum Versagen beschrieben werden, während sich normaler Bewehrungsstahl durch ein duktileres Versagen auszeichnet.

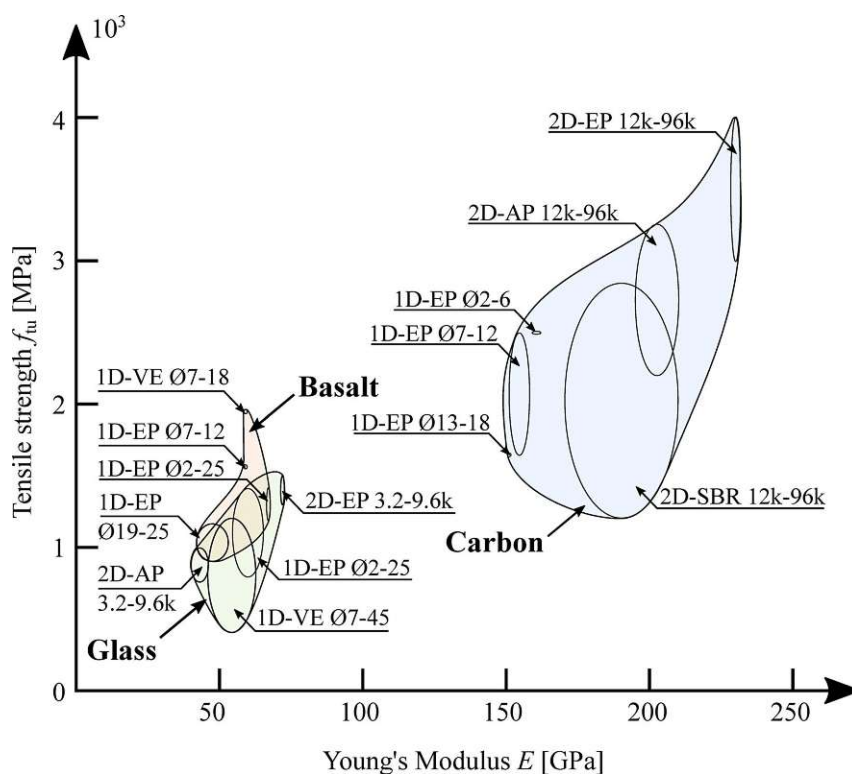


Abb. 2.13: Mechanische Eigenschaften von verschiedenen FVK-Produkten, entnommen aus [21].

Im Vergleich zu normalem Bewehrungs- oder Spannstahl, ist FKV-Bewehrung mit einer bis zu 80 % geringeren Dichte deutlich leichter. Die meisten der vorgestellten FKV-Produkte weisen im Vergleich zu Bewehrungsstahl eine höhere Zugfestigkeit (kurzzeitig) auf. Die Langzeiteigenschaften stellen jedoch eine große Herausforderung bei der Konstruktion und dem Design mit FVK-Produkten dar. Die Abminderung der Zugfestigkeit zur Folge Korrosion hängt von vielen Faktoren ab, wie z.B. dem Fasertyp und den Matrixeigenschaften. In der Arbeit von Reichenbach et al. [21] gaben Hersteller für ihre Produkte eine Langzeitzugfestigkeit unter Umweltbedingungen zwischen 60 % (GFK) und 90 % (CFK) der Kurzzeitfestigkeit an. Darüber hinaus muss laut Benmokrane et al. [49] das Spannungsniveau unter Dauerlast berücksichtigt werden, um einen Kriechbruch zu verhindern. In aktuellen Normen und Vorschriften werden Belastungsgrenzen für Dauerbeanspruchung angegeben, welche zwischen dem 0,2-fachen (GFK) und dem 0,9-fachen (CFK) der Langzeitfestigkeit liegen. Die in diesem Zusammenhang ermittelte Festigkeitsreduktion basiert hauptsächlich auf Ergebnissen beschleunigter Labortests, die nicht immer die realen

Bedingungen in einer Betonkonstruktion widerspiegeln. An Untersuchungen, durchgeführt von Al-Khafaji et al. [50] von zwei GFK-verstärkten Brückenbauwerken, elf und fünfzehn Jahre nach deren Errichtung, zeigte sich trotz einem mittleren bis hohen pH-Wert von 11 bis 13 im Beton keine nennenswerte Degradation der GFK-Stäbe durch Korrosion.

In Tabelle 2.4 sind die Materialkennwerte von verschiedenen FVK-Produkten gegenübergestellt. Die Daten basieren auf Datenblättern und Herstellerangaben, welche von Grasl [51] ausgewertet wurden. Durch Berücksichtigung des Faktors k_3 , welcher nach EN 1992-1-1 [52] die Bemessungszugfestigkeit von nichtmetallischen Bewehrungen reduziert und des Teilsicherheitsbeiwertes γ_m auf Widerstandsseite, ergibt sich die Bemessungszugfestigkeit f_{ftd} der Produkte. Im direkten Vergleich zwischen den charakteristischen Werten der Bewehrungsprodukte aus Abbildung 2.13 mit jenen der Bemessungszugfestigkeiten aus Tabelle 2.4 werden die hohen Festigkeitsreduktionen deutlich.

Tab. 2.4: Materialkennwerte von verschiedenen FVK-Produkten, erstellt von Grasl [51]

Eigenschaft	Einheit	CFRP Stab	CFRP Textil	GFRP Stab	BFRP Stab	Stahl Stab
E_r	N/mm ²	162 000	230 000	59 500	59 000	200 000
f_{ftk}	N/mm ²	2100	3000	1100	1100	550
α_{nmt}	-	0,820	0,820	0,527	0,527	1,00
k_3	-	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
γ_M	-	1,30	1,30	1,30	1,30	1,15
f_{ftd}	N/mm ²	1324,6	1892,3	446,2	446,2	478,3
ρ	kg/m ³	1500	1770	2130	2100	7850

Laut Reichenbach et al. [21] könnte aber insbesondere im Hinblick auf textile Bewehrungen mit verschiedenen Faservolumenverhältnissen, bei denen unterschiedliche Haltbarkeiten erwartet werden, durch umfangreichere Studien die Zuverlässigkeit der vorhandenen Langzeithaltbarkeitsdaten verbessert und somit übermäßig konservative Sicherheitsfaktoren vermieden werden. Dadurch könnte die wirtschaftliche und ökologische Attraktivität von FVK-Produkten gesteigert werden [21].

2.4 Anwendungsbeispiele

2.4.1 Erhaltung und Ertüchtigung von bestehenden Bauwerken

Im Bauwesen haben sich faserverstärkte Kunststoffe, und hier insbesondere FVK aus Carbonfasern als äußerst erfolgreiche Verstärkungslösung etabliert. Ihr Einsatz ermöglicht die Verstärkung bestehender Konstruktionen in statisch sensiblen Bereichen, wobei eine maximale Tragfähigkeit bei gleichzeitig minimalem Zusatz an Bausubstanz und Gewicht erreicht wird. Neben der bewährten Technologie der aufgeklebten oder eingeschlitzten Carbonlamellen haben sich auch dünn aufgetragene Betonschichten mit hochfesten, flächigen Textilbewehrungen als effektive Lösung für die nachträgliche Verstärkung von bestehenden Stahlbetonkonstruktionen als zuverlässig herausgestellt. In Abbildung 2.14 sind gängige Sanierungsmaßnahmen mit Textilbeton und Carbonlamellen dargestellt [23].

Textilbeton bietet gegenüber anderen Verstärkungsmaßnahmen, wie stahlbewehrtem Spritzbeton, verarbeitungstechnologische Vorteile. Insbesondere auf nicht ebenen, gekrümmten Bauteiloberflä-

chen lässt sich Textilbeton mit lastorientierter Bewehrung leicht anwenden. Daher hat dieser Werkstoff bereits erfolgreich in der Erhaltung und Ertüchtigung verschiedener denkmalgeschützter Schalen- und Kuppelkonstruktionen Verwendung gefunden [53] [54]. Vor allem zur Verstärkung von komplizierten Strukturen bietet sich der Einsatz von Textilien an, da diese vor Ort geformt, und so an die geometrischen Rahmenbedingungen angepasst werden können. Beispielsweise sei an dieser Stelle auf die Sanierung eines Zuckersilos nach einem aufgetretenen Brandschaden [55] oder die Sanierung einer historischen Bogenbrücke [56] verwiesen. Die Instandsetzung unter Verwendung von FVK-Produkten bietet in einigen Fällen die einzige bautechnische und wirtschaftliche Alternative zum Abriss oder Rückbau, und kann so bestehende Bausubstanz bewahren. Durch eine dünn aufgetragene Schicht aus Carbonbeton kann in vielen Fällen sogar die Tragfähigkeit erheblich gesteigert werden und das Erscheinungsbild sowie die geometrischen Abmessungen wie z.B. das Lichtraumprofil erhalten bleiben[5].

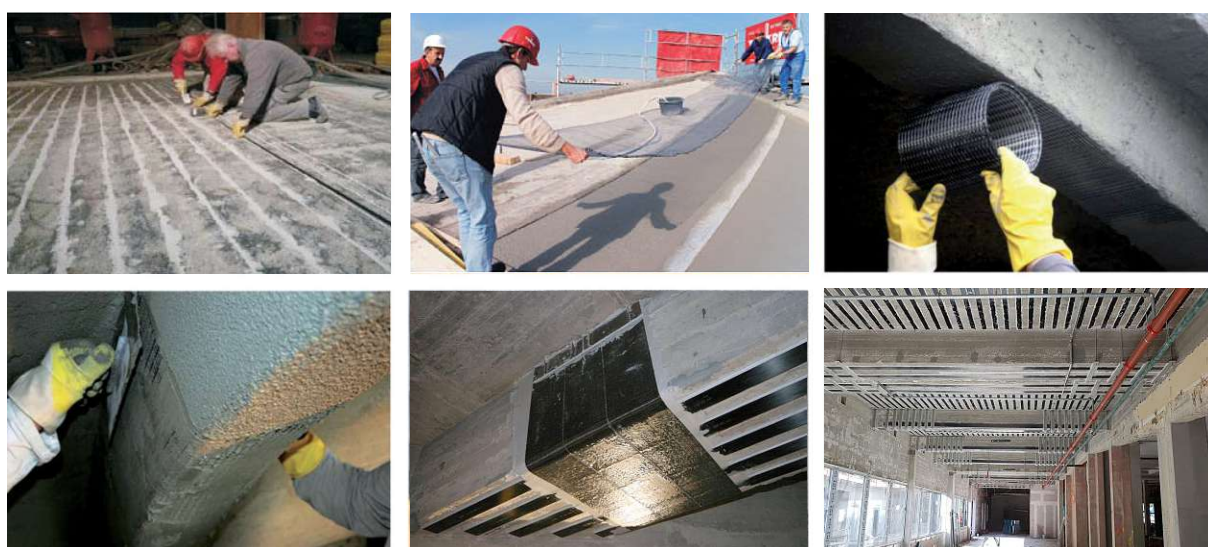


Abb. 2.14: Ertüchtigungsmaßnahmen von Bestandstragwerken, in Anlehnung an [53, 57, 58].

Wie von Reichenbach et al. [21] beschrieben, ist jedoch zu beachten, dass textilverstärkte Konstruktionen unter möglichen Brandbeanspruchungen nur sehr begrenzt einsetzbar sind. FRP-Verstärkungsprodukte weisen aufgrund der niedrigen Glasübergangstemperatur der Polymermatrizen tendenziell eine geringe Feuerbeständigkeit auf. Die Anwendung größerer Betonüberdeckungen zur Erhöhung des Feuerwiderstands von FVK-verstärkten Konstruktionen würde der materialeffizienten Designphilosophie widersprechen und ist somit nicht erstrebenswert [21].

2.4.2 Hochbau

Im Hochbau werden Betonbauteile wie Decken oder Unterzüge vorwiegend schlaff bewehrt ausgeführt. Bei der Verwendung von FVK-Bewehrung in solchen Bauteilen können die hohen Zugfestigkeiten des FVK-Produkts oft nicht optimal genutzt werden, ohne erhebliche Krümmungen zu verursachen. Zusätzlich weisen Textilbetonbauteile im Vergleich zu konventionellen Betonelementen aufgrund schlanker Querschnitte in der Regel eine geringere Biegesteifigkeit auf, was zu noch größeren Krümmungen und Durchbiegungen führen kann. Wie Osman-Letelier et al. [16] ausführen, stellt das Aufbringen einer Vorspannung eine mögliche Lösung dar, diesen Verformungen entgegenzuwirken. Besonders durch den Einsatz von aufgelösten Tragstrukturen

können leichte, materialeffiziente Bauteile konstruiert werden, welche die Materialeigenschaften des Verbundbaustoffes optimal nützen. In Abbildung 2.15 (a) sind vorgespannte dünnwandige Trapezplatten aus Textilbeton dargestellt, welche als Garagendachkonstruktion Verwendung finden [16].

Besonders die Verwendung von aufgelösten Formen, wie die dargestellten Trapezplatten, bietet ein großes Potential hinsichtlich ressourceneffizienter Materialverwendung bereits im Tragwerksentwurf. Ähnliche Beispiele hierfür sind die in der Arbeit von Kromoser et al. [59] untersuchten Deckenelemente und T-Träger, welche durch die Verwendung von FVK-Bewehrung und UHPC mit einer sehr effizienten Bauteilgeometrie realisiert werden können und eine signifikante Gewichtsreduktion im Vergleich zu ähnlichen konventionell hergestellten Bauteilen ermöglichen. In Abbildung 2.15 (b) ist das untersuchte Deckenelement dargestellt.

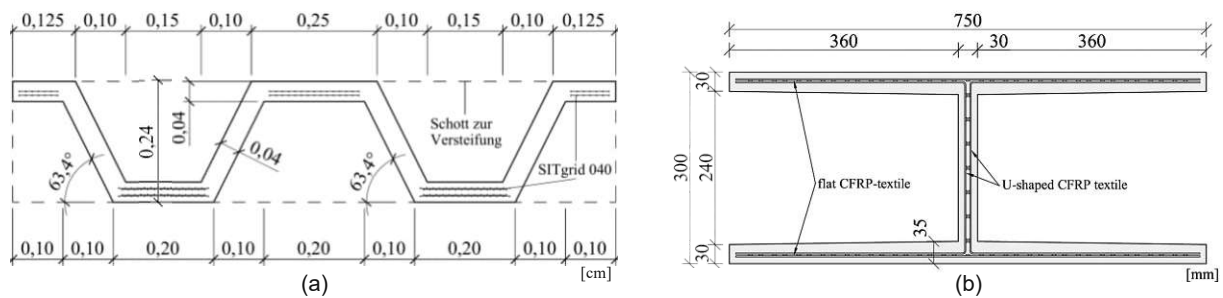


Abb. 2.15: (a) Vorgespannte Trapezplatten aus Textilbeton, entnommen aus [16] und (b) aufgelöstes Deckenelement, entnommen aus [59].

Durch den vergleichsweise neuen Werkstoff Textilbeton erleben Betonfassaden derzeit eine Renaissance. Im Gegensatz zu Stahlbeton können so leichte, dünnwandige und dauerhafte Bauteile mit gleichzeitig architektonisch anspruchsvollen Oberflächen hergestellt werden. Die breite Produktpalette an leistungsstarken FVK-Produkten für die Verwendung als nichtmetallisches Bewehrungsmaterial eröffnet vielfältige Möglichkeiten. In Abbildung 2.16 ist eine vorgehängte hinterlüftete Fassade aus Carbonbeton dargestellt. Neben Elementen mit einem vollflächigen Querschnitt sind auch Fassadenelemente mit filigranen Aussparungen und einem fein verteilten Lochbild aus architektonischen Gründen zu finden. Zusätzlich ist ein weiteres Beispiel für die Gestaltungsmöglichkeiten moderner FVK-bewehrter Fassadenplatten ersichtlich [60].

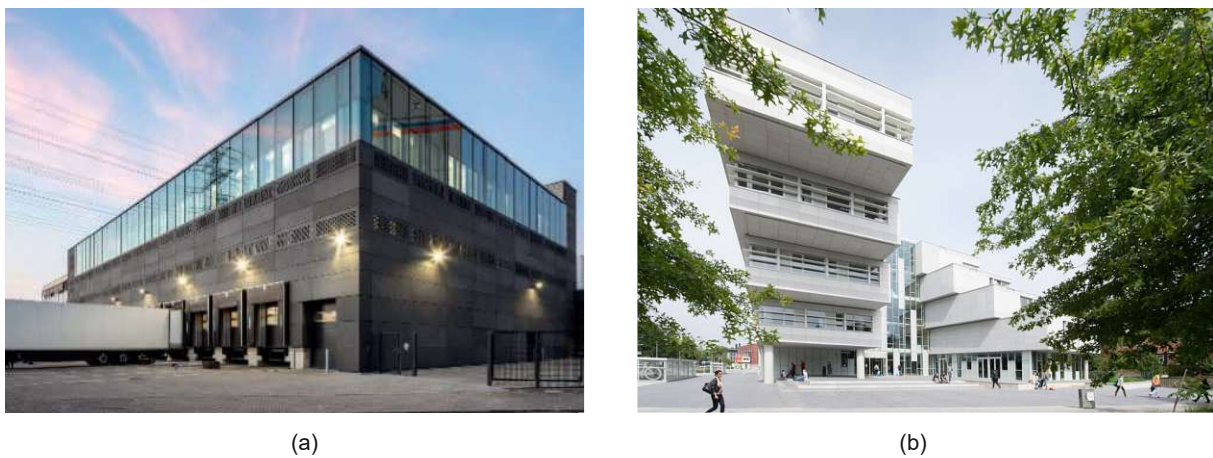


Abb. 2.16: (a) Fassadenplatten mit Lochbild, entnommen aus [60] und (b) Fassadenplatten Gestaltungsmöglichkeiten betoShell®, Foto: Ben Vulkers [61].

2.4.3 Brückenbau

Die weltweit erste Textilbetonbrücke wurde 2006 in Oschatz (DE) der Öffentlichkeit übergeben und zeigt eindrucksvoll die Gestaltungsmöglichkeiten und Gewichtsvorteile der Textilbetonbauweise. Die Brückenkonstruktion für Fußgänger und Radfahrer überspannt eine Stützweite von 8,60 m bei einem bemerkenswert niedrigen Bauwerksgewicht von nur sechs Tonnen. Die organisch geformten U-Schalen des Überbaus werden in der Segmentbauweise ausgeführt und sind durch Monolitzen zentrisch vorgespannt. Aufgrund der geringen Betondeckung bei Textilbeton genügte eine Bauteildicke von nur 30 mm. Besondere Sorgfalt wurde auf die Querschnittsmodellierung gelegt, um Spannungskonzentrationen zu reduzieren, was durch Anvoutungen, verstärkte Segmentränder und abgerundete Elementkanten erreicht wurde. Die vertikalen Querschnittsbereiche bilden die mittragenden Obergurte und seitlichen Geländer, während der Schalenboden unterseitig mit Rippen verstärkt ist. In Abbildung 2.17 ist die linke Hälfte der symmetrischen Brückenkonstruktion mit zugehöriger textiler Bewehrung dargestellt [53].

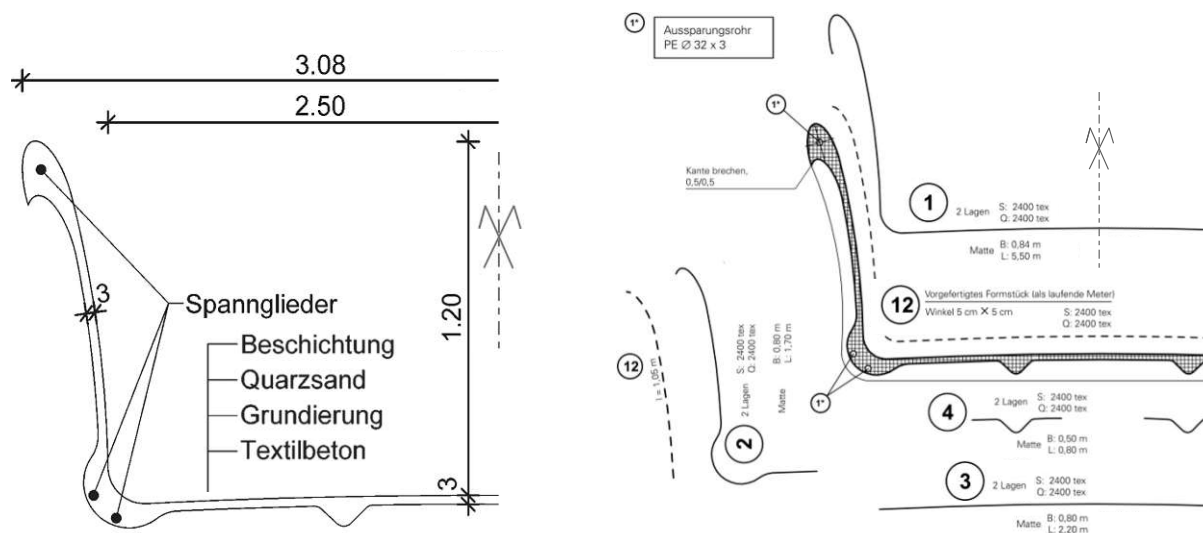


Abb. 2.17: Textilbetonbrücke in Oschatz, nach [53] und [62].

Die weltweit längste Brücke aus Textilbeton mit einer Gesamtlänge von 97 m überführt in Albstadt-Lautlingen in einer gebogenen Gradienten einer Fuß- und Radweg über eine Straße. Die Brücke besteht aus sechs Feldern, die aus Fertigteilelementen mit konstantem Radius hergestellt wurden. Der Überbauquerschnitt ist ein in Längsrichtung vorgespannter 7-stegiger Plattenbalken. Zur Minimierung von Rissbreiten und zur Aufnahme oberflächennaher Zugkräfte wurde eine flächige, textile AR-Glas-Bewehrung in den Stegen und der Fahrbahnplatte installiert. Dank dieser textilen Bewehrung konnte eine minimale Betondeckung von nur 1,5 cm erreicht werden, wodurch die Stege mit einer Breite von lediglich 12 cm ausgeführt wurden. Die Bauhöhe beträgt 430 mm, und die maximale Stützweite beläuft sich auf 15,05 m, was die elegante Brückenkonstruktion mit einem h/L -Verhältnis von ~ 35 besonders schlank erscheinen lässt. Vor der Brückenmontage wurden die sechs Einfeldträger in Längsrichtung mit Monolitzen ohne Verbund vorgespannt. Nach der endgültigen Positionierung wurden sie durch Stabanker miteinander verbunden, um Normalkräfte in Brückenlängsrichtung übertragen zu können. In Abbildung 2.18 sind Ansichten und der Querschnitt des Überbaus der Brücke dargestellt [63].

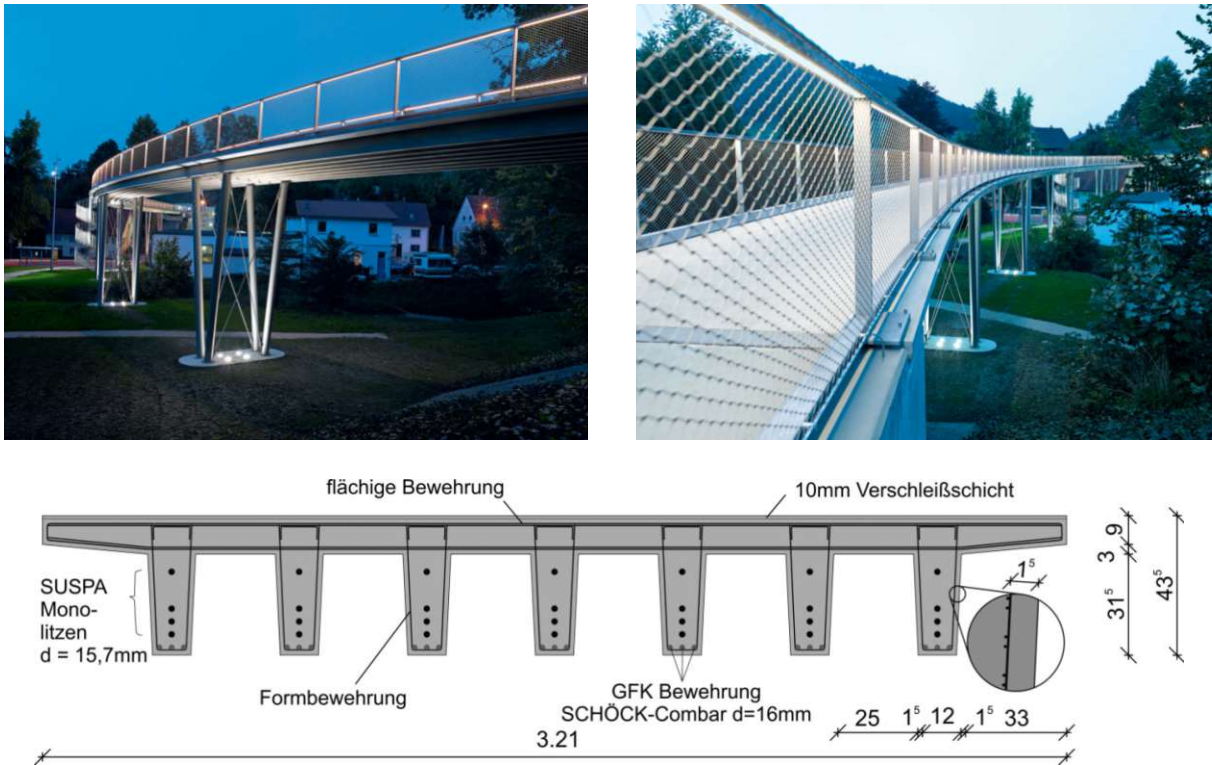


Abb. 2.18: Ansicht und Querschnitt der Textilbeton-Fußgängerbrücke in Albstadt-Lautlingen, entnommen aus [63].

Wie in der Arbeit von Helbig et al. [64] erläutert wird, erfordert ein materialgerechter Einsatz von Textilbeton im Brückenbau die Entwicklung einer eigenständigen Konstruktionsform, um die spezifischen Eigenschaften des neuen Verbundwerkstoffs effizient einsetzen zu können. Am Beispiel einer Fußgängerbrücke in Albstadt-Ebingen wurden grundlegend verschiedene Entwurfsansätze miteinander verglichen. Das Ziel war es, ein Design zu entwickeln, welches das Verbundmaterial Textilbeton bei maximaler Gewichtsreduktion effektiv nutzt und gleichzeitig eine äußerst langlebige und wartungsarme Konstruktion ermöglicht. Dabei basieren alle Varianten, welche in Abbildung 2.19 visualisiert sind, auf flächenhaft ausgebildeten Tragwerkelementen. Während sich bei den Fachwerk- (a) und Vierendeelträger-Varianten (e und f) eine offene Ansicht realisieren lässt, können die Trogrägervarianten (c und d) besser auf variierende Spannweiten angepasst werden. Die offenen Trägerformen als auch die Faltwerkoption (b) bedingen einen sehr hohen Schalungsaufwand und eine teilweise komplexe Bewehrungsführung der kleinformigen Trägerelemente. Die schließlich gewählte Trogrückenvariante (c) nutzt eine einfache Extrusion eines U-förmigen Querschnitts mit gleichbleibender Bauteildicke. Diese Konstruktionsform ermöglicht nicht nur eine ökonomische Herstellung, sondern verringert auch den Inspektionsaufwand und fördert die Dauerhaftigkeit. Der gesamte Brückenüberbau ist gut einsehbar, wodurch Risse leicht erkennbar sind. Zudem konnte auf vorgespannte Stahl-Monolitzen verzichtet und die benötigte Betonmenge erheblich reduziert werden [64].

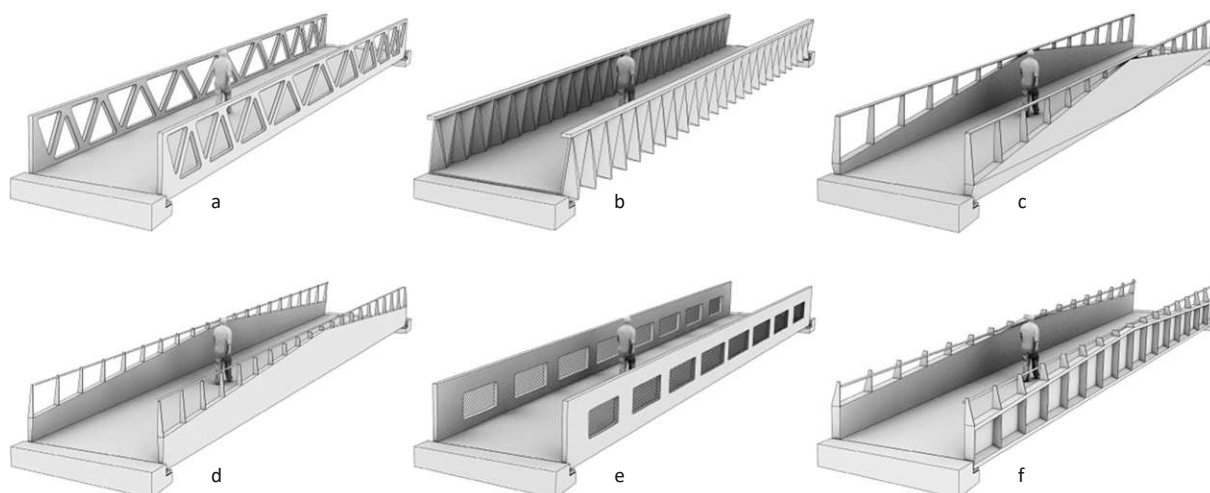


Abb. 2.19: Variantenuntersuchung der Fußgängerbrücke in Albstadt-Ebingen, entnommen aus [64].

2.4.4 Schalenkonstruktion

Im Rahmen eines Forschungsprojekts an der RWTH Aachen wurde eine doppelt gekrümmte Tragstruktur aus textilbewehrtem Beton realisiert. Die Struktur besteht aus vier großformatigen Betonschalen, welche einen Pavillon bilden und die Formgebungsmöglichkeiten von Textilbeton aufzeigen. Die Betonschalen haben Abmessungen von $7\text{ m} \times 7\text{ m}$ und eine Dicke von 6 cm , wobei eine hochfeste textile Bewehrung aus Carbon eingesetzt wurde. Die Schalen ruhen auf Fertigteilstützen aus Stahlbeton und sind in Abbildung 2.20 ersichtlich. Die geforderte Präzision beim Einbau der Bewehrung wurde durch ein Fertigteilkonzept und Stahleinbauteile sichergestellt. Nach der erfolgreichen Montage der Schalen dienen diese nun als Seminar- und Veranstaltungsraum und zeigen mit ihrer sichtbaren Dünnwandigkeit und Sichtbetoneigenschaften die Charakteristika von Textilbeton auf [65].

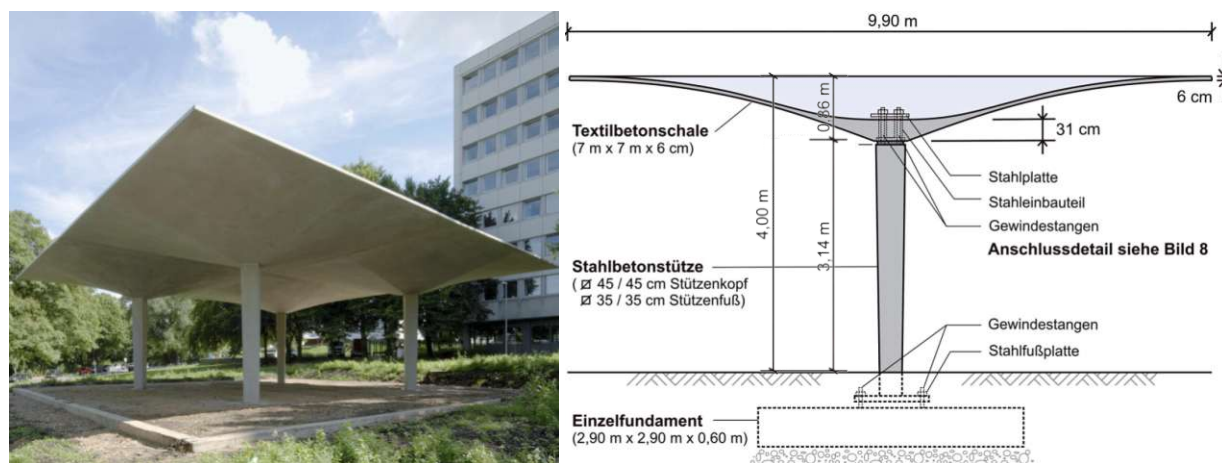


Abb. 2.20: Schalenkonstruktion aus Textilbeton, nach [66] und [65].

In Curbach und Jesse [20] wird erwartet, dass in naher Zukunft weitere gestalterisch anspruchsvolle Lösungen aus Textilbeton in Erscheinung treten, da die richtige und vor allem materialgerechte Formsprache für Textilbeton immer mehr in der Praxis ankommt. Durch bereits umgesetzte

Bauwerke werden Planer und Architekten weiter inspiriert, neue Anwendungen aus Textilbeton in der Praxis zu realisieren.

2.4.5 Spezialanwendungen

Abseits der zuvor erwähnten Anwendungsbeispielen bezüglich aufgelöster Geometrien werden FVK-Produkte noch in zahlreichen weiteren Nutzungsbereichen eingesetzt. Bei Tunnelbauprojekten wird häufig die Soft-Eye-Bauweise angewendet, die sich auf Bohrpfähle oder Schlitzwände bezieht, welche von einer Tunnelbohrmaschine (TBM) durchdrungen werden sollen. Im Vergleich zu herkömmlichen Methoden, bei denen Wände und Pfähle manuell aufgebrochen und die Stahlbewehrung entfernt wird, bietet die Soft-Eye-Methode einen effizienteren Ansatz. Sie zeichnet sich durch den Austausch der Stahlbewehrungsstäbe im betroffenen Bauteilabschnitt durch FVK-Stäbe mit hoher Zugfestigkeit und geringer Scherfestigkeit aus. Dies ermöglicht es der TBM, den Wandabschnitt einfach und ohne Gefahr für die Schneidwerkzeuge zu durchbohren, wodurch das Risiko von Wassereintritten und Bodensenkungen minimiert wird [67]. In Abbildung 2.21 ist eine bereits durchbohrte, sowie eine noch in der Herstellung befindliche Schlitzwand mit Soft-Eye dargestellt.



Abb. 2.21: FVK in der Anwendung in der Geotechnik, entnommen aus [67].

Wie bereits in Abschnitt 2.3.2.2 kurz angeführt, kann man sich den nichtmagnetischen Charakter von Glasfasern und Basaltfasern für elektromagnetisch empfindliche Bauteile zunutze machen.

Eine weitere Einsatzmöglichkeit von elektrisch nicht leitender FVK-Bewehrung zeigt sich bei der Sanierung von Bahnsteigen. Aufgrund der Verwendung von elektrisch nicht leitender Glasbewehrung müssen diese großformatigen Betonplatten nicht geerdet werden. Dies, und der hohe Vorfertigungsgrad, ermöglicht eine besonders schnelle Verlegung der Bauteile. Der gleisnahe Gefahrenbereich kann somit zügig fertiggestellt und damit Sperrzeiten für die Gleise sowie die damit verbundenen Kosten erheblich reduziert werden [68].

2.5 Berechnungsgrundlagen und Normierung

Wie von Rempel et al. [7] erläutert wird, wurden zur Realisierung der meisten bisherigen Bauprojekte mit nichtmetallischer Bewehrung vor allem Zustimmungen im Einzelfall (ZiE) und allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen (abZ) benötigt, wofür kosten- sowie zeitintensive Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsuntersuchungen durchgeführt werden mussten. Im Vergleich zu Stahlbeton ist zu beachten, dass eine einaxiale Spannungs-Dehnungsbeziehung der FVK-Bewehrung besteht, da die Materialien kein Fließen wie bei herkömmlicher Stahlbewehrung aufweisen. Der Querschnitt weist daher weniger Duktilität auf. Die Biegetragfähigkeit lässt sich iterativ auf der Komponentenebene ermitteln, wobei das Verfahren für beliebige Querschnitte anwendbar ist. Das grundsätzliche Vorgehen unterscheidet sich nicht von den herkömmlichen Verfahren des Stahlbetonbaus und wird in Abschnitt 4.2 kurz erläutert. Aufgrund der fehlenden Duktilität ist auf eine ausreichende Verformungskapazität zu achten [6] [7].

2.5.1 Duktilität vs. Verformungskapazität

Zusätzlich zu einem definierten Tragwiderstand muss eine ausreichende Versagensankündigung garantiert werden. Im Gegensatz zu Stahlbetonbauteilen, wo vor dem Erreichen der Belastbarkeitsgrenze eine Versagensankündigung durch das plastische Fließen der Bewehrung ermöglicht wird, versagten Bauteile mit FVK-Bewehrungen spröde. Laut Apitz [69] kann die Versagensankündigung bei FVK-verstärkten Betonbauteilen durch die Gewährleistung einer bestimmten Verformungskapazität erreicht werden. Für Einfeldträger könnte diese Verformbarkeit durch Sicherstellung eines definierten Durchhangs (z. B. $f \geq \frac{L}{100}$) bei Erreichung des maximalen Bemessungsmomentes im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) (M_{Ed}) nachgewiesen werden. Bei vorgespannten Systemen sollte folglich auch der Vorspanngrad gerade so hoch sein, dass die Verformungskriterien des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit (GZG) eingehalten werden (mit Berücksichtigung von Langzeiteffekten, z. B. $f_{t,\infty} \leq \frac{L}{250}$) und gerade so niedrig, dass die Versagensankündigung im GZT gegeben ist [5].

2.5.2 Bestehende Regelwerke im Vergleich

Basierend auf den Arbeiten von Krug [6] und Grasl [51] werden im folgenden die Unterschiede der bestehenden Regelwerke für Betonbauteile mit Faserverbundkunststoff (FVK)-Bewehrung näher erläutert. Eine detaillierte Darstellung der verschiedenen Bemessungsansätze und entsprechender Gleichungen findet sich in [6].

Tab. 2.5: Übersicht der Regelwerke zu FVK-bewehrten Betonbauteilen

Veröffentlichung	Land	Erscheinungsjahr (letztgültige Fassung)
JSCE 1997 [70]	Japan	1997
CNR 2007 [71]	Italien	2007
ACI 440.1R-15 [39]	USA	2015
AASHTO 2018 [72]	USA	2018
CSA S806-12 [73]	Kanada	2017
CSA S6:19 [74]	Kanada	2019
DAfStb [75]	Deutschland	2022

Folgende Schlussfolgerungen können aus diesem Vergleich nach [6, 51] gezogen werden:

Aktualität

Wie aus Tabelle 2.5 hervorgeht, variiert die Aktualität der Regelwerke stark. Im Gegensatz zu den japanischen (JSCE 1997) und italienischen Vorschriften (CNR 2007) wurden die nordamerikanischen Richtlinien aus den USA (ACI 440.1R-15, AASHTO 2018) und Kanada (CSA S806-12, CSA S6:19) in den letzten Jahren mehrmals überarbeitet. Der Entwurf der DAfStb-Richtlinie aus Deutschland ist seit November 2022 verfügbar und damit zum aktuellen Zeitpunkt die neueste Richtlinie.

Sicherheitsfaktoren

Die Sicherheitsfaktoren in den verschiedenen Regelwerken weisen teils erhebliche Unterschiede auf. Die DAfStb-Richtlinie [75] schreibt einen Sicherheitsfaktor von 0,67 vor. Die ACI 440.1R-15 [39] verfolgt ebenfalls einen sehr konservativen Ansatz mit einem Sicherheitsfaktor von 0,55 für FVK-Bewehrung, während die JSCE [70] den am wenigsten konservativen Ansatz mit einem Abminderungsfaktor von 0,77 für GFK-Bewehrung und 0,87 für CFK-Bewehrung verfolgt. Hinsichtlich der Mindestbewehrung ist die ACI 440.1R-15 [39] mit einem 1,8-fachen Rissmoment ebenfalls konservativer als andere Regelwerke, die ein 1,5-faches Rissmoment vorschreiben (CSA S806-12, CNR 2007).

Biegetragfähigkeit

Die Bemessung der Biegetragfähigkeit ist im Allgemeinen gut vergleichbar und basiert auf dem inneren Kräftegleichgewicht, wobei zwischen einem Versagen der Bewehrung und einem Versagen des Betons unterschieden wird. Die ACI 440.1R-15 [39] gibt abhängig vom Versagenstyp unterschiedliche Sicherheitsfaktoren für den Momentenwiderstand an. Beim Versagen der FVK-Bewehrung wird die Druckzonenhöhe zusätzlich durch den Abminderungsfaktor β_1 verkleinert. Bei Eintritt des empfohlenen Betonversagens kann die hohe Zugfestigkeit der Bewehrung nicht voll ausgenutzt werden. Ein ausgeglichener Bewehrungsgrad besteht, wenn Betonversagen und FVK-Produkt gleichzeitig versagen.

Querkrafttragfähigkeit

Die Bemessung der Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung erfolgt in der DAfStb-Richtlinie [75] mit geringfügigen Adaptionen nach dem gleichen Modell wie im Eurocode 2 [52]. Die Berechnung mit Querkraftbewehrung basiert auf einem additiven Ansatz aus Betontraganteil und Fachwerktraganteil. In allen Regelwerken werden zwei separate Traganteile berücksichtigt, einerseits der Betontraganteil und andererseits der Traganteil der Bewehrung. Um sprödes Schubversagen auszuschließen, wird in allen untersuchten Regelwerken die Spannung der Schubbewehrung begrenzt. Zusätzlich zur Spannungsbegrenzung begrenzen die ACI 440.1R-15 [39] und die CSA S6:19 [74] die Dehnung der Schubbewehrung auf 4‰. Eine Variation des Druckstrebenwinkels, wie sie in der Stahlbetonbemessung möglich ist, wird nicht in allen Regelwerken zugelassen, da die Plastizitätstheorie bei FVK-bewehrten Bauteilen aufgrund ihres linear elastischen Materialverhaltens keine Gültigkeit besitzt. Die DAfStb fixiert den Druckstrebenwinkel θ mit 51,3°. Abweichend dazu erlauben die CSA S806-12 [73] und die AASHTO 2018 [72] eine Anpassung des Druckstrebenwinkels in Abhängigkeit von der Längsbewehrungsdehnung.

Spannungsbegrenzung

Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) müssen die Spannungen der FVK-Bewehrung teilweise auf sehr niedrige Werte begrenzt werden, vor allem um einen Kriechbruch ausschließen zu können. In der DAfStb-Richtlinie [75] wird nicht zwischen verschiedenen Fasermaterialien unterschieden. Der Abminderungsfaktor α_{nmt} dient zur Berücksichtigung von Dauerhaftigkeitseinflüssen und von Langzeitbeanspruchungen auf die Zugfestigkeit und gibt dafür ein Verhältnis von Kurzzeit- zu Langzeitfestigkeit an. Die Größenordnung der spezifischen Begrenzungswerte anderer Richtlinien sind stark vom Fasermaterial abhängig. Die JSCE 1997 [70] ist die einzige Ausnahme, die nicht nach dem verwendeten Material unterscheidet und gleichzeitig am wenigsten konservativ ist, während die Abminderungen nach der ACI 440.1R-15 [39] am größten ausfallen. Im Vergleich zu Betonstahl wird die Spannung auf deutlich niedrigere Werte begrenzt (abgesehen von Carbon in der CNR 2007).

Rissbreitenbeschränkung

Die Begrenzung der Rissbreiten kann entweder durch eine direkte Berechnung der Rissbreiten (JSCE 1997, ACI 440.1R-15, CSA S6:19, CNR 2007, DAfStb), ohne direkte Berechnung mittels Grenzdurchmesser (DAfStb) oder durch Einhaltung von maximalen Abständen der Bewehrung (indirekte Methode von ACI 440.1R-15, AASHTO 2018, CSA S806-12) erfolgen. Im Eurocode 2 und in der DAfStb dürfen die Zugspannung in der Bewehrung 80% der charakteristischen Zugfestigkeit nicht überschreiten, damit es zu keinem unkontrollierten Risswachstum und Verformungen kommt, welches das Erscheinungsbild beeinträchtigen würde. Da bei FVK-Bewehrung keine Korrosion auftritt, erlauben einige Regelwerke größere Rissbreiten im Vergleich zu den Grenzwerten des Stahlbetonbaus. Die DAfStb-Richtlinie [75] erlaubt z.B. Rissbreiten von 0,4 mm. In der CNR 2007 [71] und JSCE 1997 [70] sind Rissbreiten von 0,5 mm zulässig, während in den nordamerikanischen Regelwerken unter bestimmten Bedingungen Rissbreiten bis zu 0,7 mm erlaubt sind.

Verformungsbegrenzung

Die Begrenzung der Verformungen wird in der Regel durch, mit Näherungsverfahren berechnete Werte für die Durchbiegungen (ACI 440.1R-15, AASHTO 2018, CSA S806-12, CNR 2007, DAfStb) durchgeführt. Aufgrund des geringeren Elastizitätsmoduls der FVK-Bewehrung sind größere Tragwerksverformungen als bei Stahlbeton zu erwarten. In der DAfStb-Richtlinie [75] gibt es zudem einen Nachweis ohne direkte Berechnung, der in Anlehnung an den Eurocode 2 [52] erfolgt. Die ACI 440.1R-15 [39] bietet zusätzlich die Möglichkeit eines vereinfachten Verfahrens an, welches unzulässige Verformungen über eine Begrenzung der Biegeschlankheit verhindert, das jedoch sehr konservativ und somit meist unwirtschaftlich ist.

Umwelteinflüsse

Die DAfStb-Richtlinie [75] schreibt vor, dass der Abminderungsfaktor α_{nmt} von Hersteller bekannt gegeben werden muss, wodurch dieser selbst für den selben Fasertyp unterschiedlich ausfallen kann. Der Abminderungsbeiwert α_{nmt} beinhaltet neben der Berücksichtigung von Dauerhaftigkeitseinflüssen und von Langzeitbeanspruchungen auf die Zugfestigkeit auch alle Umwelteinflüsse und beträgt für GFK und BFK ungefähr 0,53 und für CFK 0,82. Zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit verwenden auch die ACI 440.1R-15 [39], die AASHTO 2018 [72] und die CNR 2007 [71] einen Umweltfaktor. Dieser Faktor berücksichtigt die Materialfestigkeitsabnahme aufgrund von

Umwelteinflüssen. Die Regelwerke differenzieren hier jedoch nicht zwischen der Art des Einflusses.

Schlussfolgerung

Der Vergleich der verschiedenen Regelwerke zeigt zum Teil markante Unterschiede in Aktualität, Sicherheitsfaktoren und Bemessungsansätzen auf. Die Bemessung der Biegetragfähigkeit und Querkrafttragfähigkeit offenbart zwar gewisse Gemeinsamkeiten, jedoch differenzieren die Regelwerke bei der Berechnung der Querkraftbewehrung. In Bezug auf den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit variieren die Begrenzungswerte für Spannungen, Rissbreiten und Verformungen zum Teil erheblich. Die Regelungen zur Dauerhaftigkeit berücksichtigen unterschiedlich den Einfluss von Umwelteinflüssen. Das spröde und wenig duktile Verhalten der Bauteile und die noch zu wenig untersuchte Langzeithaltbarkeit unter realen Bedingungen erfordert hohe Sicherheitsfaktoren, was die wirtschaftliche Nutzung der Materialien erschwert.

Kapitel 3

Gewickelte Basaltbewehrung

3.1 Allgemein

Die Konzeptionierung von Betonbauteilen mit FVK-Bewehrung wirft in Bezug auf komplexe geometrische Rahmenbedingungen die Frage nach einer optimalen Bewehrungsführung auf. Diese sollte eine ausgewogene Balance zwischen Verlegefreundlichkeit und Leistungsfähigkeit gewährleisten. In diesem Kontext wird die Verwendung von gewickelter Bewehrung in Betracht gezogen, bei der je nach Anforderungen beliebige Winkel gewickelt werden können. In der Arbeit von Spadea et al. [76] werden bereits grundlegende analytische und experimentelle Studien vorgestellt, die die Wirksamkeit des gewickelten Bewehrungssystems belegen und die Grundlage für künftige Bemühungen zur Entwicklung automatisierter Fertigungsverfahren für Betonstrukturen bilden. Gewickelte FVK-Produkte wurden auch im Zusammenhang von umschnürten Betonbauteilen in der Arbeit von Jonas und Knippers [77] untersucht, wo das Tragverhalten von Betondruckgliedern mit Umschnürungen durch geflochtene und gewickelte Carbonrohre thematisiert wird und einen Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen an geflochtenen und verzweigten Stützen bildet. Bei erfolgreicher Umsetzung dieser neuen Bewehrungstechnologie könnte sie mithilfe automatisierter, robotergesteuerter Wicklungsmaschinen entsprechend den Anforderungen unterschiedlicher Anwendungsfälle hergestellt werden.

In dieser Arbeit erfolgt zunächst ein Vergleich der Zugfestigkeit von aus Basaltfasern hergestellten Garnen unterschiedlicher Herstellungsart. Dies geschieht vor dem Hintergrund, die bestmögliche Ausführungsform für die Wicklung zu finden. Um eine möglichst breite Produktpalette abzudecken, wird zusätzlich zu den Garnen ein Vergleich mit gewickelten Textilien angestellt. Dafür sollen die verschiedenen Prüfkörper in eine Zugprüfmaschine eingespannt und bis zum Bruch belastet werden. Es sollen aussagekräftige Versuchsergebnisse mit einer möglichst praktikablen Verankerungsmethode resultiert werden. Anschließend wird anhand von zwei dünnwandigen Hohlkastenträgern mit verschiedenen Wicklungsarten der Basaltbewehrung eine Simulation durchgeführt, um den Versagensmechanismus und die dazugehörige Bruchlast mit Hilfe des Finite-Elemente-Programms Atena 2D zu bestimmen. Nach der Auswertung der realen Versuchsdaten mittels Photogrammetrie werden diese mit den Simulationsergebnissen verglichen. Abschließend wird auf eine potenzielle Einsatzmöglichkeit von gewickelter Bewehrung eingegangen.

3.2 Zugversuche an unterschiedlichen Basaltgarnen

3.2.1 Versuchsaufbau und Zielsetzung

Um das Tragverhalten und die aufnehmbare Belastung von Basaltgarnen unterschiedlicher Herstellung zu vergleichen, werden diese mittels Zugversuch geprüft. Die Palette an Basaltfaserprodukten unterliegt derzeit einem stetigen Wandel, da laufend neue Produkte mit anderen Querschnitten und Herstellungsmethoden auf dem Markt kommen. Die in der folgenden Auflistung und in Abbildung 3.1 dargestellten Proben werden miteinander verglichen. Zusätzlich wird als Referenz die Kett- und Schussrichtungen eines Basaltfasertextils des Produkts Geogrid¹ jeweils mit und

¹Bewehrungsgewebe, das aus Basaltfasern in variablen Maschenweiten hergestellt wird. Es handelt sich um ein gewirktes Gelege, welches aus Multifilamentgarne mit Kett- und Schussrichtung hergestellt wird [78].

ohne zusätzlicher Beschichtung mit Epoxidharz auf ihre Zugtragfähigkeit getestet. Die Versuche wurden mit einer Zugprüfmaschine der Firma ZwickRoell durchgeführt. Das Ziel der Versuche ist es, eine Aussage über die Belastbarkeit der Produkte und ihren herstellungsbedingten Unterschieden treffen zu können. Relevant ist dies vor allem aufgrund der unterschiedlichen Kosten für die Herstellung der Produkte.

- a) 9600 tex gezopft
vier Stränge von Basaltfasern mit insgesamt 9600 tex (4 x 2400 tex Roving) werden übereinander geschlagen und so verflochten, anschließend in Epoxidharz getränkt, relativ einfach und billig herstellbar
- b) 9600 tex UD
ein unidirektional gerichteter Basaltfaserquerschnitt mit 9600 tex (4 x 2400 tex Roving), getränkt in Epoxidharz
- c) 4800 tex UD
ein unidirektional gerichteter Basaltfaserquerschnitt mit 4800 tex (2 x 2400 tex Roving), getränkt in Epoxidharz
- d) 4800 tex geflochten
ein geflochtener Basaltfaserquerschnitt mit 4800 tex (2 x 2400 tex Roving), mit untereinander verdrehten Garne, getränkt in Epoxidharz
- e) Geogrid Schuss ohne Epoxidharz
der Schussfaden eines Geogrid Basaltfasertextils mit ca. 4800 tex (2 x 2400 tex Roving), ohne Beschichtung mit Epoxidharz
- f) Geogrid Schuss mit Epoxidharz
der Schussfaden eines Geogrid Basaltfasertextils mit ca. 4800 tex (2 x 2400 tex Roving), mit Beschichtung mit Epoxidharz
- g) Geogrid Kette ohne Epoxidharz
der Kettfaden eines Geogrid Basaltfasertextils mit ca. 4800 tex (2 x 2400 tex Roving), ohne Beschichtung mit Epoxidharz
- h) Geogrid Kette mit Epoxidharz
der Kettfaden eines Geogrid Basaltfasertextils mit ca. 4800 tex (2 x 2400 tex Roving), mit Beschichtung mit Epoxidharz

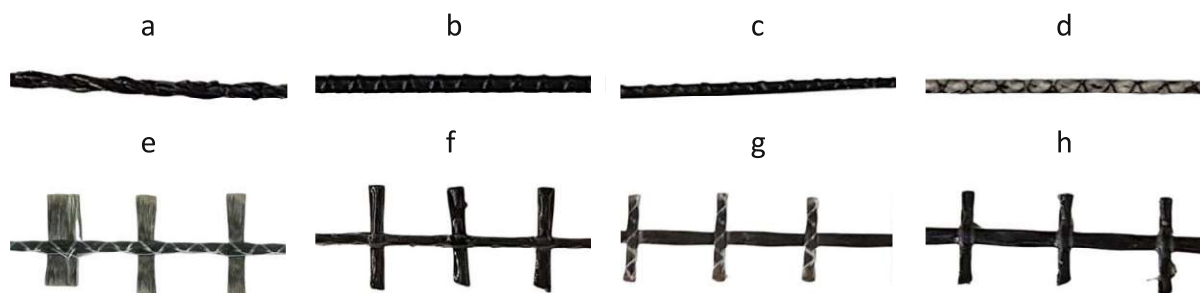


Abb. 3.1: Probestkörper für Zugversuche, hergestellt aus Basaltfasern.

3.2.2 Probleme bei der Versuchsdurchführung

Bei der Durchführung der Versuche wurde ein Zugbruch in der freien Länge der Proben angestrebt. Je Probentyp wurden drei Probekörper getestet, um eine repräsentative Versuchsauswertung durchführen zu können. Aufgrund der geringen Querdruckfestigkeit der Faserwerkstoffe stellte die Versuchsdurchführung jedoch Herausforderungen bezüglich der Einspannung und Verankerung der Probekörper dar. In Abbildung 3.2 sind verschiedene Einspannungsmethoden für die Probekörper dargestellt:

- a) ohne zusätzliche Hilfsmittel
- b) Verwendung von Holzfaserplatten und Schleifpapier
- c) Verwendung von Aluminiumplatten
- d) in Epoxidharz verankerte Probekörper

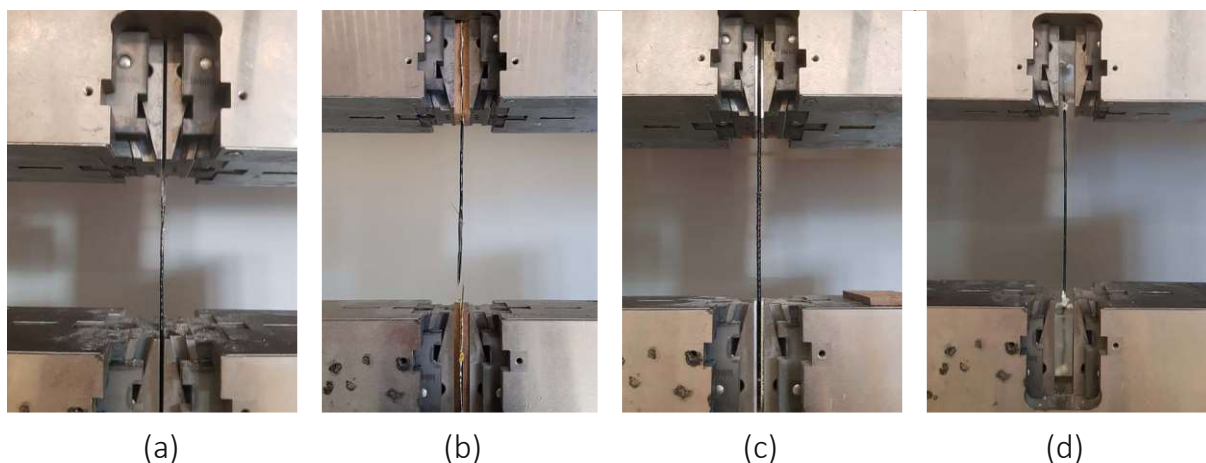


Abb. 3.2: Verschiedene Versuchsausführungen

Es ist zu beachten, dass keine der dargestellten Varianten zufriedenstellende Ergebnisse für alle Probekörper liefern konnte. Entweder trat aufgrund von Querpressung an der Einspannstelle kein Bruch in der freien Länge auf oder die Probekörper wurden aus der Verankerung herausgezogen und konnten nicht bis zum Versagen getestet werden. Es wurde daher eine alternative Einspannungsmethode gesucht.

3.2.3 Versuchsdurchführung mit ausbetonierten Stahlrohren

In Anlehnung an den Versuchsaufbau von Preinstorfer et al. [79] wurde der Ansatz gewählt, dass die Probekörper in zylindrischen Stahlrohren, mit expandierendem ultrahochfestem Beton (UHPC) verankert werden. Zusätzlich zu dem expandierendem Betongemisch wurde durch eine Quetschung der Rohre in Richtung der Zugbelastung ein Herausziehen des Betonkörpers aus dem Rohr verhindert. In Tabelle 3.1 ist die verwendete Betonrezeptur für die Versuchsdurchführung ersichtlich. Abbildung 3.3 zeigt den schematischen Aufbau des Zugversuchs sowie die bereits vorbereiteten Probekörper in den mit UHPC-gefüllten Stahlrohren.



Abb. 3.3: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Zugtragfähigkeit, angelehnt an [79].

Mit der neu gewählten Verankerungsart der Probekörper konnten alle Proben entsprechend den gewünschten Vorgaben getestet werden. In Abbildung 3.4 sind zwei ausgewählte Probenreihen mit den unterschiedlichen Versuchsdurchführungsarten dargestellt. Es zeigt sich, welchen großen Einfluss die richtige Verankerung der Probekörper auf die Ergebnisverwertbarkeit hat. In Anhang A sind für jede Probenreihe die zugehörigen Kraft-Verformungs-Diagramme angeführt, welche die Grundlage für die nachfolgende Ergebnisinterpretation bilden. Außerdem sind Vergleichsdiagramme dargestellt, welche die gleiche Probenreihe mit unterschiedlichen Verankerungskonfigurationen zeigen, wie exemplarisch auch in Abbildung 3.4 zu sehen.

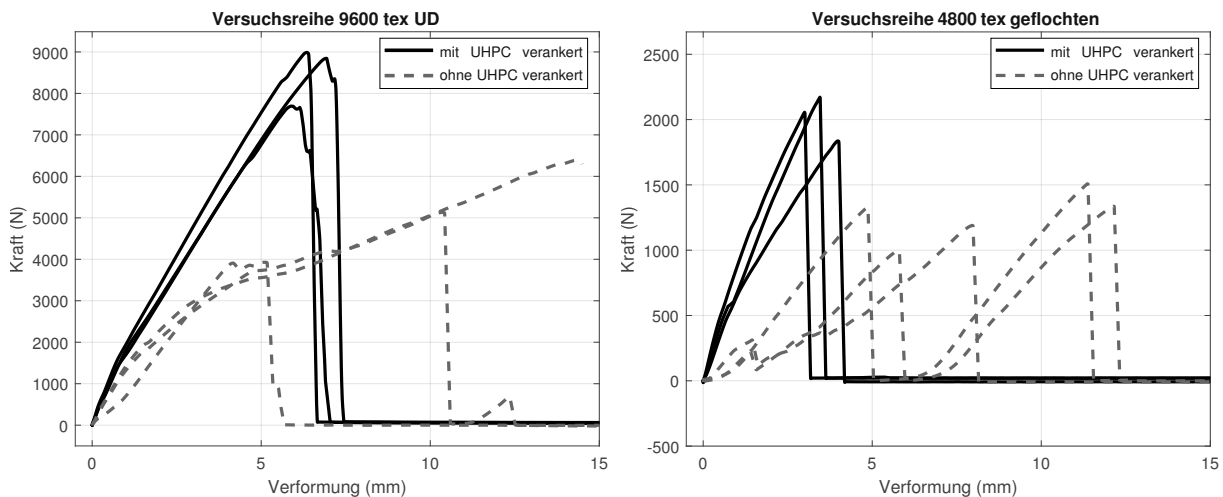


Abb. 3.4: Vergleich der Zugversuchsdurchführungen mit und ohne UHPC-Verankerung für die 9600 tex unidirektionalen Garne (links) und 4800 tex geflochtenen Garne (rechte).

Tab. 3.1: UHPC Betonrezeptur

Wasser	Fließmittel	Kons.halt.	Entlüf.	CEM I	Zement	ZS reaktiv	ZS inert	Sand
[kg/m ³]	ACE 430 [kg/m ³]	Sky 911 [kg/m ³]	DCC [kg/m ³]	52,5 N [kg/m ³]	expan. [kg/m ³]	Elkem 940 U [kg/m ³]	KSM H100 [kg/m ³]	QS 0,1-0,7 [kg/m ³]
172,0	33,3	14,8	1,0	724,7	14,8	147,9	295,8	927,5

3.2.4 Interpretation der Versuchsergebnisse

Abbildung 3.5 illustriert die Versuchsergebnisse der unterschiedlichen Probereihen mit UHPC-Verankerung und gibt den Streubereich der erreichten Bruchspannungen an. Beim Vergleich zwischen den beiden Probereihen mit 9600 tex zeigen sich geringe Unterschiede aufgrund der unterschiedlichen Herstellungsart. Die gezopft-hergestellten Probekörper erreichen mit 2,0 GPa im Mittel etwa 85% der Bruchfestigkeit der Probekörper mit unidirektionaler Lage der Fasern mit 2,35 GPa. Viel signifikanter zeigt sich dieser Unterschied beim Vergleich der Probereihen mit 4800 tex. Die geflochtenen Proben erreichen im Mittel mit 1,1 GPa nur ca. 45% der Bruchfestigkeit der unidirektionalen Probekörper mit 2,55 GPa. Zusätzlich zeigt sich, dass sich mit einer kleineren tex-Anzahl die aufnehmbare Bruchspannung der Proben erhöht. Durch eine erhöhte Fehlstellenwahrscheinlichkeit, welche durch eine größere Anzahl an Fasern bei Querschnitten mit höherer tex-Anzahl auftritt, reduziert sich die aufnehmbare Bruchspannung mit zunehmender Querschnittsgröße. Dieses Verhalten spiegelt sich auch in Produktdatenblättern² wider.

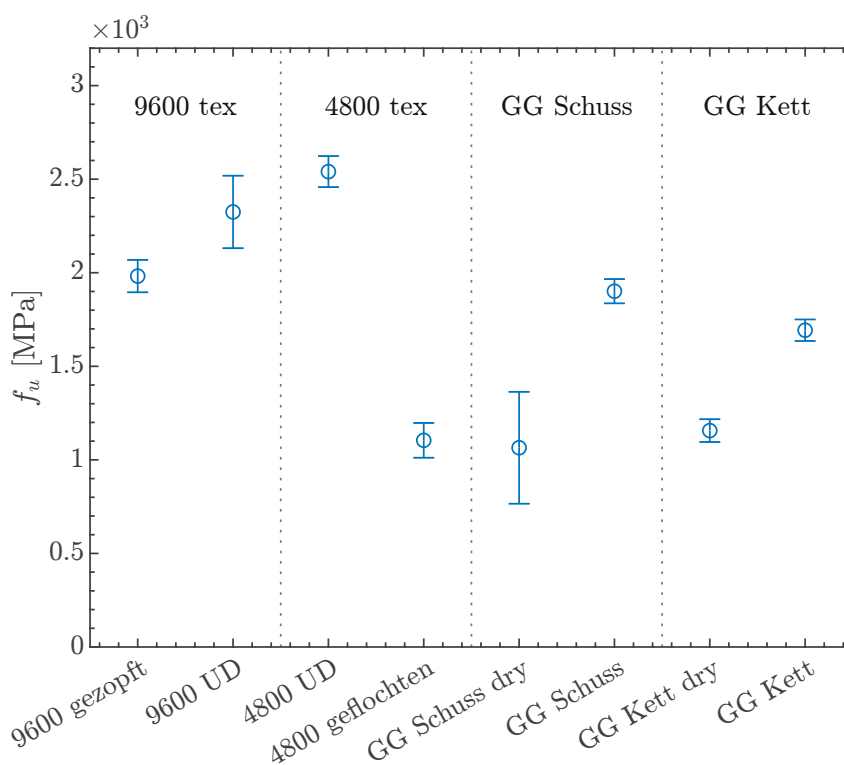


Abb. 3.5: Vergleich der erreichten Zugfestigkeiten (Mittelwert und Standardabweichung).

Bei den Probereihen aus Geogrid wurde einerseits der Einfluss einer zusätzlichen Beschichtung mit Epoxidharz (dry...ohne Beschichtung) und andererseits mögliche Unterschiede zwischen Kett- und Schussrichtung untersucht. Die Unterschiede zwischen Kett- und Schussrichtung zeigen sich als statistisch nicht relevant. Ein relevanter Einfluss in Bezug auf die aufnehmbare Bruchspannung ist jedoch bei der zusätzlichen Auftragung einer Beschichtung erkennbar. Abgesehen von einer leicht erhöhten Ergebnisstreuung in der Probereihe "Geogrid Schuss ohne Beschichtung", die auf eine geringere Bruchlast bei einem Probekörper zurückzuführen ist, zeigt sich, dass die erzielbare Bruchspannung bei den Probereihen ohne Beschichtung lediglich etwa 67% der Bruchspannung der Probekörper mit zusätzlicher Epoxidharzbeschichtung entspricht.

²z.B. in [80] werden mit zunehmendem Querschnitt die aufnehmbaren Zugfestigkeiten geringer

3.3 Gewickelte Träger

3.3.1 Allgemein

Nachfolgend wird der Einsatz von gewickelter Basaltfaserbewehrung anhand von zwei Versuchen an einfeldrigen Hohlkastenträgern untersucht. Die Varianten unterscheiden sich lediglich hinsichtlich der Wicklungsführung der Bewehrung und sind in Abbildung 3.6 und Abbildung 3.7 dargestellt. In Variante 1 erfolgt eine kreuzweise Wicklung in $+45^\circ$ bzw. -45° zur Trägerachse geneigt, mit einem Rasterabstand von 20 mm. Die Wicklung in Variante 2 erfolgt in grober Anlehnung an die zu erwartenden Hauptspannungsverläufe des Trägers und zeichnet sich dadurch aus, dass der Wicklungswinkel variiert wird und die Abstände vergrößert werden. Die Wicklung erfolgt dabei mit einem 2400 tex Garn, welcher eine Querschnittsfläche von $0,92 \text{ mm}^2$ aufweist. Um ein Biegeversagen der Träger ausschließen zu können, wurden in den Ecken je ein Basaltbewehrungsstab mit einem Durchmesser von 16 mm angeordnet. Die genaue Bewehrungsführung und die geometrischen Rahmenbedingungen sind in Abbildung 3.8 ersichtlich. Die umschließende Betonmatrix besteht aus hochfestem Mörtel (Sika Grout 312). In Tabelle 3.2 bis 3.4 sind die Materialeigenschaften der verwendeten Baustoffe angeführt.

Tab. 3.2: Sika Grout 312²

$f_{cm,cube}$ [MPa]	$f_{ct,fl}$ [MPa]	$E_{c,m}$ [GPa]
95	9,0	29

Tab. 3.3: Basaltwicklung

A_T [mm ²]	f_{tu} [MPa]	E_{Tex} [GPa]
0,92	2550 ¹	64

Tab. 3.4: Basaltstäbe²

A_R [mm ²]	f_{tu} [MPa]	E_{tm} [GPa]
200,96	1000	48

¹Zugfestigkeit des 4800 tex UD aufgrund von nicht vorhandenen Versuchsdaten für 2400 tex UD, tatsächlich sind sicher höhere Werte zu erwarten

²laut Herstellerangaben



Abb. 3.6: Variante 1 der gewickelten Träger



Abb. 3.7: Variante 2 der gewickelten Träger

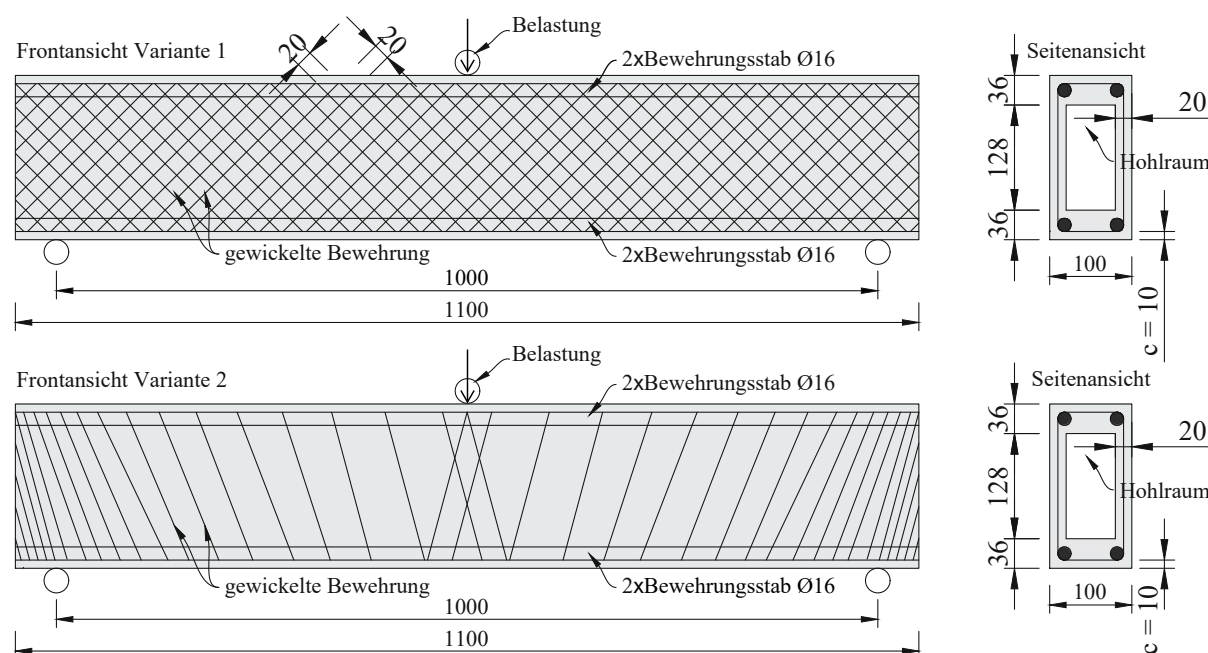


Abb. 3.8: Bewehrungsführung der beiden gewickelten Trägervarianten

3.3.2 Versuchsergebnisse der Prüfung im Labor

Die Prüfung der beiden Trägervarianten erfolgte als 3 Punkt Biegeversuch im Labor des Instituts für Tragkonstruktionen mit einer weggesteuerten Prüfmaschine. In Abbildung 3.8 ist der Versuchsaufbau dazu erkennbar. Zur Auswertung der Versuche wurden Wegaufnehmer und Kraftmessdosen installiert, sowie mittels periodischen Kameraaufnahmen über die Versuchsdauer hinweg eine Fotoserie erstellt. In Abbildung 3.9 sind beide Trägervarianten nach Erreichen der Bruchlast ersichtlich.

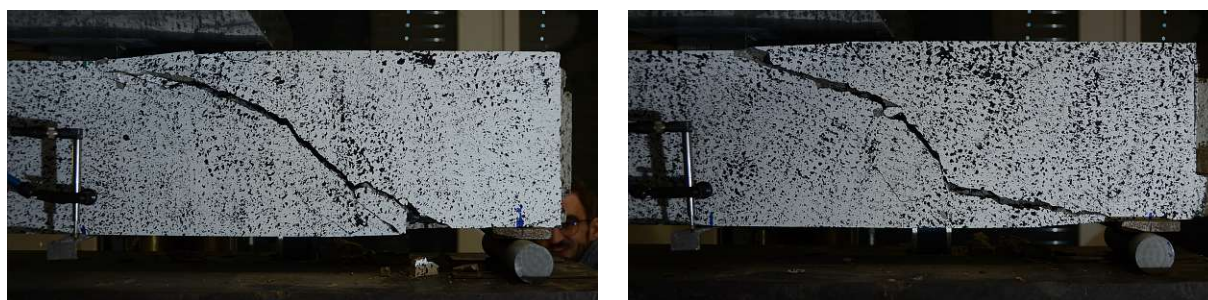


Abb. 3.9: Versagensbilder von Variante 1 (links) und Variante 2 (rechts)

Wie aus der in Abbildung 3.10 dargestellten Kraft-Verformung-Beziehung ersichtlich ist, weisen beide Träger ein ähnliches Tragverhalten auf, wobei Variante 1 eine höhere Last von ca. 92 kN im Vergleich zu Variante 2 mit ca. 78 kN aufnehmen kann. Im Vergleich zur Bewehrungsmenge von Variante 1 enthält der Träger der Variante 2 lediglich etwa 33 % dieser Bewehrungsmenge. Trotz der höheren Steifigkeit von Träger 1 kommt es erst bei einer Verformung von 8,4 mm zum Bruch, wohingegen Träger 2 bereits bei 7,1 mm Verformung versagt. Das Versagen selbst erfolgt bei beiden Varianten plötzlich und spröde.

In Abbildung 3.11 sind die Mechanismen der Querkraftübertragung entlang eines Schubrisses veranschaulicht. Ein Vergleich mit den Versagensbildern der Träger in Abbildung 3.9 zeigt nicht nur deutlich ausgeprägte Schubrisse, sondern auch das Auftreten von Dübelrissen in der Zugzone der Versuchsträger. Die konstitutiven Beziehungen und Parameter der einzelnen Tragmechanismen sind ausführlich in der Arbeit von Huber et al. [81] erläutert.

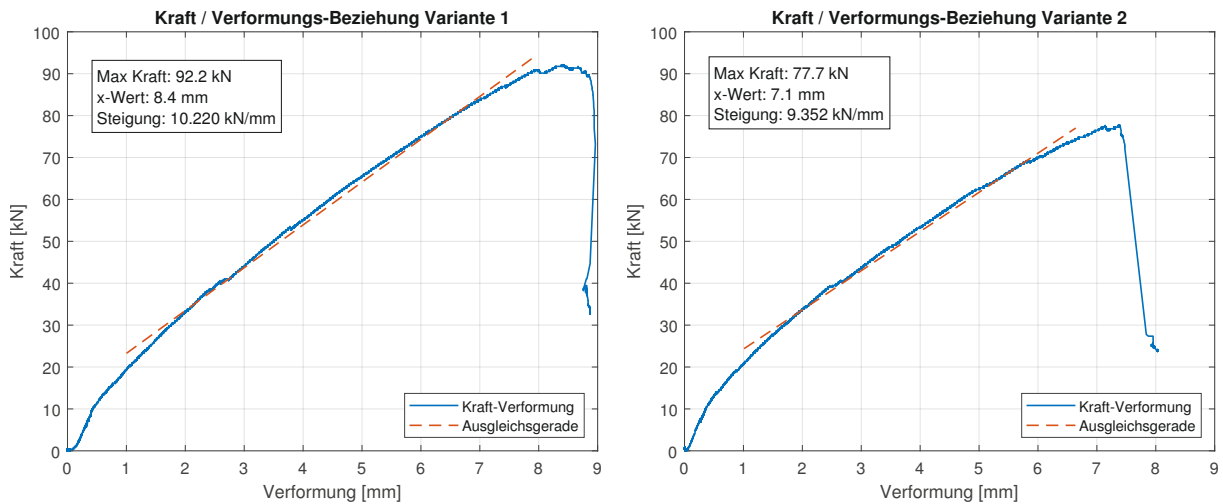


Abb. 3.10: Kraft-Verformungs-Beziehung von Variante 1 und 2 der Versuche

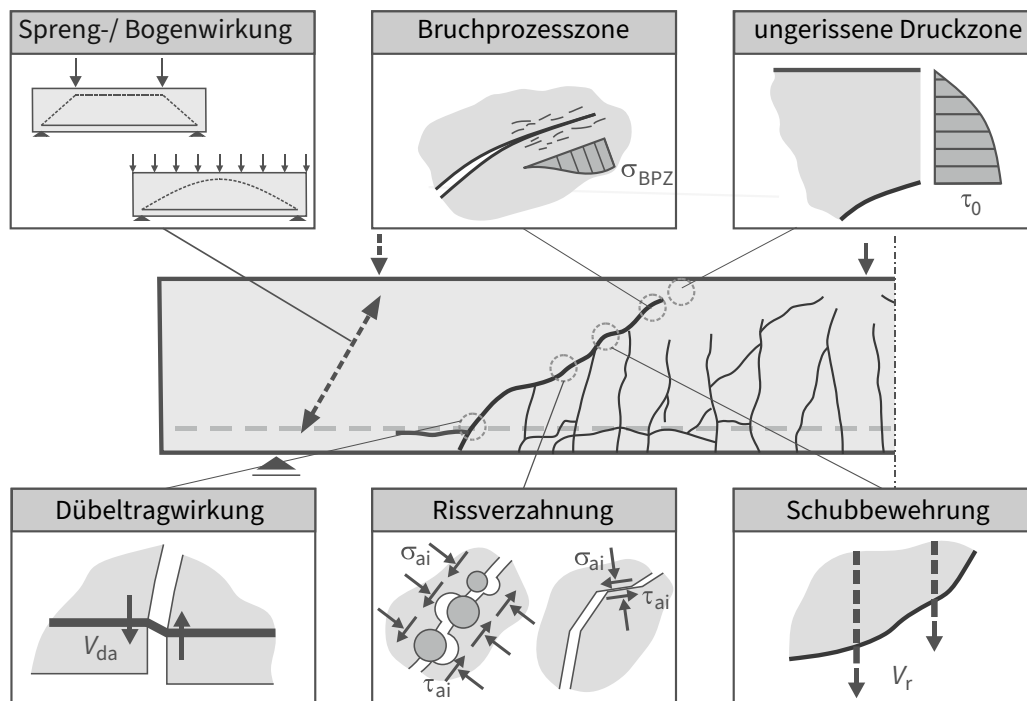


Abb. 3.11: Querkrafttragmechanismen, in Anlehnung an [5].

3.3.3 Versuchssimulation mit ATENA 2D

Die nachfolgende Finite-Elemente Berechnungen wurden mit dem Programm ATENA 2d durchgeführt. Wie von Červenka und Pukl [82] beschrieben, ist das Programm ATENA ein leistungsfähiges Werkzeug für die nichtlineare Berechnung von Stahlbetonstrukturen. Nichtlineare Berechnungen stellen eine moderne Methode zur Untersuchung des Verhaltens von Baustrukturen unter verschiedenen Einwirkungen dar. Sie ermöglichen eine detaillierte Untersuchung des Strukturverhaltens unter Belastung, einschließlich der Bestimmung von Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Versagensmechanismen.

Sie liefert wichtige Informationen über das Tragverhalten von Konstruktionen in allen Lastbereichen, insbesondere die Bestimmung und Vorhersage der Höchstlast und der Versagensart. Die nichtlinearen Materialmodelle in ATENA basieren auf der orthotropen Schadenstheorie und der betonspezifischen Plastizitätstheorie. Für Beton unter Zugbeanspruchung wird eine nichtlineare Bruchmechanik angewendet, wobei Risse als verschmierte Schädigung (Dehnungen) modelliert werden, was die Anwendung von Methoden der Kontinuumsmechanik auch für das geschädigte Material ermöglicht. Zur objektiven Analyse, die unabhängig vom Finite-Elemente-Netz ist, wird die sogenannte Rissbandmethode angewendet [82].

Zur Simulation der beiden Versuchsvarianten wurde das ATENA Materialmodell SBeta für die Betonstruktur herangezogen. Um das Tragverhalten der nichtmetallischen Basaltfaserbewehrung, die in Abschnitt 3.2 getestet wurde, korrekt abzubilden, wurde ein multilineares Materialmodell gewählt. Dieses Materialmodell bildet eine lineare Spannungs-Dehnungsbeziehung bis zur Bruchspannung ab, um dann annähernd vertikal fast auf null abzufallen. In Variante 1 wurde ein verschmierter Ansatz zur Modellierung der eng gewickelten Bewehrung gewählt, welcher die vorhandene Bewehrung anhand des Verhältnisses von Bewehrungsfläche zu Betonquerschnittsfläche berücksichtigt. Im Gegensatz dazu wurde in Variante 2 ein diskreter Modellierungsansatz gewählt und alle Bewehrungselemente in ihrer tatsächlichen Lage modelliert. In Abbildung 3.12 sind beide Modellbildungen dargestellt. Durch die Unterstützung von Herrn Červenka und seinem Team konnte das Materialmodell an die Versuchsanforderungen angepasst werden. Die dafür adaptierten Materialparameter sind in Tabelle 3.5 - 3.7 ersichtlich.

Tab. 3.5: Einstellungen für das Materialmodell SBeta, abweichend der voreingestellten Werte

E-Modul E [GPa]	Poission's Zahl μ [-]	Zugf. f_t [MPa]	Druckf. f_c [MPa]	spez. Rissenergie G_f [MN/m]	Druckf. red. wegen Rissen [-]	krit. Druckverf. w_d [mm]
35	0,2	5,0	80	1,8 E-4	1,0	-2,0

Tab. 3.6: Basalttextil-verschmiert

Dehnung [%] Spannung [MPa]	A_{tex}/A_c Steg [-]	A_{tex}/A_c o+u [-]
0 - 2,625 - 3 0 - 2500 - 50	2,3 E-3	9,2 E-4

Tab. 3.7: Basaltstab DN16

Dehnung [%] Spannung [MPa]
0 - 2,083 - 2,15 0 - 1000 - 0

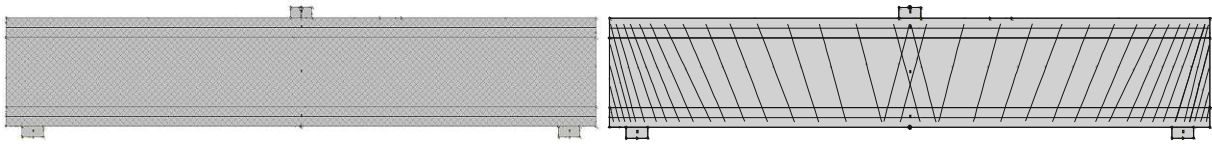


Abb. 3.12: Modellbildung in ATENA, Variante 1 (links) und Variante 2 (rechts)

Die Berechnung erfolgte mit der Newton-Raphson Methode, welche eine Gleichgewichtssiteration zwischen äußeren Lasten und der Systemantwort durchführt. Zeigt der Vergleich zwischen den äußeren und den inneren Kräften eine zu große Abweichung, wird für die nächste Gleichgewichtssiteration das Bauteilverhalten entsprechend der vorgegebenen Nichtlinearität aus dem Materialmodell korrigiert, bis Konvergenz hergestellt werden kann. Die Lastaufbringung erfolgte in der Simulation verformungsinduziert.

Wie in der Arbeit von Bielak [83] erläutert wird, ist aufgrund der anisotropen Materialeigenschaften von FVK-Produkten meist nicht die volle Zugtragfähigkeit des Bewehrungsproduktes ausnutzbar. Biaxiale Spannungen innerhalb eines Verstärkungselements können unbeabsichtigt auftreten und erfordern die Übertragung von Zugspannungen auch senkrecht zur Faserrichtung. Beim Gleiten von Rissflächen, wie dies typischerweise der Fall ist, wenn Schubrisse die Bewehrung kreuzen, können auch Querkräfte in den Fasern auftreten. Für den Fall der gewickelten Bewehrung kann dieses Verhalten bei den ums Eck geführten Fasersträngen relevant werden. Das Problem ist einerseits die Umlenkkraft und andererseits die ungleichmäßige Dehnung in der Zone der Umlenkung. Um dieses Verhalten zu berücksichtigen, sollte eine Reduktion der Zugfestigkeit vorgenommen werden [83].

Ergebnisse der Simulation

Aus den Ergebnissen der Simulation von Trägervariante 1, welche in Abbildung 3.13 dargestellt sind, zeigt sich als Versagensmechanismus deutlich ein Schubversagen. Biegezugversagen kann ausgeschlossen werden, da die Spannung der Längsbewehrung bei Erreichen der Bruchkraft lediglich etwa 30% der Bruchspannung des Bewehrungsstabes entspricht. Das Rissbild der Variante 1 bestätigt das schubbedingte Versagen des Trägers. Der große Bereich der Schubrisse zeigt, dass bedingt durch die engmaschige Wicklung fast der gesamte Trägerquerschnitt aktiviert werden kann.

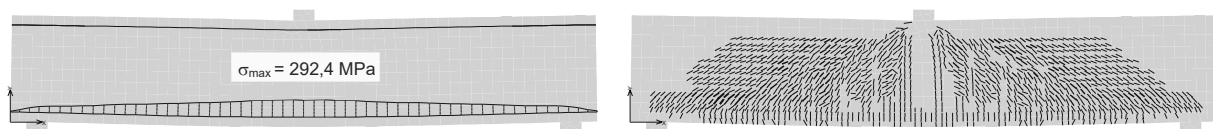


Abb. 3.13: Ergebnisvisualisierung der Simulation für Variante 1, Spannung in der Zugbewehrung (links) und Rissbild (rechts)

In den in Abbildung 3.14 dargestellten Ergebnisvisualisierungen der Trägervariante 2, ist links der Spannungszustand in den einzelnen Bewehrungssträngen ersichtlich. Der rechte Bereich der Grafik zeigt das zugehörige Rissbild basierend auf den Simulationsergebnissen. Es wird deutlich, dass die gewickelte Bewehrung bis zum Versagen belastet wird, da die Spannungen in der Bewehrung die Zugfestigkeit des Materials erreichen. Im Rissbild ist im Vergleich zu Variante 1 erkennbar, dass aufgrund der weitmaschigeren Wicklung der Basaltfasern ein Schubversagen

weiter innen, in Richtung Trägermitte, auftritt. Durch einen verdichteten Wicklungsabstand könnte die Tragfähigkeit des Trägers noch weiter gesteigert werden.

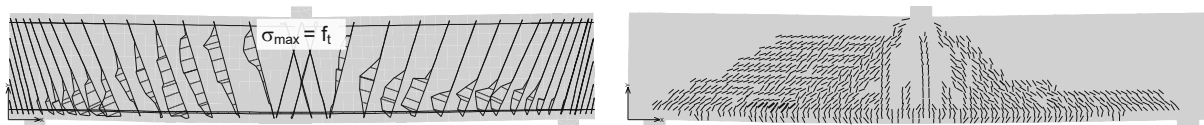


Abb. 3.14: Ergebnisvisualisierung der Simulation für Variante 2, Spannung der Bewehrung (links) und Rissbild (rechts)

Der sich bei der Simulation ergebende Kraft/Verformungsverlauf für beide Varianten ist in Abbildung 3.15 visualisiert. Es zeigt sich, dass Variante 1 mit prognostizierten 92,8 kN eine größere Belastung wie Variante 2 mit prognostizierten 76,7 kN aufnehmen kann. Die Durchbiegungen betragen bei Variante 1 ca. 9 mm und bei Variante 2 7 mm.

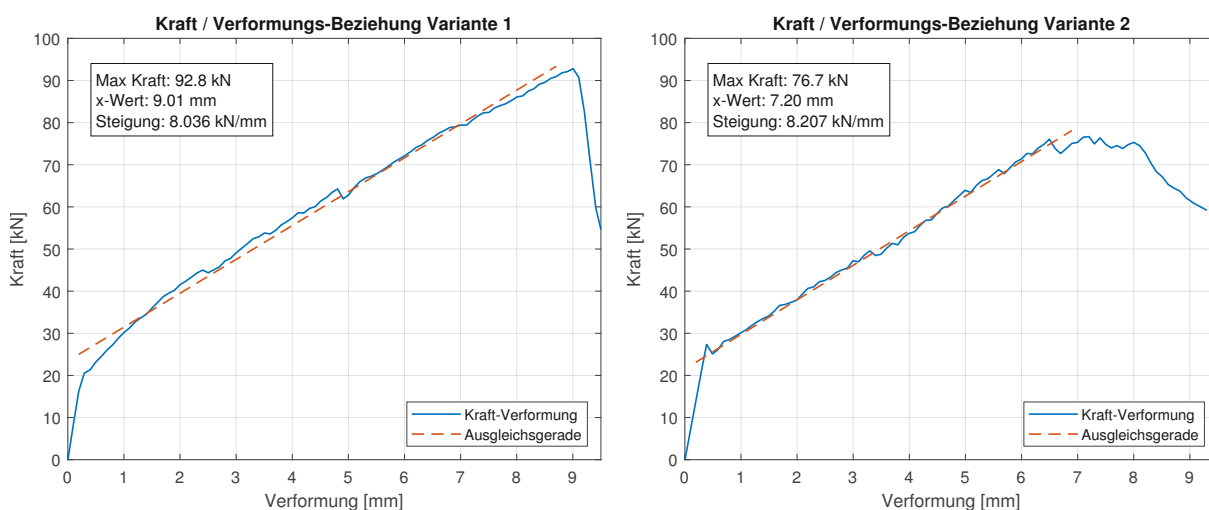


Abb. 3.15: Kraft-Verformungs-Beziehung von Variante 1 und 2 aus den Simulationen

3.3.4 Photogrammetrische Versuchsauswertung

Zur weiteren Auswertung der Versuche wurden Bilderfassungs- und Analysemethoden der digitalen Bildkorrelation (DIC) eingesetzt, um den Beginn und das Fortschreiten von Rissen kontinuierlich zu verfolgen. Die Software GOM-Correlate [84] berechnet die Bewegungen von gesamten Pixelgruppen (Facetten) und analysiert Veränderungen der Abstände (x und z) von einzelnen Facetten durch Bildvergleiche (Tracking) mit den zuvor aufgezeichneten Bildern. In Abbildung 3.9 sind die willkürlich aufgetragenen Muster auf den Trägern ersichtlich, welche das Tracking der Facetten ermöglichen. Anhand der Facettenverformungen können die zugehörigen Dehnungszustände analysiert werden (Verformung der Pixel zueinander innerhalb einer Facette, rot markiert in Abbildung 3.16). Zur korrekten Anwendung und Genauigkeit der Systeme wird auf den Softwarehersteller [84] und die Arbeit von Jesse und Kutzner [85] verwiesen. Die relative Genauigkeit wird vom Hersteller mit einer Standardabweichung von 0,01 % angegeben, was eine ausreichend präzise Bestimmung der Betondehnungen ermöglicht [81].

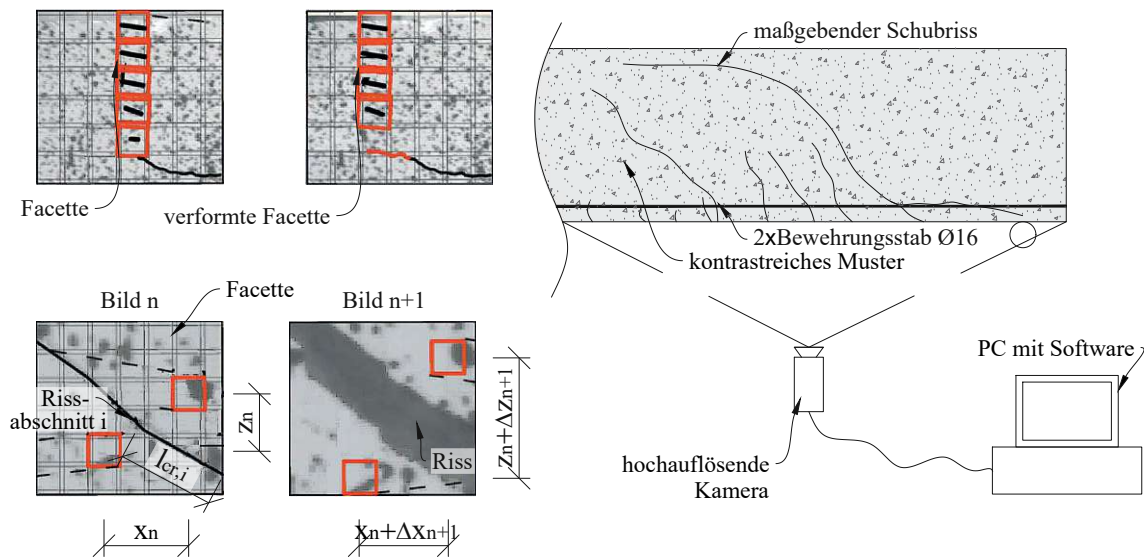


Abb. 3.16: Prinzip der digitalen Bildkorrelation, in Anlehnung an [81].

Während der Versuchsdurchführung wurden mit einer hochauflösenden Spiegelreflexkamera in einem Intervall von 0,2 Hz, also einem Zeitabstand von fünf Sekunden, eine Bilderserie erstellt. Diese Bilderserien dienen als Grundlage zur Auswertung der Rissentwicklung mit Hilfe der digitalen Bildkorrelation. Die Skalierung wurde mithilfe eines neben dem Prüfkörper befindlichen, mitabgebildeten Maßstabes festgelegt. Nach dem Erzeugen der Flächenkomponente im relevanten Messbereich und der Berechnung aller Bildstufen können die Rissbilder interpretiert und Rissbreiten ausgewertet werden.

Ergebnisse der Photogrammetrischen Auswertung

In Abbildung 3.17 und Abbildung 3.18 ist eine Bildserie mit der Entwicklung der Risse abhängig von der auftretenden Belastung dargestellt. Bei einer Belastung von ca. 20 kN beginnen sich die ersten Biegezugrisse zu bilden. Mit zunehmender Belastung bildet sich ein verästelndes System aus Schubrisse aus. In der Zugzone der Träger ist zu erkennen, wie sich Dübelrisse entlang der Längsbewehrung ausbilden, welche sich bei steigender Belastung zunehmend verbinden. Nach der Vereinigung der Schubrisse in der Druckzone kommt es zum Versagen der Träger.

Die photogrammetrische Auswertung ermöglicht die flächige Bestimmung der Rissöffnungsweiten bei steigender Belastung über die gesamte Versuchsdauer hinweg. In Abbildung 3.19 ist die Rissöffnung des für das Versagen maßgebenden Schubrisse für Variante 1 und Variante 2 in Abhängigkeit der aufgetragenen Belastung dargestellt. Anhand der mittleren Rissöffnungsweiten zeigt sich, dass bei Variante 1 mit der eng gewickelten Bewehrung die Risse erst ab etwa 40 kN zu wachsen beginnen. Ab einer Belastung von ca. 55 kN beschleunigt sich dieses Risswachstum zunehmend bis zum Bruch des Trägers. Im Vergleich dazu zeigt sich bei der Trägervariante 2 mit der weitmaschigeren Bewehrungsführung, dass das Risswachstum früher einsetzt, bei ca. 20 kN. Ab etwa 40 kN an Belastung beschleunigt sich auch hier das Risswachstum merklich und steigert sich weiter bis zum Bruch.

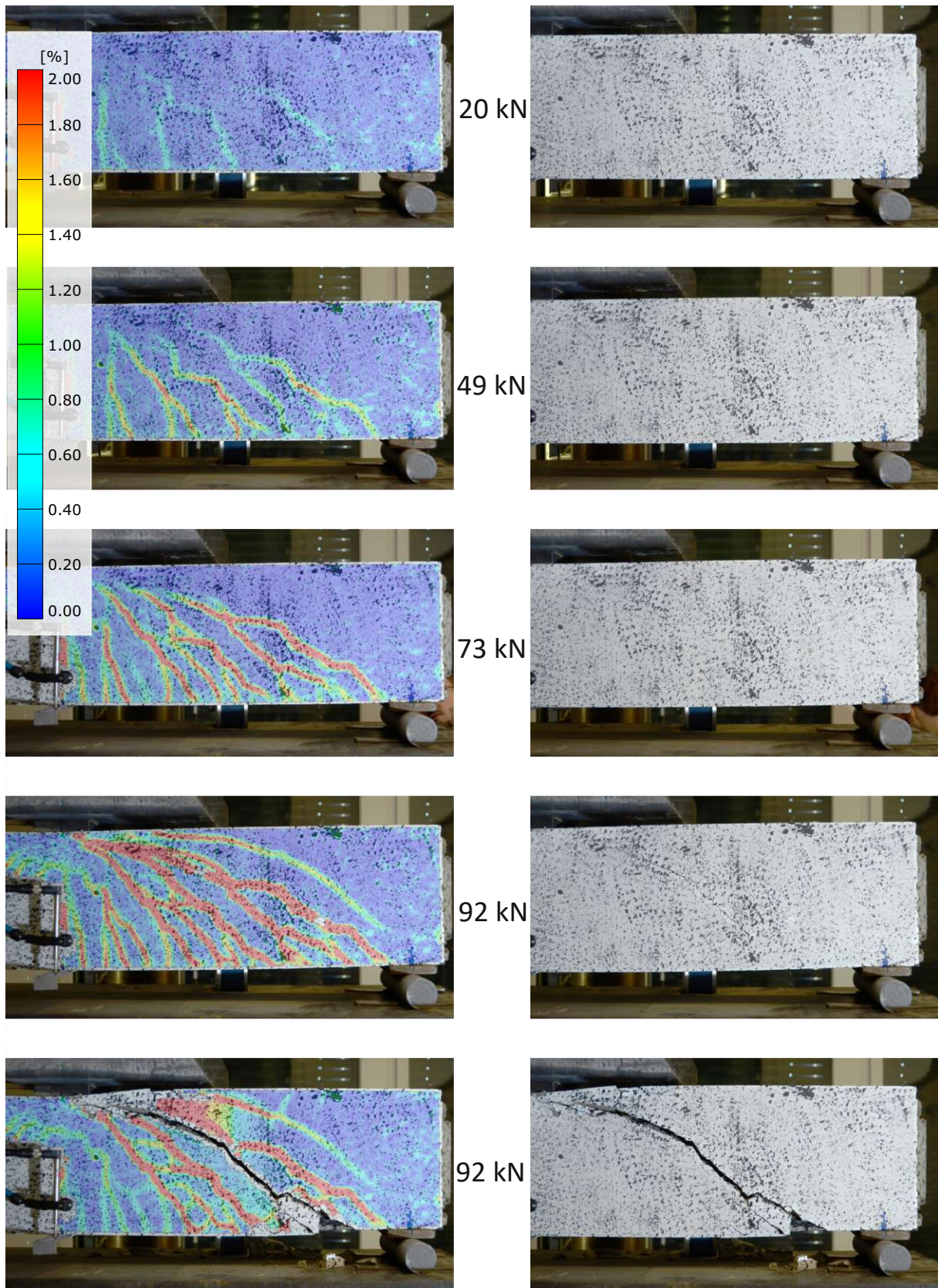


Abb. 3.17: Rissentwicklung Variante 1

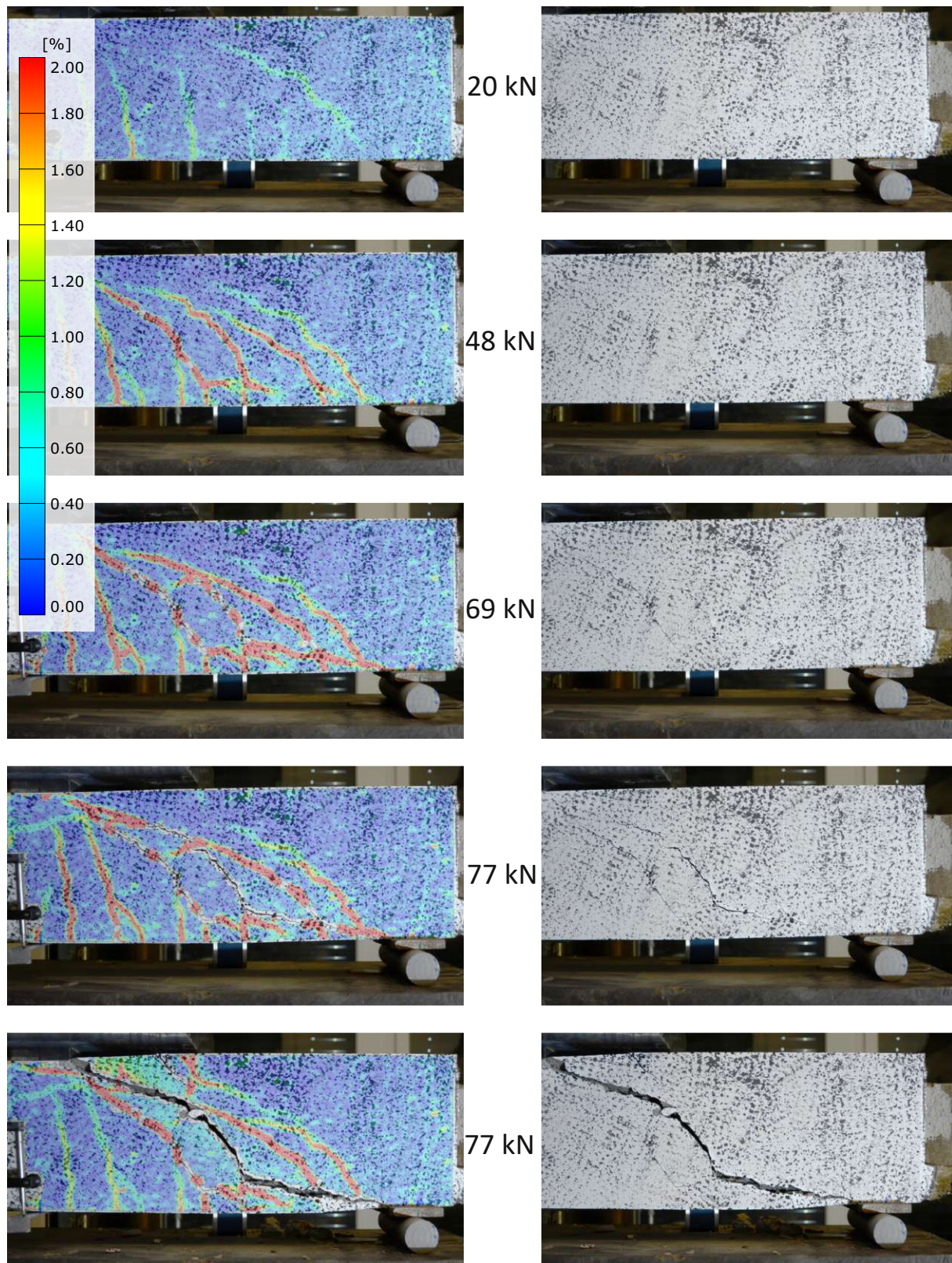


Abb. 3.18: Rissentwicklung Variante 2

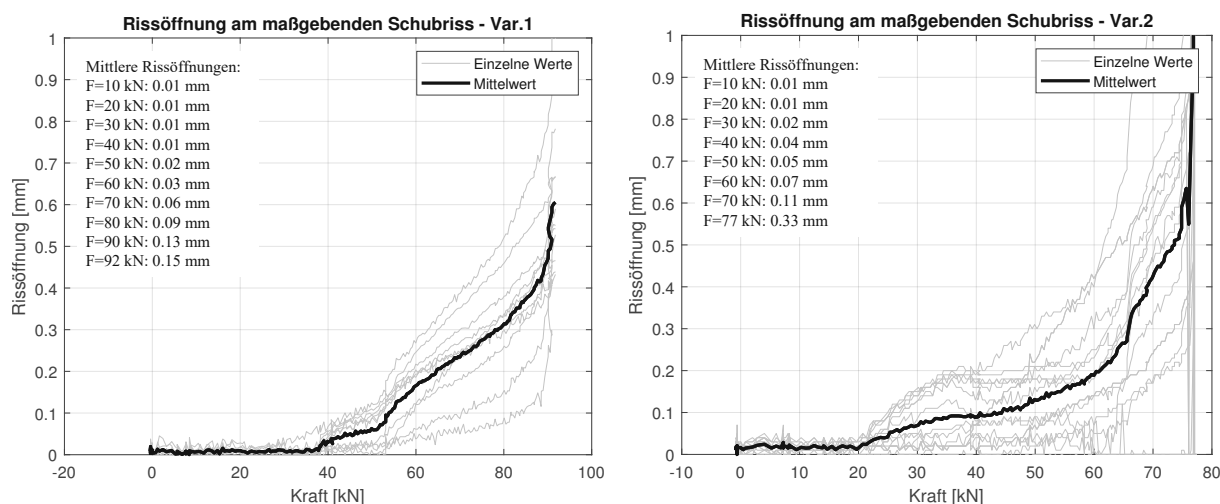


Abb. 3.19: Rissöffnung des maßgebenden Schubrisses beider Trägervarianten

Durch zusätzliche Verbundversuche könnte im Anschluss ein Verbundmodell für die Bewehrungsstränge erstellt werden. Mit Hilfe dieses Verbundmodells und einer Rissöffnungsauswertung an den Stellen, wo die Bewehrungsstränge den kritischen Schubriss kreuzen, könnte anhand der photogrammetrischen Datenauswertung die Spannung in den einzelnen Fasersträngen ermittelt werden. In der Arbeit von Preinstorfer et al. [86] wurde dies für die Auswertung von Versuchen an dünnwandigen, textilbewehrten Plattenbalken durchgeführt. In dieser Arbeit wird dieser Aspekt nicht weiter verfolgt, da zum Zeitpunkt der Bearbeitung noch keine Versuchsdaten zum Verbund vorlagen.

3.3.5 Vergleich der Simulation mit den Versuchsergebnissen

In Abbildung 3.20 ist ein Vergleich der Kraft/Verformungs-Beziehung für beide Trägervarianten, jeweils für die Ergebnisse der Versuchsdurchführung (blau) sowie die ATENA 2D Simulation (rot) ersichtlich. Es zeigt sich, dass mit Hilfe der Simulationssoftware eine gute Vorhersage der Bruchlast und Bruchverformung möglich ist. Wichtig sind in diesem Zusammenhang die Materialmodellmodifikationen von Herrn Červenka gewesen, um das Verhalten des hochfesten Betons korrekt simulieren zu können. Lediglich in der Systemsteifigkeit zeigen sich geringe Unterschiede zwischen der Simulation und dem realen Versuch. Durch genauere Materialstudien könnte hier unter Umständen noch ein exakteres Ergebnis erzielt werden. Grundsätzlich könnte nach dieser genauen Modellkalibrierung durch den Einsatz der Simulationssoftware auch ohne reale Versuchsdurchführungen eine treffende Aussage über das Bauteilverhalten für andere Konfigurationen getätigt werden. In Anhang B können der Vollständigkeit halber die teils erheblichen Unterschiede der Kraft-Verformungsbeziehungen aus der Berechnung mit den voreingestellten Materialmodelleinstellungen und den adaptierten Werten eingesehen werden.

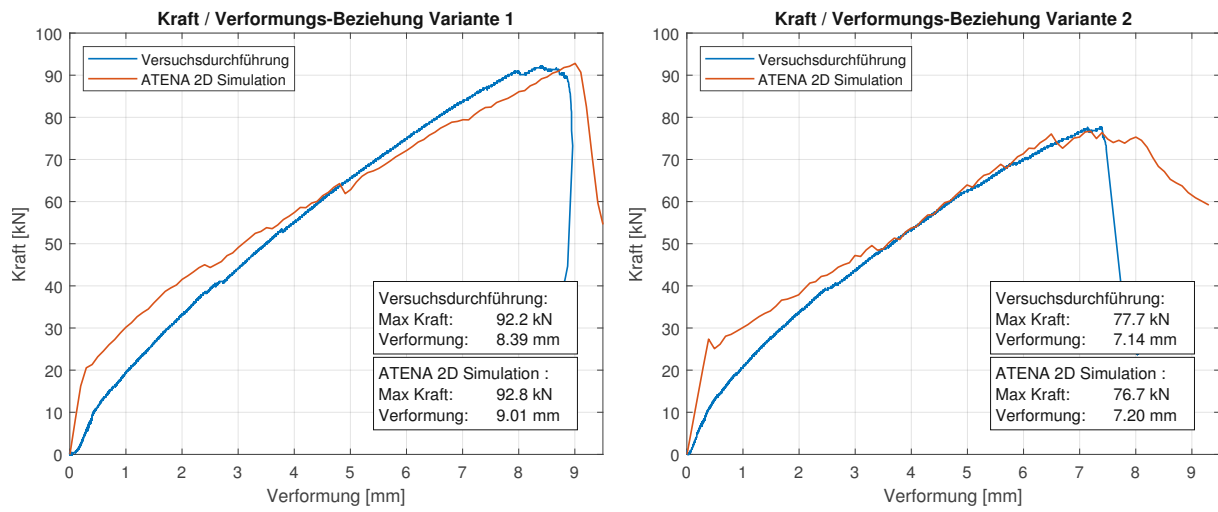


Abb. 3.20: Vergleich der Kraft-Verformungs-Beziehungen der Versuchsdurchführung mit jenen der Simulation.

Kapitel 4

Ausblick Einsatzmöglichkeiten

4.1 Stützenkonstruktion Flying Roof

Eine erste praktische Umsetzung von gewickelter Basaltbewehrung könnte sich im Rahmen des Projektes Flying Roof ergeben. Dabei handelt es sich um eine Überdachungskonstruktion, welche einen Witterungsschutz für Ladestationen von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen bieten soll. Eine Visualisierung des Konstruktionsentwurfes ist in Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2 dargestellt. Darin erkennbar ist eine Dachkonstruktion in Holzbauweise sowie fächerartig geformte Stützen. Diese Stützen sollen rein mit Bewehrungen aus Basalt hergestellt werden. Als Bewehrungskonzept bietet sich eine gewickelte Bewehrung um den konstanten Kreisquerschnitt im Stützeninneren an, welche durch radial angeordnete Längsbewehrungsstangen in Position gehalten wird. Die fächerförmige Oberflächenstruktur kann durch ein Einarbeiten von gekanteten zweidimensionalen Basalttextilien in die spindelartige Wicklung realisiert werden.



Abb. 4.1: Visualisierung der geplanten Konstruktion, © Basalt+.



Abb. 4.2: Visualisierung der geplanten Konstruktion, © Basalt+.

4.2 Biegebemessung

Bei der Bemessung kann aufgrund der nicht vorhandenen Duktilität der FVK-Produkte nicht direkt ein Kräftegleichgewicht hergestellt werden. Es ist eine iterative Berechnung nötig, da die Dehnung der Bewehrung anders als im Stahlbetonbau nicht von vorneherein festgelegt ist. Zunächst wird die Betonstauchung ε_c und die Bewehrungsdehnung ε_t im ersten Iterationsschritt geschätzt. Anschließend werden mithilfe der Materialgesetze die zugehörigen Materialspannungen σ_c und σ_t errechnet. Durch Integration der Spannungen können die resultierende Betondruckzonenkraft F_c und die Textilzugkraft F_t bestimmt werden. Vorausgesetzt, die beiden Kräfte stehen im Gleichgewicht, kann über den inneren Hebelarm z das aufnehmbare Biegemoment M_{Rd} berechnet werden. Falls $F_c \neq F_t$ gilt, muss ein neuer Iterationsschritt mit angepasster Dehnung begonnen werden.

Bei der iterativen Bemessung wird im ersten Schritt angenommen, dass die textile Bewehrung vollständig ausgenutzt wird, sodass die Bemessungsspannung f_{td} und die Bemessungsdehnung ε_{td} erreicht werden. Die Betonstauchung wird daraufhin so lange angepasst, bis ein Gleichgewicht der Kräfte $F_{td} = F_c$ oder der Biegemomente $M_{Ed} = M_{Rd}$ erreicht wird (Abbildung 4.3). Anschließend kann die erforderliche Bewehrung A_t ermittelt werden. Falls kein Gleichgewicht gefunden werden kann, ist die Annahme, dass die Textilzugspannung voll ausgenutzt wird falsch. Die Betondruckfestigkeit wird maßgebend und erreicht ihren maximal zulässigen Wert f_{cd} . In diesem Fall wird bei der Iteration der Dehnungsebene die Bruchdehnung des Betons ε_{cu} angenommen, und die Textildehnung ε_t wird so lange variiert, bis erneut ein Gleichgewicht der Kräfte oder der Momente gefunden wird (Abbildung 4.3). Anschließend kann die erforderliche Bewehrung A_t ermittelt werden [7].

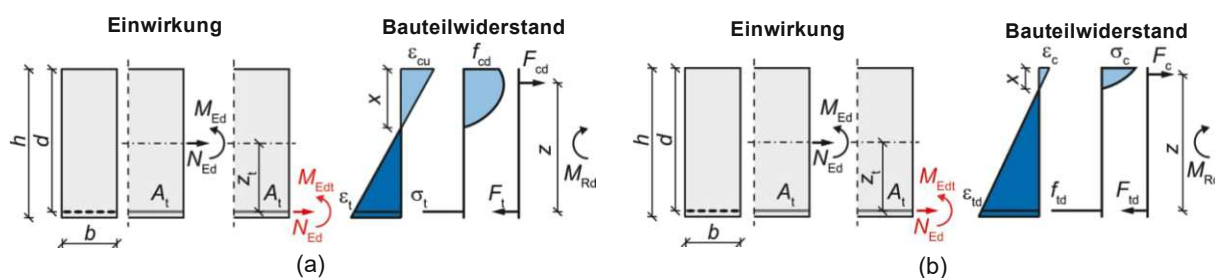


Abb. 4.3: a) Versagen der Textilbewehrung und b) Versagen der Betondruckzone, entnommen aus [7].

Für die Vordimensionierung der gezeigten Stützenkonstruktion kann die Bemessungssoftware INCA2¹ herangezogen werden. Durch das Erstellen von eigenen Materialmodellen können auch die Eigenschaften der Basaltbewehrung korrekt abgebildet werden. In Abbildung 4.4 sind die errechneten Spannungsverhältnisse der Stütze in repräsentativen Querschnitten visualisiert. Weitere Ergebnisdarstellungen sowie die Berechnung anderer Lastfälle sind in Anhang C ersichtlich.

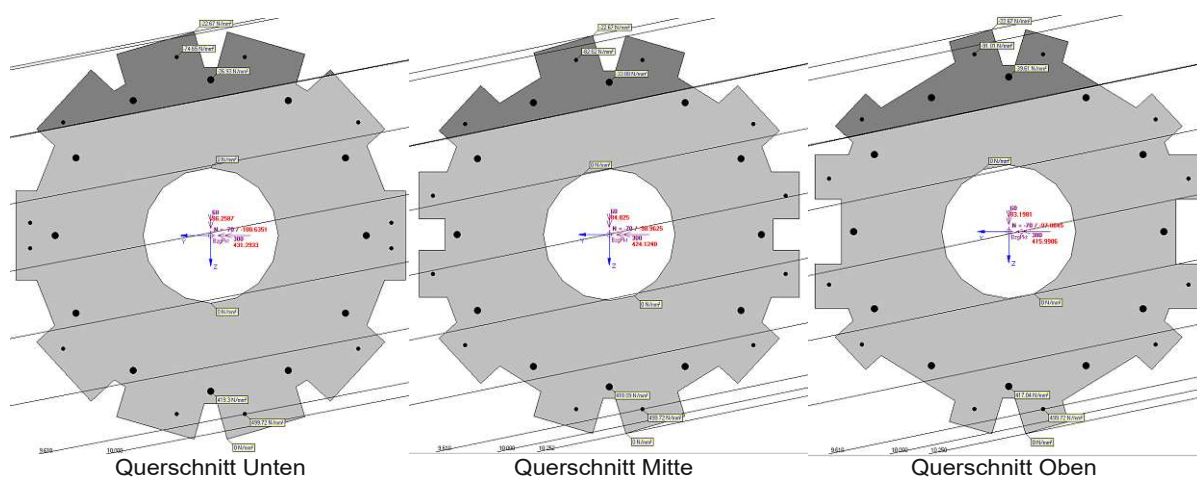


Abb. 4.4: Vorbemessung auf Querschnittsniveau mit INCA2.

Ausgehend von den Regeln für den Stahlbetonbau wird in Abbildung 4.5 über den Querkraftbewehrungsgrad eine Ganghöhe der Wicklung abgeschätzt. Ein mögliches Bewehrungskonzept ist in Abbildung 4.6 visualisiert. Eine spannende Herausforderung stellt die Detailkonzeptionierung zwischen dem Anschluss der Holzkonstruktion mit der Stütze sowie zwischen der Stütze und der Fundamentierung dar. Eine Lösung dieser Details wird ohne der ergänzenden Verwendung von Stahlbauteilen nur sehr schwer realisierbar sein. Um Material einzusparen, könnte in einer Detailbemessung untersucht werden, ob der Hohlkörper in der Mitte der Stütze noch vergrößert werden kann.

¹Das Programm INCA2 dient der interaktiven Berechnung beliebig zusammengesetzter Massivbauquerschnitte unter zweiachsiger Biegung mit Längskraft[87].

Berechnung der Wickelhöhe der Basaltbewehrung:

Bewehrungswahl bei Querkraftbewehrung aus Stahl:

$$b_w := 0.70 \text{ m} \quad d := 10 \text{ mm} \quad A_{bw.STB} := d^2 \frac{\pi}{4} = 0.785 \text{ cm}^2 \quad s_{gew.STB} := 20 \text{ cm}$$

$$A_{w.STB} := \frac{2 \cdot A_{bw.STB} \cdot 1 \text{ m}}{s_{gew.STB}} = 7.854 \text{ cm}^2 \quad \rho_{w.STB} := \frac{A_{w.STB}}{s_{gew.STB} \cdot b_w} = 0.006$$

Ausgehend von diesem Bewehrungsgrad wird nun die Ganghöhe für die gewickelte textile Bewehrung unter Berücksichtigung der Bemessungsfestigkeiten abgeschätzt:

Betonstahl B550:

$$f_{yk} := 550 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \gamma_{M.S} := 1.15$$

Basaltbewehrung 9600 tex UD:

$$f_{nmk} := 2350 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \alpha_{nmk} := 0.53 \dots \text{ nach Kap. 2.5.2}$$

$$\gamma_{M.tex} := 1.3$$

$$f_{ub} := \frac{f_{yk}}{\gamma_{M.S}} = 478.261 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$f_{nm.d} := f_{nmk} \cdot \frac{\alpha_{nmk}}{\gamma_{M.tex}} = 958.077 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Wickelhöhe:

$$b_w := 0.70 \text{ m} \quad A_{tex} := 4 \cdot 0.9 \text{ mm}^2 = 0.036 \text{ cm}^2 \quad s_{gew} := 6.06 \text{ cm}$$

$$A_{nmw} := 2 \cdot A_{tex} \cdot \frac{1 \text{ m}}{s_{gew}} = 1.188 \text{ cm}^2 \quad s_{tex} := \frac{A_{nmw} \cdot f_{nm.d}}{\rho_{w.STB} \cdot f_{ub} \cdot b_w} = 6.06 \text{ cm}$$

Mindestquerkraftbewehrungsgrad nach DafStb 9.2.2 (R9.2)

Beton C40/50

Basaltbewehrung 9600 tex UD:

$$f_{ctm} := 3.5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad f_{nmk} := 2350 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad E_{nmk} := 55000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \alpha_{nmk} := 0.53$$

Berechnung Wickelhöhe:

$$\rho_{w.min} := \frac{0.16 \cdot f_{ctm}}{\alpha_{nmk} \cdot f_{nmk}} = 0.0004 \quad \leq \quad \rho_1 := \frac{0.16 \cdot f_{ctm}}{0.007 \cdot E_{nmk}} = 0.001$$

$$b_w := 0.70 \text{ m} \quad A_{tex} := 4 \cdot 0.9 \text{ mm}^2 = 0.036 \text{ cm}^2 \quad s_{gew.1} := 15.125 \text{ cm}$$

$$A_{nmw} := 2 \cdot A_{tex} \cdot \frac{1 \text{ m}}{s_{gew.1}} = 0.476 \text{ cm}^2 \quad s_{min} := \frac{A_{nmw}}{\rho_{w.min} \cdot b_w} = 15.125 \text{ cm}$$

$$\text{gewählte Wickelhöhe: } s := 6 \text{ cm} \leq s_{tex} = 6.061 \text{ cm} \leq s_{min} = 15.125 \text{ cm} \quad \checkmark$$

Wicklung mit Wickelhöhe von 6cm mit je einem 9600 tex UD Roving rechtsdrehend und einem Roving linksdrehend in kreuzweiser Anordnung.

Abb. 4.5: Abschätzung der Ganghöhe für die gewickelte Bewehrung.

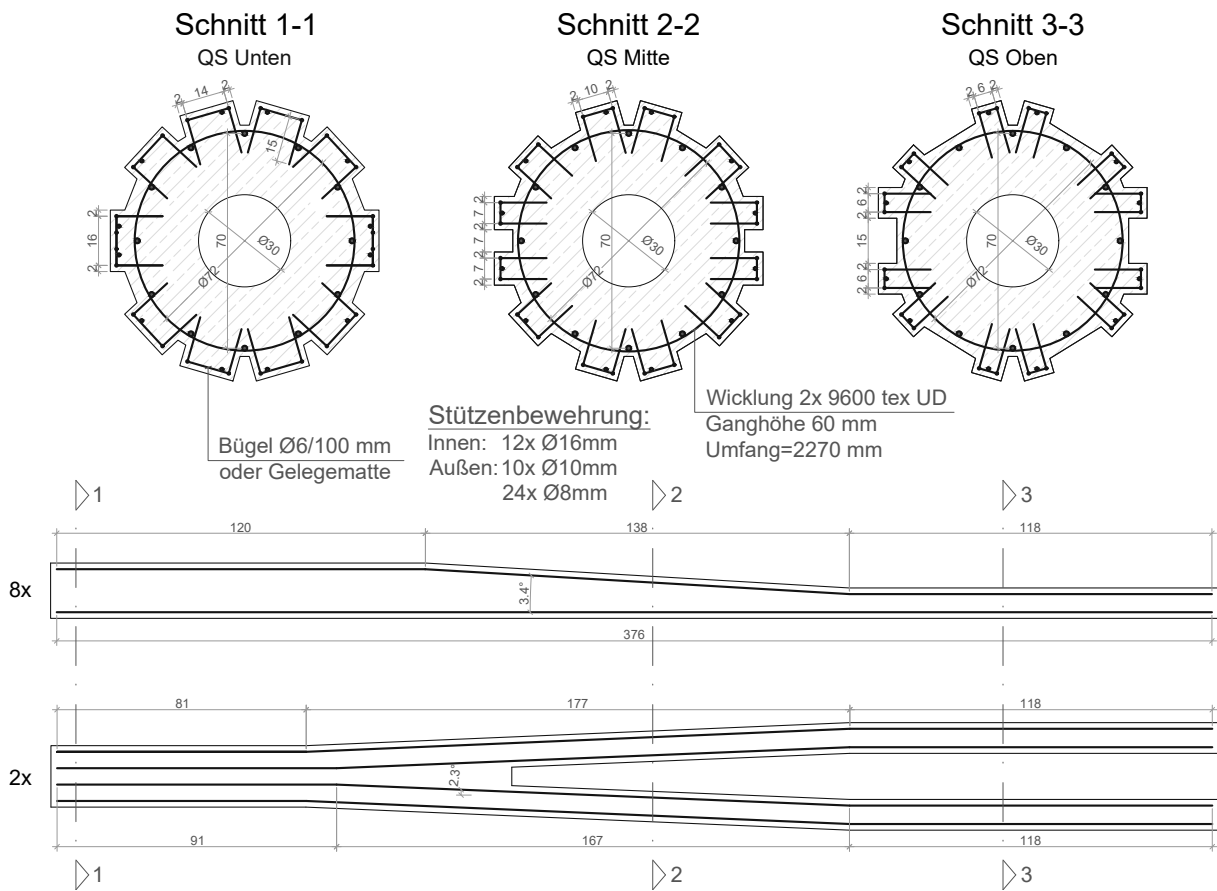


Abb. 4.6: Bewehrungskonzept

Kapitel 5

Zusammenfassung und Ausblick

Textilbewehrung stellt eine vielversprechende Entwicklung in der Bauindustrie dar, welche den konventionellen Stahlbetonbau sinnvoll ergänzen kann. Die Hochleistungsfasern aus z.B. Carbon-, AR-Glas oder Basaltfasern werden in eine Kunststoffmatrix eingebettet und sind beständiger gegenüber Korrosion. Sie besitzen hohe Zugfestigkeiten und haben materialabhängig weitere vorteilhafte Eigenschaften, welche man sich je nach Anwendungsfall zunutze machen kann. Bei der Bemessung ist zu beachten, dass nichtmetallische Bewehrungen kein duktiler Verhalten ausweisen, sondern spröde versagen. Internationale Regelwerke zum Einsatz nichtmetallischer Faserverbundkunststoffe als Bewehrung im Betonbau weisen eine unterschiedliche Aktualität und Herangehensweise an das Thema auf. Besonders die Verwendung von FVK-Produkten zur Herstellung von aufgelösten geometrischen Formen bietet ein großes Potential hinsichtlich ressourceneffizienter Materialverwendung bereits im Tragwerksentwurf.

Kapitel 2 zeigt an ausgewählten historischen Bauwerken den damaligen Umgang mit aufgelösten Geometrien und veranschaulicht, wie durch den Einsatz nichtmetallischer Bewehrungen aufgetretene Schadensfälle verhindert werden könnten. Es werden die unterschiedlichen Ausgangsmaterialien für die Herstellung von Bauteilen mit Bewehrungen aus Faserverbundkunststoffen erläutert und die Materialeigenschaften der Produkte verglichen. Anhand von ausgewählten Anwendungsbeispielen im Bereich der Sanierung, aber auch des Neubaus wird der erweiterte Gestaltungsspielraum, welcher durch nichtmetallische Bewehrungen ermöglicht wird, aufgezeigt. Das breite Anwendungsspektrum der Materialien erstreckt sich von Erhaltung und Ertüchtigung von Bestandstragwerken, über Hoch- und Brückenbauanwendungen bis hin zu geotechnischen Lösungen im Tunnelbau. Der Vergleich der unterschiedlichen Regelwerke vor allem auch im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit der Materialien zeigt, dass trotz der bereits geleisteten Forschungsarbeit der letzten Jahre noch etliche Aspekte weiterer und vor allem langzeitlicher Untersuchungen bedürfen.

Für die Ermittlung der Zugfestigkeit von faserbasierten Bewehrungsprodukten sind anspruchsvollere Versuchsdurchführungen wie im Vergleich zu Bewehrungsstahlprüfungen erforderlich. Aufgrund der geringen Querdruckfestigkeit der Materialien ist es besonders wichtig, bei der Versuchsdurchführung sicherzustellen, dass die Proben so verankert werden, dass die Produkte ihre volle Zugfestigkeit entfalten können. In Kapitel 3 wird dies durch die Verwendung von mit UHPC-gefüllten Stahlrohren erreicht, unterschiedliche Bewehrungsprodukte aus Basaltfasern bis zum Bruch getestet und die Versuchsergebnisse interpretiert.

Anhand von dünnwandigen Hohlkastenträgern werden in Kapitel 3 die Einsatzmöglichkeiten einer gewickelten Bewehrungsapplikation aus Basaltfasern untersucht. Es zeigt sich, dass die Verwendung einer gewickelten Bewehrung prinzipiell für die Übernahme der Schubkräfte möglich ist und viel Gestaltungsspielraum für eine nach den Spannungstrajektorien ausgerichteten Bewehrungsanordnung bietet. Beim Vergleich zwischen den beiden untersuchten Trägervarianten wird erkennbar, dass durch eine engmaschigere Wicklungsanordnung die Tragfähigkeit des Versuchsbauteils gesteigert

gert werden kann. Die Trägervariante mit weiter gestuften Abständen und variierenden Winkeln der Bewehrungsstränge konnte in der Prüfung zwar nur ca. 84% der Belastung aus Variante 1 aufnehmen, verwendet gleichzeitig jedoch nur etwa 33% der Bewehrungsmenge aus Variante 1. Bei der gewickelten Bewehrungsanordnung ist aufgrund der anisotropen Materialeigenschaften der FVK-Produkte eine reduzierte aufnehmbare Bruchspannung in den Eckbereichen wegen der Umlenkeffekte zu beachten. Eine Simulation mit kommerziellen Softwarelösungen wie ATENA 2D kann nach richtiger Kalibrierung der Materialmodelle aussagekräftige Ergebnisse erzeugen und für weitere Fragestellungen hilfreiche Antworten liefern.

Der Einsatz von Hochleistungswerkstoffen könnte einen Wandel von massiven Bauteilen mit hohem Ressourcenverbrauch hin zu effizienten Bauteilen, die optimal dem Kraftfluss folgen, bewirken. Insbesondere im Zusammenhang mit der Korrosionsbeständigkeit eröffnet der Einsatz nichtmetallischer Bewehrungen großes Potenzial für eine materialeffiziente, filigrane Formensprache, die bereits von Nervi und Maillart in ihren Werken genutzt wurde. Im Rahmen ganzheitlicher Baukonzepte, die die Ressourcennutzung und Kosten über den gesamten Lebenszyklus von Bauwerken berücksichtigen, könnten Bauteile mit nichtmetallischer Bewehrung zukünftig eine größere Rolle spielen und ihr Potential voll ausnutzen. Zudem könnte durch den Einsatz von automatisierten und robotergestützten Fertigungstechniken in Zukunft eine effiziente und maßgeschneiderte Bewehrungsführung für diverse Anwendungsfälle in Form der Wickeltechnik geschaffen werden. Die bereits in Planung befindlichen Anwendungen der untersuchten Wickeltechnik zeigen, dass auch neue Fertigungstechniken relativ schnell in der Praxis implementiert werden können und nährt die Hoffnung auf weitere neue Anwendungsgebiete.

Literatur

- [1] P. J. M. Monteiro, S. A. Miller und A. Horvath. „Towards sustainable concrete“. In: *Nature Mater* 16 (2017), S. 698–699.
- [2] U. N. E. P. (2022). *2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*. Forschungsber. United Nations Environment Programme, 2022. 101 S.
- [3] S. Thaler. *Baustein Forschung*. 2022. URL: <https://science.apa.at/thema/baustein-forschung/> (Zugriff am 04.10.2023).
- [4] L. Barcelo, J. Kline, G. Walenta und E. Gartner. „Cement and carbon emissions“. In: *Materials and Structures* 47 (2014), S. 1055–1065. DOI: 10.1617/s11527-013-0114-5.
- [5] M. Curbach, J. Hegger, F. Schladitz, M. Tietze und M. Lieboldt. *Handbuch Carbonbeton - Einsatz nichtmetallischer Bewehrung*. Berlin: Ernst Sohn GmbH, 2023. ISBN: 978-3-433-03206-0.
- [6] L. Krug. „Untersuchungen zum Einsatzpotential nichtmetallischer Bewehrungen im Betonbau“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2020.
- [7] S. Rempel, M. Ricker und J. Hegger. „Biegebemessungsmodell mit einer geschlossenen und iterativen Lösung für Textilbetonbauteile“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 115 (2020), S. 218–230. DOI: 10.1002/best.201900086.
- [8] W. Ramm. „Über die Anfänge des Eisenbetonbaus in Deutschland und die Pioniere der ersten Jahre“. In: *Beton- und Stahlbetonbau Volume 107, Issue 5* 107 (2012), S. 335–356.
- [9] M. Lieboldt. „Einführung zum Carbonbeton“. In: *Beton- und Stahlbetonbau 118, Sonderheft CUBE Das Carbonbetongebäude S2, April 2023* 118 (2023), S. 7–10. DOI: 10.1002/best.202100100.
- [10] W. Mann. *Vorlesungen über Statik und Festigkeitslehre: Einführung in die Tragwerkslehre*. Leipzig: Teubner Verlag, 1997.
- [11] M. Demanega. *Bauingenieurwesen und Ästhetik*. 2020. URL: <https://demanega.com/2020/07/15/bauingenieurwesen-und-asthetik/> (Zugriff am 09.02.2024).
- [12] Rama. *Foto Salginatobelbrücke CC BY-SA 2.0 fr*. 2020. URL: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4794719> (Zugriff am 09.02.2024).
- [13] Rama. *Foto Salginatobelbrücke CC BY-SA 2.0 fr*. 2015. URL: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4794369> (Zugriff am 09.02.2024).
- [14] M. Demanega. *Herausragende Persönlichkeiten: Pier Luigi Nervi*. 2021. URL: <https://demanega.com/2021/10/18/herausragende-persoenlichkeiten-pier-luigi-nervi/> (Zugriff am 09.02.2024).
- [15] T. Leslie. *Beauty's rigor patterns of production in the work of Pier Luigi Nervi*. Urbana: University of Illinois Press, 2017. DOI: 10.5406/j.ctt1vw0s2n.1.
- [16] J. p. Osman-Letelier, A. Hückler und M. Schlaich. „Dünnwandige Fertigteile aus vorgespanntem Carbonbeton“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 116 (2021), S. 786–797. DOI: 10.1002/best.202100019.

- [17] S. L. Burtscher. *Faserverbundwerkstoffe – Betonbau 3 Vorlesung*. Wien: Technische Versuchs- und Forschungsanstalt GmbH der Technischen Universität Wien, 2013.
- [18] M. A. Belaunde Vargas. „Materialeffizientes Konstruieren – Trajektorienbewehrung und Vorspannung bei Bauteilen aus textilbewehrtem Ultrahochleistungsbeton“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2017.
- [19] E. Lorenz. „Endverankerung und Übergreifung textiler Bewehrungen in Betonmatrices“. Dissertation. Technischen Universität Dresden, 2014.
- [20] M. Curbach und F. Jesse. „Eigenschaften und Anwendung von Textilbeton“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 104 (2009), S. 9–16. DOI: 10.1002/best.200800653.
- [21] S. Reichenbach, P. Preinstorfer, M. Hammerl und B. Kromoser. „A review on embedded fibre-reinforced polymer reinforcement in structural concrete in Europe“. In: *Construction and Building Materials* 307 (2021). DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124946.
- [22] *DIN 6905-1:1985 12: Tex-System Grundlagen*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Dez. 1985.
- [23] M. Kirsten, C. Freudenberg und C. Cherif. „Carbonfasern, der Werkstoff des 21. Jahrhunderts“. In: *Beton- und Stahlbetonbau Spezial 2015 – Verstärken mit Textilbeton* 110 (2015), S. 8–15. DOI: 10.1002/best.201400105.
- [24] V. ASTRA, D. Papastergiou, W. Waldis, C. Czaderski, N. Moshiri und R. Hischier. *Sachstandsbericht: Dokumentation Basaltfaserbewehrung*. 1. Aufl. Bern: Bundesamt für Strassen ASTRA, 2020. URL: <http://www.astra.admin.ch/standards>.
- [25] J. Sim, C. Park und D. Y. Moon. „Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures“. In: *Composites Part B: Engineering* 36 (2015), S. 504–512. DOI: 10.1016/j.compositesb.2005.02.002.
- [26] R. Sen, M. Shahawy, J. Rosas und S. Sukumar. „Durability of Aramid Pretensioned Elements in a Marine Environment“. In: *Structural Journal* 95 (2005), S. 578–587. DOI: 10.14359/572.
- [27] R. Teschner. *Glasfasern*. 3. Aufl. Berlin: Springer-Verlag GmbH, 2021. ISBN: 978-3-662-64122-4.
- [28] F. Knab, A. Weber und J. Schweinfurth. „Sicherer Einsatz von Glasfaserbewehrung im Bauwesen“. In: *Beton- und Stahlbetonbau Spezial 2015 – Verstärken mit Textilbeton* 110 (2015), S. 822–831. DOI: 10.1002/best.201500060.
- [29] A. Nanni, A. De Luca und H. J. Zadeh. *Reinforced Concrete with FRP Bars Mechanics and Design*. 1. Aufl. Boca Raton: CRC Press Taylor Francis Group, 2014. ISBN: 978-0-203-87429-5.
- [30] J. Grotzinger und T. Jordan. *Press/Siever Allgemeine Geologie*. 7. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. ISBN: 978-3-662-48342-8.
- [31] T. McCann und M. V. Manchego. *Geologie im Gelände - Das Outdoor-Handbuch*. 1. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2015. ISBN: 978-3-8274-2383-2.
- [32] J. Liu. „Untersuchung von Verbundwerkstoffen mit Basalt- und PBO-Faser-Verstärkung“. Dissertation. Technischen Universität Dresden, 2008.
- [33] C. Cherif. *Textile Werkstoffe für den Leichtbau*. Berlin: Springer-Verlag GmbH, 2011. ISBN: 978-3-642-17991-4.

- [34] R. Balendran, T. Rana, T. Maqsood und W. Tang. „Application of FRP bars as reinforcement in civil engineering structures“. In: *Structural Survey* 20 (2002). DOI: 10.1108/02630800210433837.
- [35] P. Preinstorfer. *Zur Spaltrissbildung von textilbewehrtem Beton*. 1. Aufl. TU Wien: TU Wien Academic, 2020. ISBN: 978-3-85448-034-1.
- [36] F. Micelli und A. Nanni. „Durability of FRP rods for concrete structures“. In: *Construction and Building Materials* 18 (2004), S. 491–503. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2004.04.012.
- [37] M. Barisic. „Untersuchungen zum Einsatz von nichtmetallischen Bewehrungen im Infrastrukturbau“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2021.
- [38] M. Schlaich, B. Zwingmann, L. Yue und R. Goller. „Zugelemente aus CFK und ihre Verankerungen“. In: *Bautechnik* 89 (2012), S. 841–850. DOI: 10.1002/bate.201200057.
- [39] *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars*. USA: American Concrete Institute, März 2015.
- [40] A. Schumann, M. May, F. Schladitz, S. Scheerer und M. Curbach. „Carbonstäbe im Bauwesen Teil 2: Verbundverhalten – Verbundversuche an unterschiedlichen Carbonstäben“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 115 (2020). DOI: 10.1002/best.202000047.
- [41] L. Hahn, S. Ritter, 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“. In: (2019). DOI: 10.5604/01.3001.0012.7508.
- [42] P. Preinstorfer, B. Kromoser und J. Kollegger. „Kategorisierung des Verbundverhaltens von Textilbeton“. In: *Bauingenieur* 94 (2019), S. 416–424. DOI: 10.500.12708/143206.
- [43] M. Neitzel und P. Mitschang. *Handbuch der Verbundwerkstoffe*. München: Carl Hanser Verlag GmbH Co, 2014.
- [44] M. Lieboldt. „Feinbetonmatrix für Textilbeton“. In: *Beton- und Stahlbetonbau Spezial 2015* (2015), S. 22–28. DOI: 10.1002/best.201400100.
- [45] K. Schneider, M. Butler und V. Mechtcherine. „Carbon Concrete Composites C3 – Nachhaltige Bindemittel und Betone für die Zukunft“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 112 (2017), S. 784–794. DOI: 10.1002/best.201700058.
- [46] A. Kahnt, F. Schladitz, M. Tietze, M. Lieboldt und M. Curbach. „C3-carbonbeton—Eine Materialkombination für die Zukunft des Bauens“. In: *BWI BetonWerk Int* 6 (2016), S. 22–28.
- [47] A. Ahmed, S. Guo, Z. Zhang, C. Shi und D. Zhu. „A review on durability of fiber reinforced polymer (FRP) bars reinforced seawater sea sand concrete“. In: *Construction and Building Materials* 256 (2020). DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119484.
- [48] U. Ebead, D. Lau, F. Lollini, A. Nanni, P. Suraneni und T. Yu. „A review of recent advances in the science and technology of seawater-mixed concrete“. In: *Cement and concrete research* 152 (2022). DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106666.
- [49] B. Benmokrane, V. Brown, K. Mohamed, A. Nanni und M. Rossini. „Creep-Rupture Limit for GFRP Bars Subjected to Sustained Loads“. In: (2019). DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000971.
- [50] A. F. Al-Khafaji, J. J. Myers und A. Nanni. „Assessment Study of Glass Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement Used in Two Concrete Bridges after More than 15 Years of Service“. In: *209ACI Materials Journal/September 2020ACI MATERIALS JOURNAL* 117-M99 (2020), S. 209–220. DOI: 10.14359/51725980.

- [51] P. Grasl. „Lebenszykluskostenanalyse von Infrastrukturbauwerken aus Textilbeton“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2024.
- [52] *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Austrian Standards Institute, Feb. 2015.
- [53] M. Lieboldt. „Einführung zum Carbonbeton“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 107 107 (2012), S. 777–785. DOI: DOI:10.1002/best.201200034.
- [54] F. Schladitz, E. Lorenz, F. Jesse und M. Curbach. „Verstärkung einer denkmalgeschützten Tonnenschale mit Textilbeton“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 104.7 (2009), S. 432–437. DOI: 10.1002/best.200908241.
- [55] S. Weiland, F. Schladitz, E. Schütze, R. Timmers und M. Curbach. „Rissinstandsetzung eines Zuckersilos: TUDALIT®(Textilbeton) zur Instandsetzung“. In: *Bautechnik* 90.8 (2013), S. 498–504. DOI: 10.1002/bate.201300046.
- [56] A. Al-Jamous. „Instandsetzung der historischen Betonbogenbrücke in Naila“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 112.9 (2017), S. 623–628. DOI: 10.1002/best.201700048.
- [57] E. Erhard, S. Weiland, E. Lorenz, F. Schladitz, B. Beckmann und M. Curbach. „Anwendungsbeispiele für Textilbetonverstärkung“. In: *Beton- und Stahlbetonbau Spezial 2015* (2015), S. 74–82. DOI: 10.1002/best.201400124.
- [58] C. Vodrazka. „Bauwerksverstärkung mit geklebter Kohlefaserbewehrung“. In: *Vorlesung: Erhaltung und Ertüchtigung von Betontragwerken*, TU Wien (2023).
- [59] B. Kromoser, P. Preinstorfer und J. Kollegger. „Building lightweight structures with carbon-fiber-reinforced polymer-reinforced ultra-high-performance concrete: Research approach, construction materials, and conceptual design of three building components“. In: *Structural Concrete* 20.2 (2019), S. 730–744. DOI: 10.1002/suco.201700225.
- [60] A. C. Von der Heid und R. Grebe. „Perforierte und vollflächige Fassadenplatten aus carbonbewehrtem Beton“. In: *Bauingenieur* 95 (2020), S. 210–219.
- [61] H. M. GmbH. *betoshell®CLASSIC-Elemente*. 2024. URL: <https://www.heringinternational.com/de/produkte-leistungen/architekturbeton-fassaden-hac/fassadensysteme/textilbeton-betoshellr/classic/#lg=1&slide=2> (Zugriff am 09.02.2024).
- [62] M. Curbach, W. Graf, D. Jesse, J.-U. Sickert und S. Weiland. „Segmentbrücke aus textilbewehrtem Beton“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 102 102 (2007), S. 342–352. DOI: 10.1002/best.200700550.
- [63] J. Hegger, C. Goralski und C. Kulas. „Schlanke Fußgängerbrücke aus Textilbeton“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2011), S. 64–71. DOI: 10.1002/best.201000081.
- [64] T. Helbig, K. Unterer, C. Kulas, S. Rempel und J. Hegger. „Fuß- und Radwegbrücke aus Carbonbeton in Albstadt-Ebingen“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 111 (2016), S. 676–685. DOI: 10.1002/best.201600058.
- [65] A. Scholzen, R. Chudoba und J. Hegger. „Dünnwandiges Schalentragerwerk aus textilbewehrtem Beton“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 107 (2012), S. 767–776. DOI: 10.1002/best.201200044.
- [66] A. Scholzen, R. Chudoba und J. Hegger. „Thin-walled shell structures made of textile-reinforced concrete“. In: *Structural Concrete* 16 (2015), S. 106–114. DOI: 10.1002/suco.201300071.

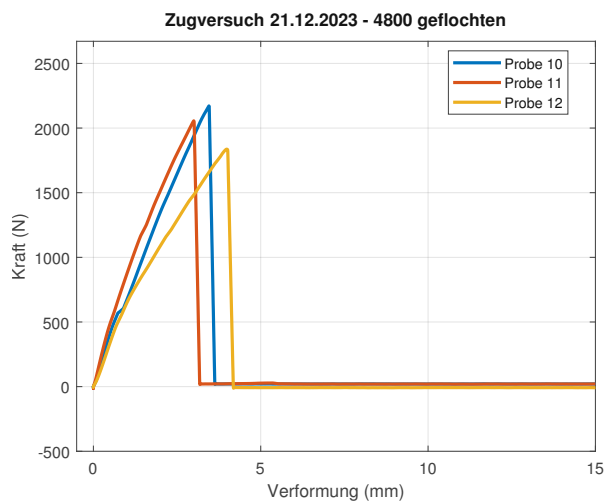
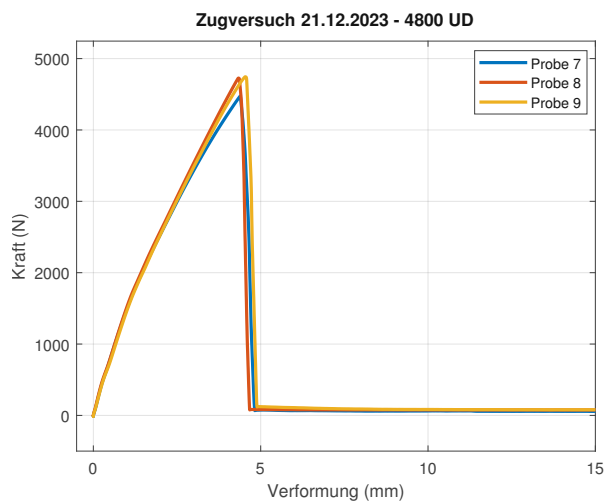
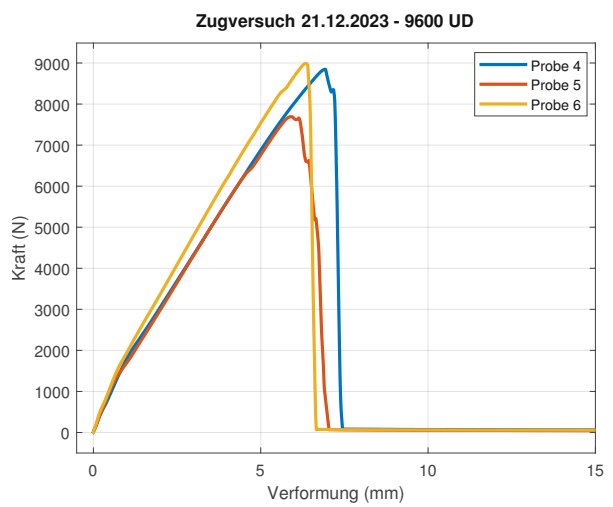
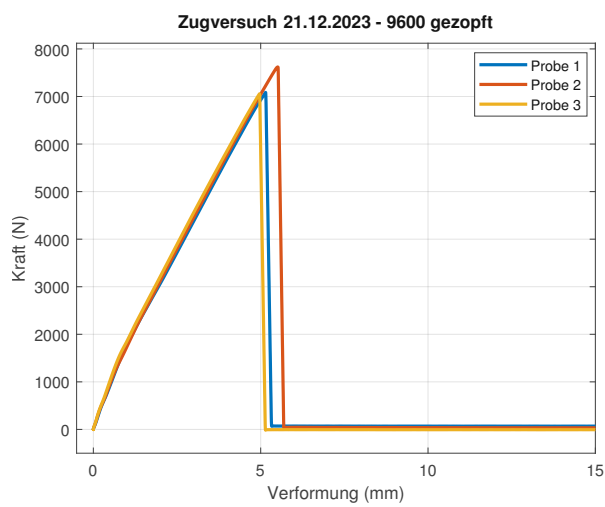
- [67] H. Mohamed, A. Ali, A. Hadhood, S. Mousa, W. Abdelazim und B. Benmokrane. „Testing, design, and field implementation of GFRP RC soft-eyes for tunnel construction“. In: *Tunnelling and Underground Space Technology* 106 (2020). DOI: 10.1016/j.tust.2020.103626.
- [68] H. B. G. C. KG. „Modular einsetzbares Bahnsteigsystem – modula flex von Hering-Bau ermöglicht wirtschaftliche Sanierungen“. In: *TUDALIT* 18 (2018). URL: <http://tudalit.de/wp-content/uploads/2018/02/TUDALIT-Heft18.pdf> (Zugriff am 10.02.2024).
- [69] A. Apitz. „Vorgespannter Carbonbeton im Brückenbau - Beitrag zum werkstoffgerechten Entwerfen und Bemessen“. Dissertation. Technischen Universität Berlin, 2020.
- [70] *DESIGN GUIDELINES OF FRP REINFORCED CONCRETE BUILDING STRUCTURES*. Japan Society of Civil Engineers. (JSCE), Dez. 1997.
- [71] *Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars*. Rom, CNR – Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, Juni 2007.
- [72] *AASHTO LRFD Bridge Design Guide Specifications for GFRP-Reinforced Concrete*. Washington DC, American Association of State Highway und Transportation Officials, Dez. 2018.
- [73] *Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers*. Ontario, Canadian Standards Association (CSA), März 2012.
- [74] *Canadian Highway Bridge Design Code*. Ontario, Canadian Standards Association (CSA), Nov. 2019.
- [75] *DAfStb-Richtlinie: Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung*. Berlin, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V. – DAfStb, Nov. 2022.
- [76] S. Spadea, J. Orr, A. Nanni und Y. Yang. „Wound FRP shear reinforcement for concrete structures“. In: *Journal of Composites for Construction* 21.5 (2017). DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000807.
- [77] F. Jonas und J. Knippers. „Tragverhalten von Betondruckgliedern mit Umschnürung durch geflochtene und gewickelte Carbonrohre: Tragfähigkeitssteigerung durch Aktivierung eines mehraxialen Spannungszustands im Beton“. In: *Beton-und Stahlbetonbau* 112.8 (2017), S. 517–529. DOI: 10.1002/best.201700023.
- [78] Deutsche Basalt Faser GmbH. *Geogrid*. 2023. URL: <https://www.deutsche-basalt-faser.de/produkte/geogrid/> (Zugriff am 09.02.2024).
- [79] P. Preinstorfer, S. Yanik, J. Kirnbauer, J. m. Lees und A. Robisson. „Cracking behaviour of textile-reinforced concrete with varying concrete cover and textile surface finish“. In: *Composite Structures* 312 (2023). DOI: 10.1016/j.compstruct.2023.116859.
- [80] Basalt Fibertec GmbH. *Datenblatt Basalt-Bewehrungsstäbe*. 2021. URL: https://www.basalt-fibertec.ch/images/060_basalt_bewehrungsstaebe/060_artikelliste_basalt-bewehrungsstaebe_de.pdf (Zugriff am 09.02.2024).
- [81] T. Huber, P. Huber, S. Fasching, M. Vill und J. Kolleger. „Querkrafttragverhalten von Stahlbetonbauteilen mit aufgebogenen Bewehrungsstäben auf Basis photogrammetrischer Messungen“. In: *Bauingenieur* 95 (2020).
- [82] V. Červenka und R. Pukl. „ATENA – ein Werkzeug für wirklichkeitsnahe Berechnungen von Stahlbetonstrukturen“. In: *Universität für Bodenkultur Wien (Hrsg.): Tagungsband 1* (2007).

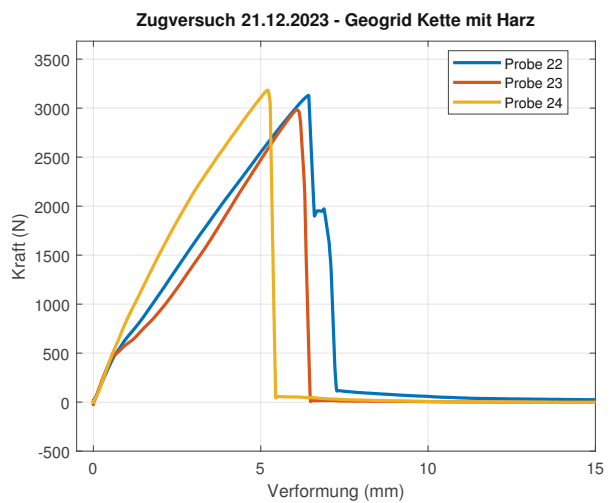
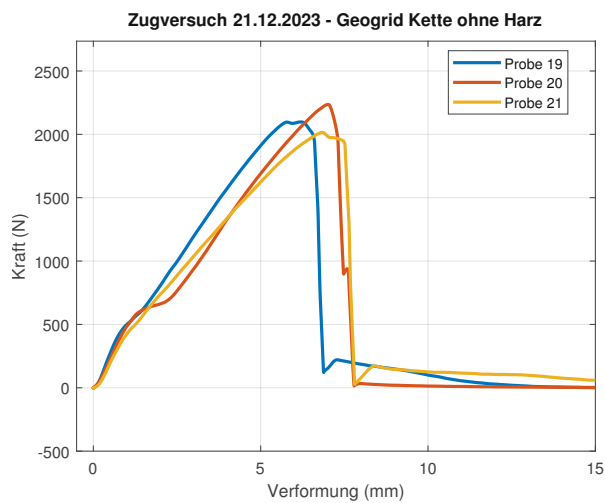
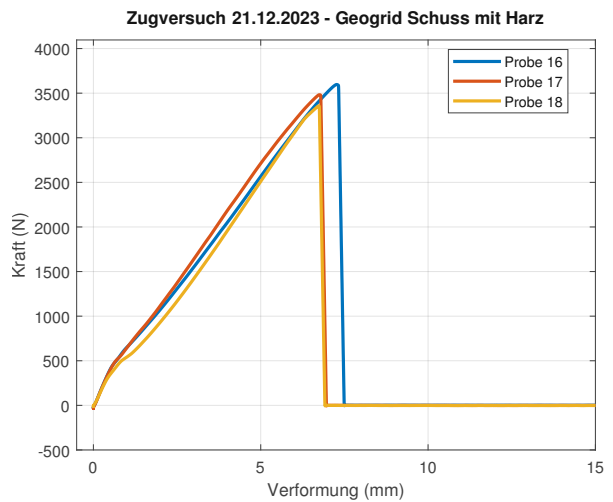
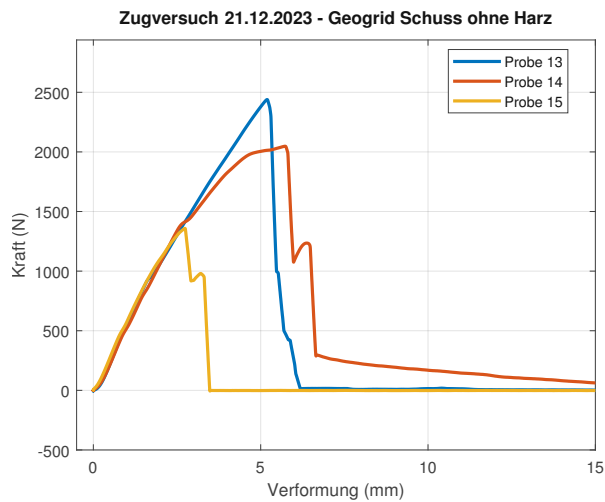
- [83] J. Bielak. „Shear in slabs with non-metallic reinforcement“. Dissertation. Technische Hochschule Aachen, 2021.
- [84] *GOM Correlate, Version V8 SR1 und höher*. Braunschweig, GOM Gesellschaft optischer Messtechnik GmbH, 2016.
- [85] F. Jesse und T. Kutzner. „Digitale Photogrammetrie in der Bautechnik“. In: *Bautechnik* 90 (2013), S. 703–714. DOI: 10.1002/bate.201300059.
- [86] P. Preinstorfer, P. Huber, T. Huber, B. Kromoser und J. Kollegger. „Experimental investigation and analytical modelling of shear strength of thin walled textile-reinforced UHPC beams“. In: *Engineering Structures* 231 (2021). DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111735.
- [87] U. Pfeiffer. *Interactive Nonlinear Cross-Section Analysis Biaxial, INCA2*. 2024. URL: <https://www.u-pfeiffer.de/> (Zugriff am 05.03.2024).

Anhang A

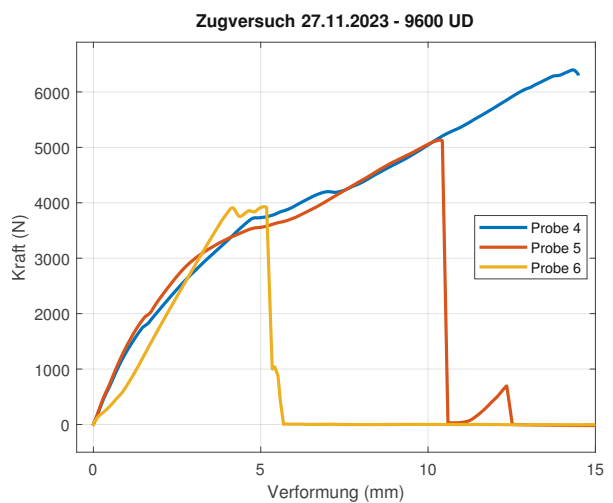
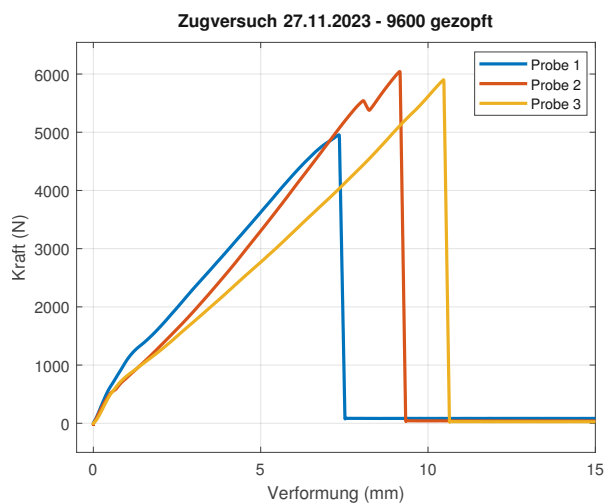
Versuchsauswertungen Zugversuch

A.1 Zugversuche vom 21.12.2023 mit UHPC verfüllten Stahlrohren - Einzelne Plots

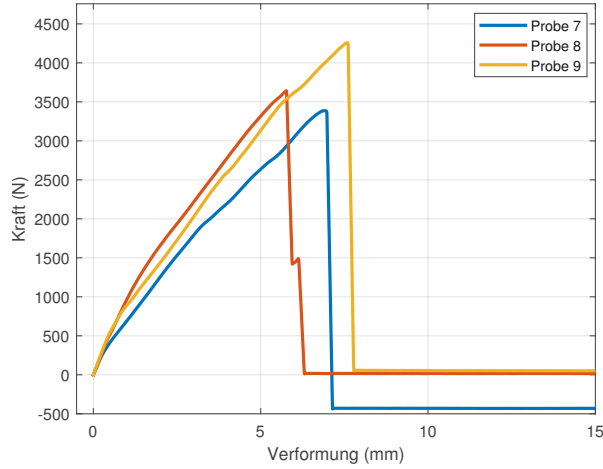




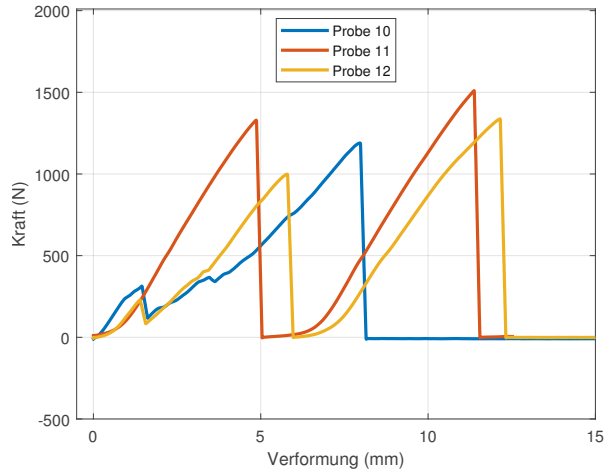
A.2 Zugversuche vom 27.11.2023 mit verschiedenem Verankerungen - Einzelne Plots



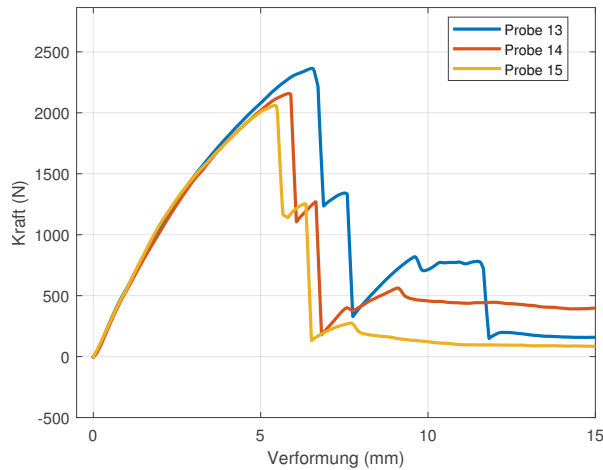
Zugversuch 27.11.2023 - 4800 UD



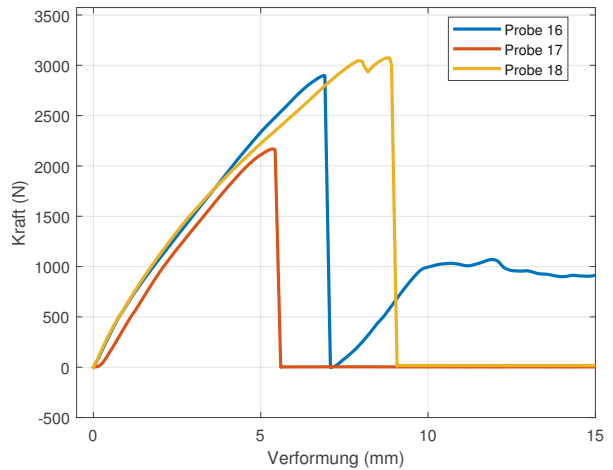
Zugversuch 27.11.2023 - 4800 geflochten



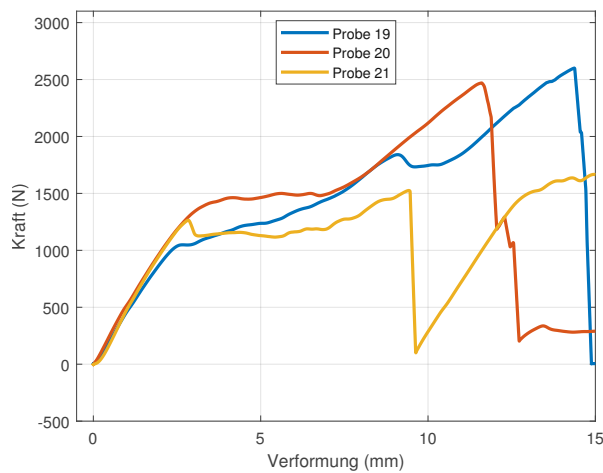
Zugversuch 27.11.2023 - Geogrid Schuss ohne Harz



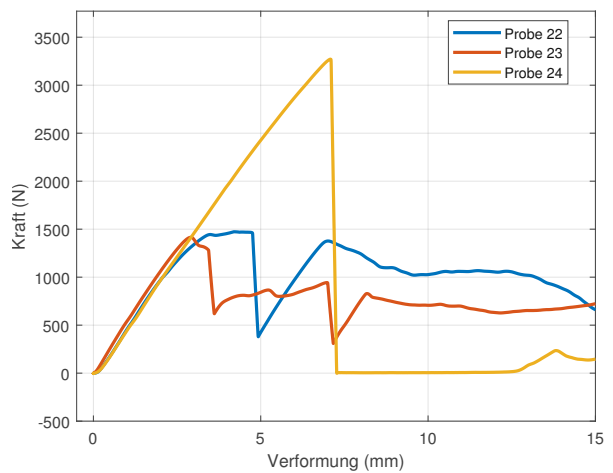
Zugversuch 27.11.2023 - Geogrid Schuss mit Harz



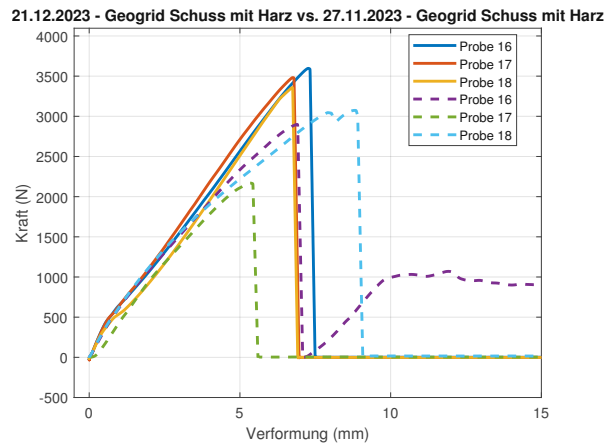
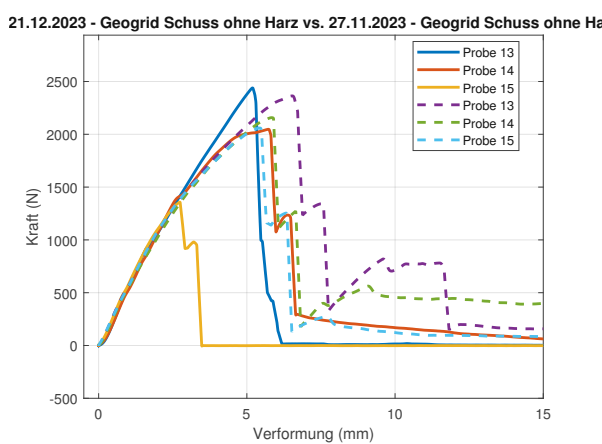
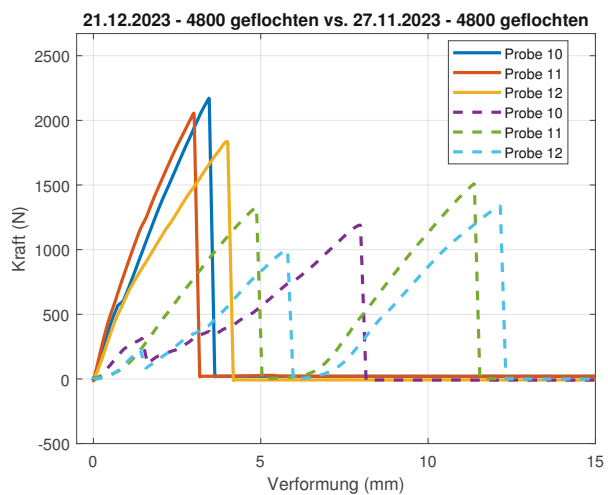
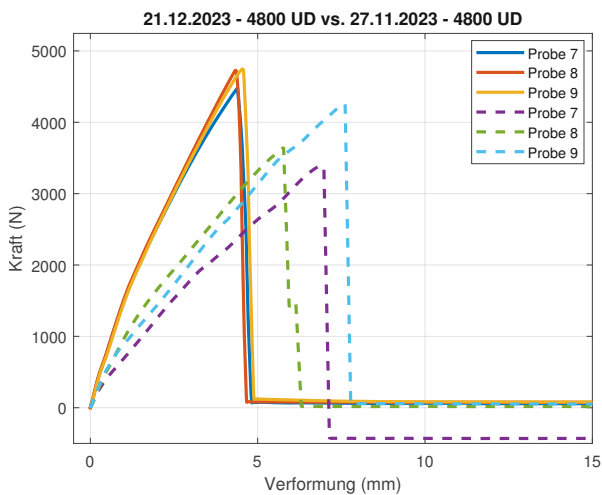
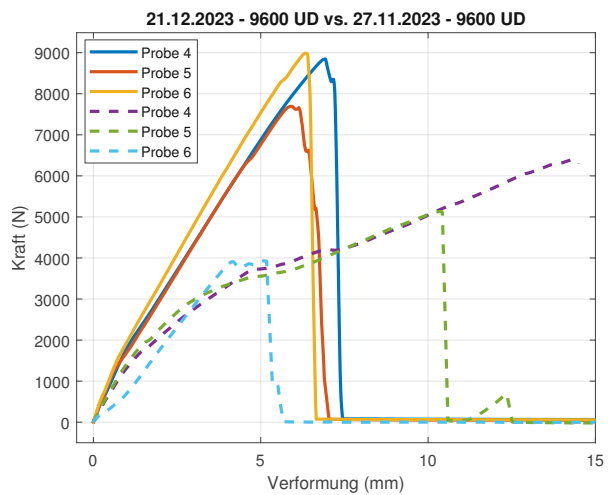
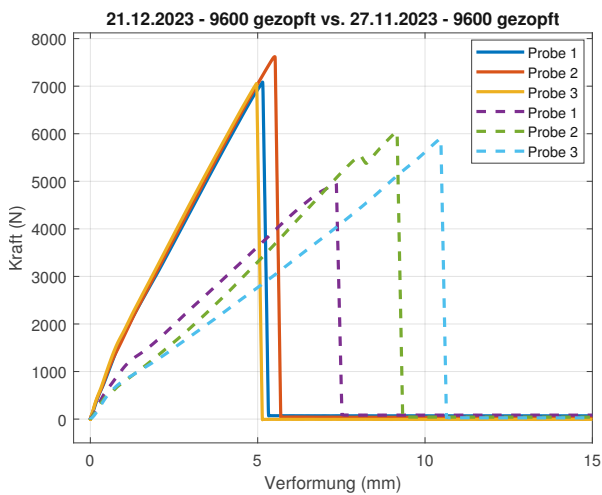
Zugversuch 27.11.2023 - Geogrid Kette ohne Harz



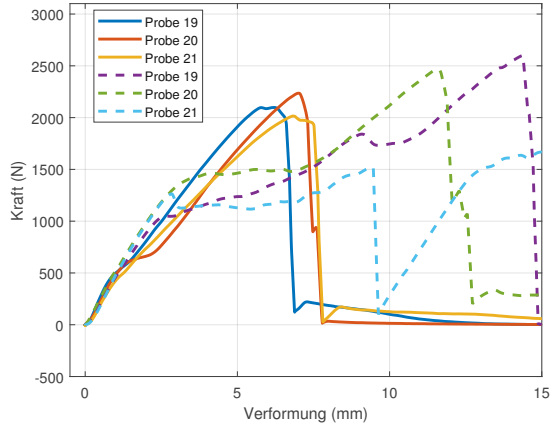
Zugversuch 27.11.2023 - Geogrid Kette mit Harz



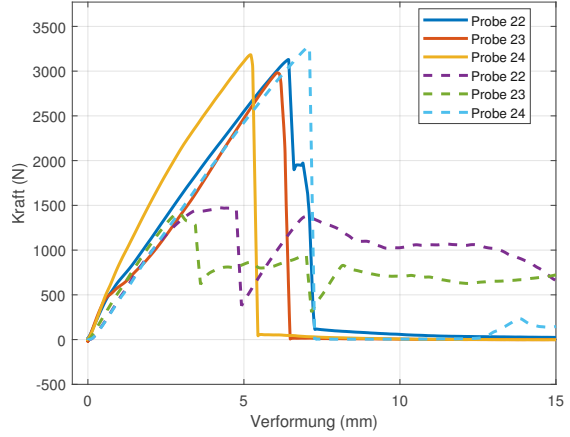
A.3 Vergleich der Zugversuche von gleichen Probereihen



21.12.2023 - Geogrid Kette ohne Harz vs. 27.11.2023 - Geogrid Kette ohne Harz



21.12.2023 - Geogrid Kette mit Harz vs. 27.11.2023 - Geogrid Kette mit Harz



Anhang B

Versuch: Gewickelte Träger

B.1 Versuchsauswertung - Labordaten

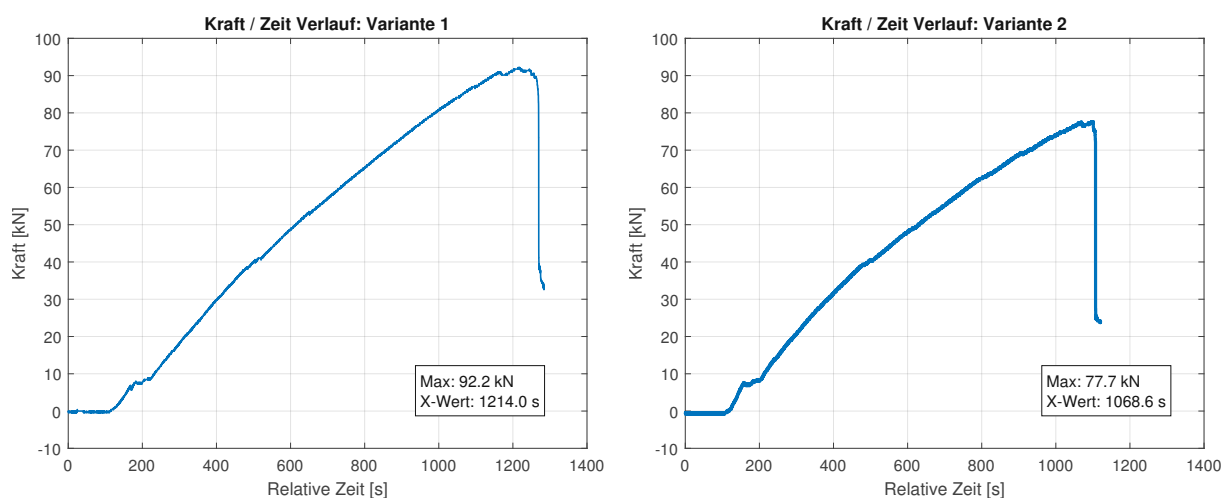


Abb. B.1: Kraft-Zeitverlauf von Variante 1 und 2 der Versuche

B.2 Last Verformungsdiagramme Atena Standardeinstellung

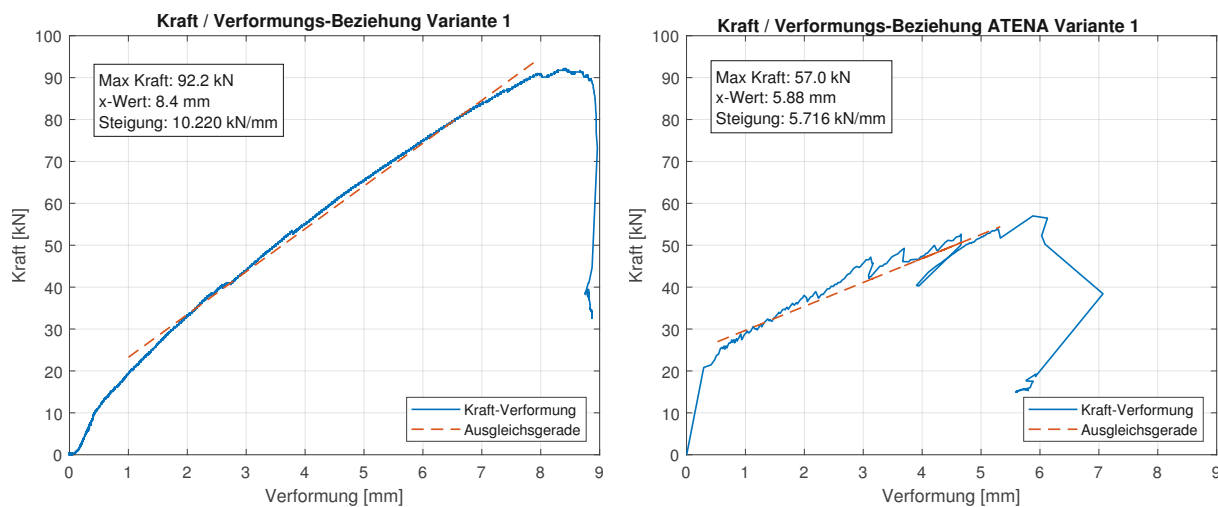


Abb. B.2: F-u-Beziehung von Versuch und Atena Simulation (sbeta)

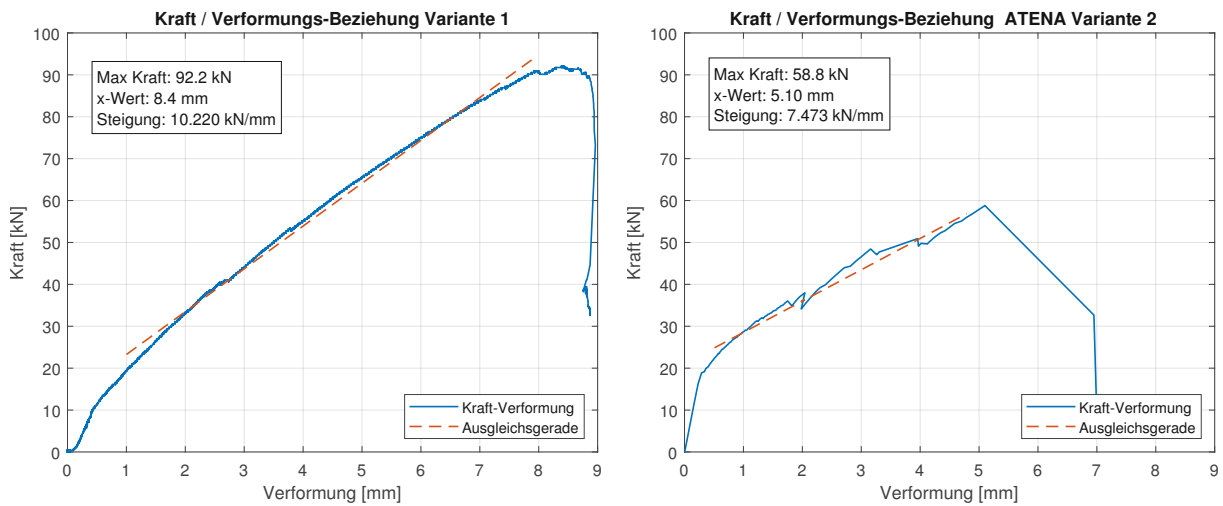


Abb. B.3: F-u-Beziehung von Versuch und Atena Simulation (nonlinear cementitious)

B.3 Neues Materialmodell nach Červenka

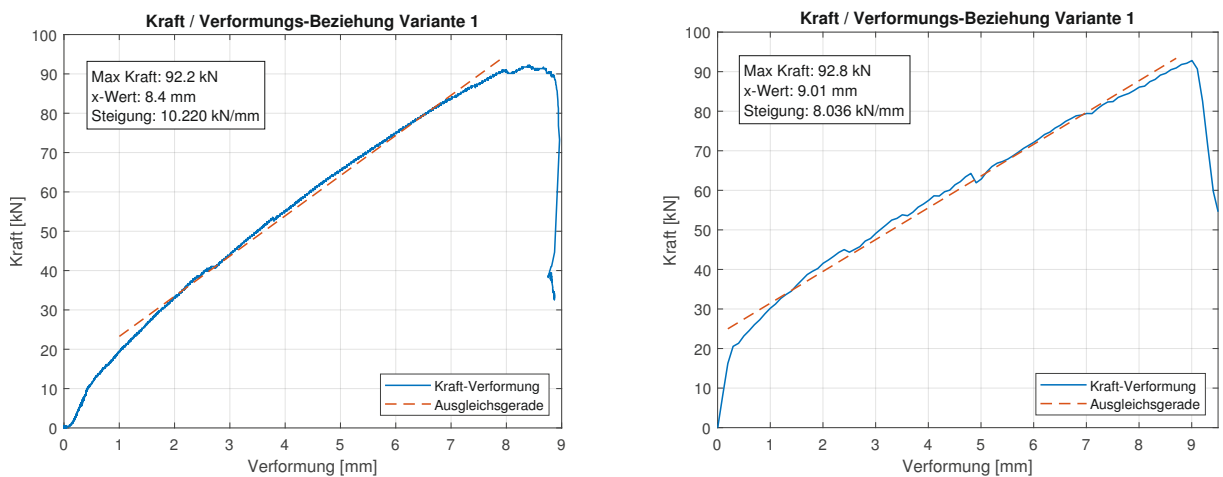


Abb. B.4: F-u-Beziehung von Versuch und Atena Simulation Variante 1

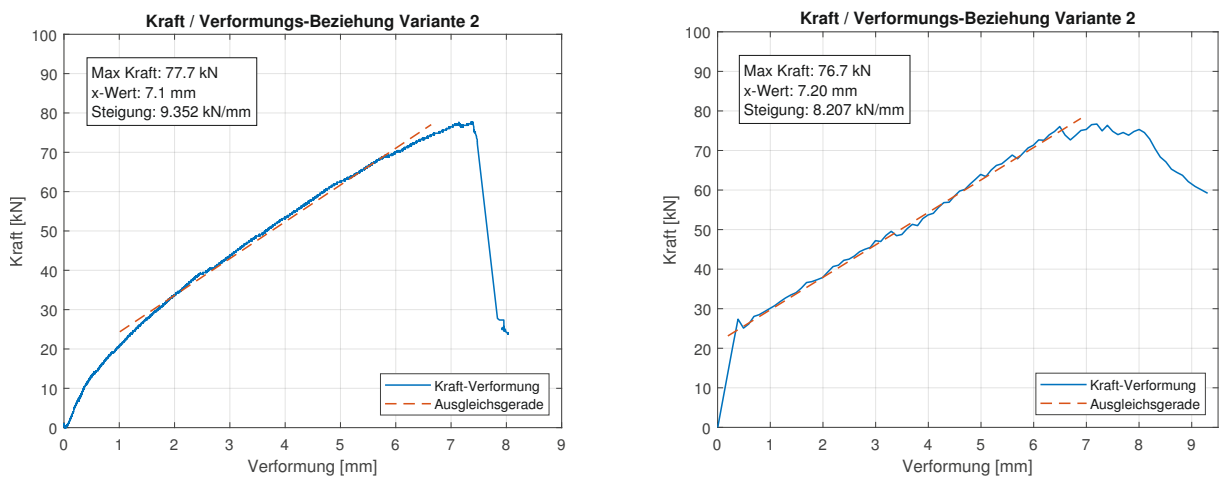


Abb. B.5: F-u-Beziehung von Versuch und Atena Simulation Variante 2

Anhang C

Berechnungsergebnisse INCA2

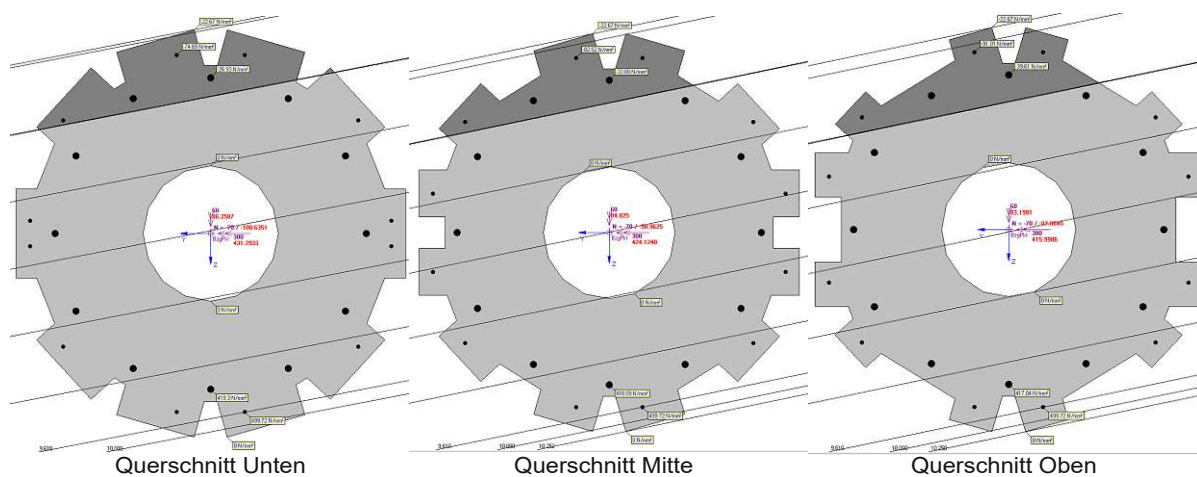


Abb. C.1: Berechnung LF1 - ULS

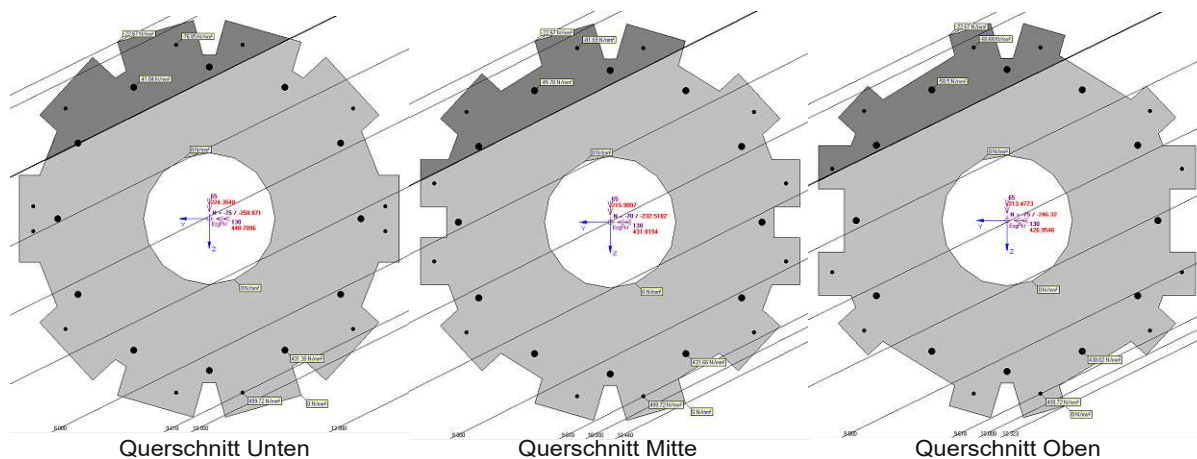


Abb. C.2: Berechnung LF2 - Anprall

<p>INCA2 Version 3.00 vom 27.03.2022 22:14:54, (c) Dr.-Ing. Uwe Pfeiffer 2021 Download im Internet unter http://www.u-pfeiffer.de Diese Version von INCA2 wurde lizenziert für: Hochschulversion, Institut für Massivbau, TU Hamburg-Harburg Kostenlose Lizenzierung unter www.u-pfeiffer.de möglich !</p>	Pos: _____ Seite: 1 Datum: 13.03.2024																
Sicherheitsnachweis für alle Lastfälle																	
maximaler Sicherheitsfaktor $\gamma = 3.4516$ bei Lastfall 2 minimaler Sicherheitsfaktor $\gamma = 1.4376$ bei Lastfall 1																	
Lastfall 1																	
$N_{xS} = -70.0000 \text{ kN}$ $M_{yS} = 300.0000 \text{ kNm}$ $M_{zS} = 60.0000 \text{ kNm}$ $N_{xR} = -100.6351 \text{ kN}$ $M_{yR} = 431.2933 \text{ kNm}$ $M_{zR} = 86.2587 \text{ kNm}$ Der Sicherheitsfaktor beträgt $\gamma = 1.4376$ Schnittgrößen wurden auf den Punkt (0.0000/0.0000) bezogen.																	
$\alpha_0 = 100.9317$ $y_0 = 1.5916$ $z_0 = -0.3074$ $\epsilon_0 = 4.0872$ $\Delta\epsilon / \Delta y = -2.5680$ $\Delta\epsilon / \Delta z = 13.2960$ $\epsilon_{2b} = -2.0789$ $\epsilon_{1b} = 10.2533$ $\epsilon_{1s} = 9.6100$																	
Spannungen im Querschnitt in [N/mm ²]:																	
<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 30%;">Polygon 1</td> <td style="width: 20%;">$\sigma_{Max} = 0.0000$</td> <td style="width: 20%;">$\sigma_{Min} = -22.6667$</td> <td style="width: 30%;">(C 40/50 PR, Bemessungswerte)</td> </tr> <tr> <td>Polygon 2</td> <td>$\sigma_{Max} = 0.0000$</td> <td>$\sigma_{Min} = 0.0000$</td> <td>(C 40/50 PR, Bemessungswerte)</td> </tr> <tr> <td>Bew-Gr. 1</td> <td>$\sigma_{Max} = 499.7200$</td> <td>$\sigma_{Min} = -74.6500$</td> <td>(Basalt E55 S1200)</td> </tr> <tr> <td>Bew-Gr. 2</td> <td>$\sigma_{Max} = 419.3037$</td> <td>$\sigma_{Min} = -26.9314$</td> <td>(Basalt E55 S1000)</td> </tr> </table>		Polygon 1	$\sigma_{Max} = 0.0000$	$\sigma_{Min} = -22.6667$	(C 40/50 PR, Bemessungswerte)	Polygon 2	$\sigma_{Max} = 0.0000$	$\sigma_{Min} = 0.0000$	(C 40/50 PR, Bemessungswerte)	Bew-Gr. 1	$\sigma_{Max} = 499.7200$	$\sigma_{Min} = -74.6500$	(Basalt E55 S1200)	Bew-Gr. 2	$\sigma_{Max} = 419.3037$	$\sigma_{Min} = -26.9314$	(Basalt E55 S1000)
Polygon 1	$\sigma_{Max} = 0.0000$	$\sigma_{Min} = -22.6667$	(C 40/50 PR, Bemessungswerte)														
Polygon 2	$\sigma_{Max} = 0.0000$	$\sigma_{Min} = 0.0000$	(C 40/50 PR, Bemessungswerte)														
Bew-Gr. 1	$\sigma_{Max} = 499.7200$	$\sigma_{Min} = -74.6500$	(Basalt E55 S1200)														
Bew-Gr. 2	$\sigma_{Max} = 419.3037$	$\sigma_{Min} = -26.9314$	(Basalt E55 S1000)														
Lastfall 2																	
$N_{xS} = -75.0000 \text{ kN}$ $M_{yS} = 130.0000 \text{ kNm}$ $M_{zS} = 65.0000 \text{ kNm}$ $N_{xR} = -258.8710 \text{ kN}$ $M_{yR} = 448.7096 \text{ kNm}$ $M_{zR} = 224.3548 \text{ kNm}$ Der Sicherheitsfaktor beträgt $\gamma = 3.4516$ Schnittgrößen wurden auf den Punkt (0.0000/0.0000) bezogen.																	
$\alpha_0 = 116.3393$ $y_0 = 0.6498$ $z_0 = -0.3217$ $\epsilon_0 = 4.0660$ $\Delta\epsilon / \Delta y = -6.2576$ $\Delta\epsilon / \Delta z = 12.6395$ $\epsilon_{2b} = -2.3929$ $\epsilon_{1b} = 10.5250$ $\epsilon_{1s} = 9.6100$																	
Spannungen im Querschnitt in [N/mm ²]:																	
<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 30%;">Polygon 1</td> <td style="width: 20%;">$\sigma_{Max} = 0.0000$</td> <td style="width: 20%;">$\sigma_{Min} = -22.6667$</td> <td style="width: 30%;">(C 40/50 PR, Bemessungswerte)</td> </tr> <tr> <td>Polygon 2</td> <td>$\sigma_{Max} = 0.0000$</td> <td>$\sigma_{Min} = 0.0000$</td> <td>(C 40/50 PR, Bemessungswerte)</td> </tr> <tr> <td>Bew-Gr. 1</td> <td>$\sigma_{Max} = 499.7200$</td> <td>$\sigma_{Min} = -76.8521$</td> <td>(Basalt E55 S1200)</td> </tr> <tr> <td>Bew-Gr. 2</td> <td>$\sigma_{Max} = 431.3815$</td> <td>$\sigma_{Min} = -41.0419$</td> <td>(Basalt E55 S1000)</td> </tr> </table>		Polygon 1	$\sigma_{Max} = 0.0000$	$\sigma_{Min} = -22.6667$	(C 40/50 PR, Bemessungswerte)	Polygon 2	$\sigma_{Max} = 0.0000$	$\sigma_{Min} = 0.0000$	(C 40/50 PR, Bemessungswerte)	Bew-Gr. 1	$\sigma_{Max} = 499.7200$	$\sigma_{Min} = -76.8521$	(Basalt E55 S1200)	Bew-Gr. 2	$\sigma_{Max} = 431.3815$	$\sigma_{Min} = -41.0419$	(Basalt E55 S1000)
Polygon 1	$\sigma_{Max} = 0.0000$	$\sigma_{Min} = -22.6667$	(C 40/50 PR, Bemessungswerte)														
Polygon 2	$\sigma_{Max} = 0.0000$	$\sigma_{Min} = 0.0000$	(C 40/50 PR, Bemessungswerte)														
Bew-Gr. 1	$\sigma_{Max} = 499.7200$	$\sigma_{Min} = -76.8521$	(Basalt E55 S1200)														
Bew-Gr. 2	$\sigma_{Max} = 431.3815$	$\sigma_{Min} = -41.0419$	(Basalt E55 S1000)														
Sicherheitsnachweis - QS-unten_231115.inc																	
Datei: QS-unten_231115.inc																	

INCA2 Version 3.00 vom 27.03.2022 22:14:54, (c) Dr.-Ing. Uwe Pfeiffer 2021 Download im Internet unter http://www.u-pfeiffer.de Diese Version von INCA2 wurde lizenziert für: Hochschulversion, Institut für Massivbau, TU Hamburg-Harburg Kostenlose Lizenzierung unter www.u-pfeiffer.de möglich !	Pos: _____																
	Seite: 1																
Datum: 13.03.2024																	
Sicherheitsnachweis für alle Lastfälle																	
<hr/> maximaler Sicherheitsfaktor $\gamma = 3.3217$ bei Lastfall 2 minimaler Sicherheitsfaktor $\gamma = 1.4137$ bei Lastfall 1																	
<hr/> Lastfall 1																	
<hr/> $N_{xS} = -70.0000 \text{ kN}$ $M_{yS} = 300.0000 \text{ kNm}$ $M_{zS} = 60.0000 \text{ kNm}$ $N_{xR} = -98.9625 \text{ kN}$ $M_{yR} = 424.1248 \text{ kNm}$ $M_{zR} = 84.8250 \text{ kNm}$ Der Sicherheitsfaktor beträgt $\gamma = 1.4137$ Schnittgrößen wurden auf den Punkt (0.0000/0.0000) bezogen.																	
$\alpha_0 = 101.6733$ $y_0 = 1.4440$ $z_0 = -0.2983$ $\epsilon_0 = 4.0106$ $\Delta\epsilon / \Delta y = -2.7774$ $\Delta\epsilon / \Delta z = 13.4430$ $\epsilon_{2b} = -2.2306$ $\epsilon_{1b} = 10.2518$ $\epsilon_{1s} = 9.6100$																	
Spannungen im Querschnitt in [N/mm ²]:																	
<table> <tr> <td>Polygon 1</td> <td>$\sigma_{Max} = 0.0000$</td> <td>$\sigma_{Min} = -22.6667$</td> <td>(C 40/50 PR, Bemessungswerte)</td> </tr> <tr> <td>Polygon 2</td> <td>$\sigma_{Max} = 0.0000$</td> <td>$\sigma_{Min} = 0.0000$</td> <td>(C 40/50 PR, Bemessungswerte)</td> </tr> <tr> <td>Bew-Gr. 1</td> <td>$\sigma_{Max} = 499.7200$</td> <td>$\sigma_{Min} = -82.6182$</td> <td>(Basalt 10)</td> </tr> <tr> <td>Bew-Gr. 2</td> <td>$\sigma_{Max} = 418.0930$</td> <td>$\sigma_{Min} = -33.0759$</td> <td>(Basalt)</td> </tr> </table>		Polygon 1	$\sigma_{Max} = 0.0000$	$\sigma_{Min} = -22.6667$	(C 40/50 PR, Bemessungswerte)	Polygon 2	$\sigma_{Max} = 0.0000$	$\sigma_{Min} = 0.0000$	(C 40/50 PR, Bemessungswerte)	Bew-Gr. 1	$\sigma_{Max} = 499.7200$	$\sigma_{Min} = -82.6182$	(Basalt 10)	Bew-Gr. 2	$\sigma_{Max} = 418.0930$	$\sigma_{Min} = -33.0759$	(Basalt)
Polygon 1	$\sigma_{Max} = 0.0000$	$\sigma_{Min} = -22.6667$	(C 40/50 PR, Bemessungswerte)														
Polygon 2	$\sigma_{Max} = 0.0000$	$\sigma_{Min} = 0.0000$	(C 40/50 PR, Bemessungswerte)														
Bew-Gr. 1	$\sigma_{Max} = 499.7200$	$\sigma_{Min} = -82.6182$	(Basalt 10)														
Bew-Gr. 2	$\sigma_{Max} = 418.0930$	$\sigma_{Min} = -33.0759$	(Basalt)														
<hr/> Lastfall 2																	
<hr/> $N_{xS} = -70.0000 \text{ kN}$ $M_{yS} = 130.0000 \text{ kNm}$ $M_{zS} = 65.0000 \text{ kNm}$ $N_{xR} = -232.5182 \text{ kN}$ $M_{yR} = 431.8194 \text{ kNm}$ $M_{zR} = 215.9097 \text{ kNm}$ Der Sicherheitsfaktor beträgt $\gamma = 3.3217$ Schnittgrößen wurden auf den Punkt (0.0000/0.0000) bezogen.																	
$\alpha_0 = 116.7691$ $y_0 = 0.6264$ $z_0 = -0.3160$ $\epsilon_0 = 4.0195$ $\Delta\epsilon / \Delta y = -6.4168$ $\Delta\epsilon / \Delta z = 12.7202$ $\epsilon_{2b} = -2.4013$ $\epsilon_{1b} = 10.4404$ $\epsilon_{1s} = 9.6100$																	
Spannungen im Querschnitt in [N/mm ²]:																	
<table> <tr> <td>Polygon 1</td> <td>$\sigma_{Max} = 0.0000$</td> <td>$\sigma_{Min} = -22.6667$</td> <td>(C 40/50 PR, Bemessungswerte)</td> </tr> <tr> <td>Polygon 2</td> <td>$\sigma_{Max} = 0.0000$</td> <td>$\sigma_{Min} = 0.0000$</td> <td>(C 40/50 PR, Bemessungswerte)</td> </tr> <tr> <td>Bew-Gr. 1</td> <td>$\sigma_{Max} = 499.7200$</td> <td>$\sigma_{Min} = -81.6874$</td> <td>(Basalt 10)</td> </tr> <tr> <td>Bew-Gr. 2</td> <td>$\sigma_{Max} = 431.6586$</td> <td>$\sigma_{Min} = -45.7824$</td> <td>(Basalt)</td> </tr> </table>		Polygon 1	$\sigma_{Max} = 0.0000$	$\sigma_{Min} = -22.6667$	(C 40/50 PR, Bemessungswerte)	Polygon 2	$\sigma_{Max} = 0.0000$	$\sigma_{Min} = 0.0000$	(C 40/50 PR, Bemessungswerte)	Bew-Gr. 1	$\sigma_{Max} = 499.7200$	$\sigma_{Min} = -81.6874$	(Basalt 10)	Bew-Gr. 2	$\sigma_{Max} = 431.6586$	$\sigma_{Min} = -45.7824$	(Basalt)
Polygon 1	$\sigma_{Max} = 0.0000$	$\sigma_{Min} = -22.6667$	(C 40/50 PR, Bemessungswerte)														
Polygon 2	$\sigma_{Max} = 0.0000$	$\sigma_{Min} = 0.0000$	(C 40/50 PR, Bemessungswerte)														
Bew-Gr. 1	$\sigma_{Max} = 499.7200$	$\sigma_{Min} = -81.6874$	(Basalt 10)														
Bew-Gr. 2	$\sigma_{Max} = 431.6586$	$\sigma_{Min} = -45.7824$	(Basalt)														
Sicherheitsnachweis - QS-mitte_231115.inc Datei: QS-mitte_231115.inc																	

<p>INCA2 Version 3.00 vom 27.03.2022 22:14:54, (c) Dr.-Ing. Uwe Pfeiffer 2021 Download im Internet unter http://www.u-pfeiffer.de Diese Version von INCA2 wurde lizenziert für: Hochschulversion, Institut für Massivbau, TU Hamburg-Harburg Kostenlose Lizenzierung unter www.u-pfeiffer.de möglich !</p>	Pos: _____ Seite: 1 Datum: 13.03.2024																
Sicherheitsnachweis für alle Lastfälle																	
maximaler Sicherheitsfaktor $\gamma = 3.2843$ bei Lastfall 2 minimaler Sicherheitsfaktor $\gamma = 1.3866$ bei Lastfall 1																	
Lastfall 1																	
$N_{xS} = -70.0000 \text{ kN}$ $M_{yS} = 300.0000 \text{ kNm}$ $M_{zS} = 60.0000 \text{ kNm}$ $N_{xR} = -97.0645 \text{ kN}$ $M_{yR} = 415.9906 \text{ kNm}$ $M_{zR} = 83.1981 \text{ kNm}$ Der Sicherheitsfaktor beträgt $\gamma = 1.3866$ Schnittgrößen wurden auf den Punkt (0.0000/ 0.0000) bezogen.																	
$\alpha_0 = 101.8033$ $y_0 = 1.3827$ $z_0 = -0.2889$ $\epsilon_0 = 3.9315$ $\Delta\epsilon / \Delta y = -2.8433$ $\Delta\epsilon / \Delta z = 13.6064$ $\epsilon_{2b} = -2.3868$ $\epsilon_{1b} = 10.2498$ $\epsilon_{1s} = 9.6100$																	
Spannungen im Querschnitt in [N/mm ²]: <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td>Polygon 1</td> <td>$\sigma_{Max} = 0.0000$</td> <td>$\sigma_{Min} = -22.6667$</td> <td>(C 40/50 PR, Bemessungswerte)</td> </tr> <tr> <td>Polygon 2</td> <td>$\sigma_{Max} = 0.0000$</td> <td>$\sigma_{Min} = 0.0000$</td> <td>(C 40/50 PR, Bemessungswerte)</td> </tr> <tr> <td>Bew-Gr. 1</td> <td>$\sigma_{Max} = 499.7200$</td> <td>$\sigma_{Min} = -91.0079$</td> <td>(Basalt E55 S1200)</td> </tr> <tr> <td>Bew-Gr. 2</td> <td>$\sigma_{Max} = 417.0404$</td> <td>$\sigma_{Min} = -39.6127$</td> <td>(Basalt E55 S1000)</td> </tr> </table>		Polygon 1	$\sigma_{Max} = 0.0000$	$\sigma_{Min} = -22.6667$	(C 40/50 PR, Bemessungswerte)	Polygon 2	$\sigma_{Max} = 0.0000$	$\sigma_{Min} = 0.0000$	(C 40/50 PR, Bemessungswerte)	Bew-Gr. 1	$\sigma_{Max} = 499.7200$	$\sigma_{Min} = -91.0079$	(Basalt E55 S1200)	Bew-Gr. 2	$\sigma_{Max} = 417.0404$	$\sigma_{Min} = -39.6127$	(Basalt E55 S1000)
Polygon 1	$\sigma_{Max} = 0.0000$	$\sigma_{Min} = -22.6667$	(C 40/50 PR, Bemessungswerte)														
Polygon 2	$\sigma_{Max} = 0.0000$	$\sigma_{Min} = 0.0000$	(C 40/50 PR, Bemessungswerte)														
Bew-Gr. 1	$\sigma_{Max} = 499.7200$	$\sigma_{Min} = -91.0079$	(Basalt E55 S1200)														
Bew-Gr. 2	$\sigma_{Max} = 417.0404$	$\sigma_{Min} = -39.6127$	(Basalt E55 S1000)														
Lastfall 2																	
$N_{xS} = -75.0000 \text{ kN}$ $M_{yS} = 130.0000 \text{ kNm}$ $M_{zS} = 65.0000 \text{ kNm}$ $N_{xR} = -246.3200 \text{ kN}$ $M_{yR} = 426.9546 \text{ kNm}$ $M_{zR} = 213.4773 \text{ kNm}$ Der Sicherheitsfaktor beträgt $\gamma = 3.2843$ Schnittgrößen wurden auf den Punkt (0.0000/ 0.0000) bezogen.																	
$\alpha_0 = 116.1735$ $y_0 = 0.6246$ $z_0 = -0.3070$ $\epsilon_0 = 3.9533$ $\Delta\epsilon / \Delta y = -6.3289$ $\Delta\epsilon / \Delta z = 12.8770$ $\epsilon_{2b} = -2.4164$ $\epsilon_{1b} = 10.3230$ $\epsilon_{1s} = 9.6100$																	
Spannungen im Querschnitt in [N/mm ²]: <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td>Polygon 1</td> <td>$\sigma_{Max} = 0.0000$</td> <td>$\sigma_{Min} = -22.6667$</td> <td>(C 40/50 PR, Bemessungswerte)</td> </tr> <tr> <td>Polygon 2</td> <td>$\sigma_{Max} = 0.0000$</td> <td>$\sigma_{Min} = 0.0000$</td> <td>(C 40/50 PR, Bemessungswerte)</td> </tr> <tr> <td>Bew-Gr. 1</td> <td>$\sigma_{Max} = 499.7200$</td> <td>$\sigma_{Min} = -88.6806$</td> <td>(Basalt E55 S1200)</td> </tr> <tr> <td>Bew-Gr. 2</td> <td>$\sigma_{Max} = 430.0187$</td> <td>$\sigma_{Min} = -50.5035$</td> <td>(Basalt E55 S1000)</td> </tr> </table>		Polygon 1	$\sigma_{Max} = 0.0000$	$\sigma_{Min} = -22.6667$	(C 40/50 PR, Bemessungswerte)	Polygon 2	$\sigma_{Max} = 0.0000$	$\sigma_{Min} = 0.0000$	(C 40/50 PR, Bemessungswerte)	Bew-Gr. 1	$\sigma_{Max} = 499.7200$	$\sigma_{Min} = -88.6806$	(Basalt E55 S1200)	Bew-Gr. 2	$\sigma_{Max} = 430.0187$	$\sigma_{Min} = -50.5035$	(Basalt E55 S1000)
Polygon 1	$\sigma_{Max} = 0.0000$	$\sigma_{Min} = -22.6667$	(C 40/50 PR, Bemessungswerte)														
Polygon 2	$\sigma_{Max} = 0.0000$	$\sigma_{Min} = 0.0000$	(C 40/50 PR, Bemessungswerte)														
Bew-Gr. 1	$\sigma_{Max} = 499.7200$	$\sigma_{Min} = -88.6806$	(Basalt E55 S1200)														
Bew-Gr. 2	$\sigma_{Max} = 430.0187$	$\sigma_{Min} = -50.5035$	(Basalt E55 S1000)														
Sicherheitsnachweis - QS-oben_231116.inc																	
Datei: QS-oben_231116.inc																	