



Artikel

Belastbare und nachhaltige Strukturen durch EMI-basiertes SHM Evaluierung eines innovativen C-FRP-Seils Kräftigungstechnik

Nikos A. Papadopoulos *, Maria C. Naoum , George M. Sapidis  und Constantin E. Chalioris 

Labor für Stahlbeton und erdbebensichere Konstruktion von Bauwerken, Abteilung Bauingenieurwesen, Technische Fakultät, Demokrit-Universität Thrakien, 67100 Xanthi, Griechenland; mnaoum@civil.duth.gr (MCN); gsapidis@civil.duth.gr (GMS); chaliori@civil.duth.gr (CEC)

* Korrespondenz: nikpapad@civil.duth.gr

Zusammenfassung: Stahlbetonelemente (RC) in bestehenden Stahlbetonstrukturen sind aufgrund ihrer unzureichend verstärkten Konstruktion anfällig für Scherkräfte. Daher ist die Implementierung einer Nachrüsttechnik unerlässlich, um die Verluste zu vermeiden, die durch plötzliche und katastrophale Einstürze aufgrund der Sprödigkeit dieser Elemente entstehen könnten. Neben anderen vorgeschlagenen Techniken hat sich die Verwendung von Seilen aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (C-FRP) zur Erhöhung der Scherfestigkeit von Stahlbetonstrukturelementen als vielversprechende Verstärkungsanwendung erwiesen. Zudem wurde eine elektromechanische Impedanzmethode (auf EMI-Basis) unter Verwendung von Bleizirkoniatitanat (PZT-fähig) eingesetzt, um die Effizienz des Verstärkungsschemas zu beurteilen. Zunächst wurde die vorgeschlagene Technik auf C-FRP-Seile angewendet, die einem Auszugstest unterzogen wurden. So wurde mithilfe des metrischen Index der quadratischen Abweichung (RMSD) eine Korrelation der Zugfestigkeit des Seils mit den EMI-Reaktionen des PZT-Patches erreicht. Anschließend wurde die Methode auf die experimentell erfassten Daten von C-FRP-Seilen angewendet, die als Schubbewehrung in einem rechteckigen, tiefen Träger verwendet wurden. Die Seile wurden mithilfe des Embedded Through Section (ETS)-Verfahrens. Darüber hinaus wurde ein Ansatz zur Bewertung der Restschertragfähigkeit auf Grundlage der EMI-Reaktionen ausprobiert, die durch Einbettung in und Bindung an die PZTs der Seile erzielt wurden. Dieser Ansatz lieferte vielversprechende Ergebnisse und eine gute Präzision im Vergleich zur analytischen Vorhersage des Scherwiderstandsbeitrags der C-FRP-Seile.



Zitat: Papadopoulos, NA; Naoum,

MC; Sapidis, GM;

Chalioris, CE Resilient und

Nachhaltige Strukturen durch

EMI-basierte SHM-Bewertung eines

Innovative C-FRP-

Seilverstärkungstechnik. Appl. Mech. 2024, 5,

405–419. <https://doi.org/10.3390/applmech5030024>

appliedmech5030024

Empfangen: 28. April 2024

Überarbeitet: 30. Mai 2024

Akzeptiert: 5. Juni 2024

Veröffentlicht: 21. Juni 2024



Copyright: © 2024 bei den Autoren.

Lizenznehmer MDPI, Basel, Schweiz.

Dieser Artikel ist ein Open Access-Artikel

vertrieben unter den Bedingungen und

Bedingungen der Creative Commons

Namensnennungslizenz (CC BY)

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Schlüsselwörter: Strukturelle Integritätsüberwachung (SHM); elektromechanische Impedanz (EMI); piezoelektrischer Wandler (PZT); C-FRP-Seil; Scher-Nachrüsttechnik; Auszug

1. Einleitung

Ein erheblicher Anteil der Stahlbetonbauteile in bestehenden Stahlbetonkonstruktionen ist häufig nicht ausreichend gegen Scherkräfte bewehrt, was hauptsächlich auf veraltete und unzureichende Konstruktionsvorkehrungen zurückzuführen ist. Diese Bauteile sind anfällig für scherkritische Rissbildung und bergen aufgrund ihrer unzureichenden Festigkeit und Verformungsfähigkeit das Risiko von Sprödbrüchen [1,2]. Daher ist die Umsetzung von Nachrüsttechniken zur Stärkung der Schertragfähigkeit unabdingbar, um die potenziellen Verluste durch plötzliche und katastrophale Einstürze dieser spröden Stahlbetonbauteile zu verringern [3,4].

Unter den verfügbaren Nachrüsttechniken ist die Stahlbetonummantelung eine beliebte Wahl, um Mängel an Stahlbetonbauteilen in vorhandenen Strukturbaugruppen zu beheben [5,6]. Zahlreiche Studien haben die Vorteile der herkömmlichen Stahlbetonummantelung hinsichtlich der Erhöhung der Tragfähigkeit [7], der Steifigkeit und der allgemeinen strukturellen Reaktionseffizienz [8,9] hervorgehoben.

Trotz ihrer Wirksamkeit hat die konventionelle RC-Ummantelung jedoch ihre Grenzen. Herausforderungen wie Veränderungen der strukturdynamischen Eigenschaften infolge erheblicher Zunahmen von Masse und Steifheit sowie der arbeitsintensive Charakter des Prozesses haben Forscher dazu veranlasst, alternative Nachrüsttechniken unter Verwendung alternativer Materialien zu erforschen. Dieser Innovationsdrang zielt darauf ab, die Nachteile der konventionellen Ummantelung zu überwinden.

Stahlbetonummantelung, bei der gleichzeitig die strukturelle Integrität und Leistung bestehender Stahlbetonbauteile effektiv verbessert wird [10–12].

Eine weitere Schwachstelle von Stahlbetonkonstruktionen, die nach veralteten Vorschriften errichtet wurden, ist ihre Anfälligkeit für morphologische Probleme, die auf mangelnde Kenntnisse hinsichtlich der Erdbebensicherheit zurückzuführen sind [13]. Die Konstruktion kurzer Strukturelemente birgt Risiken für die Erdbebenreaktion der Struktur. Kurze Elemente wie kurze Stützen und tiefe Balken neigen zu sprödem Versagen, wodurch ihr Beitrag zur Gesamtduktilität der Struktur reduziert wird [14]. Tiefe Balken sind aufgrund ihres starken Scherverhaltens kritische Strukturelemente in Stahlbetonstrukturen [15].

Generell kann Scherversagen bei Stahlbetonkonstruktionen zu plötzlichen und unerwarteten Einstürzen von Teilen oder sogar der gesamten Konstruktion führen und damit die Integrität und Sicherheit der Insassen gefährden [16]. Diese strukturellen Mängel unterstreichen die dringende Notwendigkeit von Nachrüstungs- und Verstärkungsmaßnahmen, um die Erdbebensicherheit bestehender Stahlbetonkonstruktionen zu erhöhen und die damit verbundenen Risiken durch Scherversagen zu mindern.

Ein Balken wird anhand seines Scherverhältnisses, das mit Gleichung (1) ermittelt wird, als tief oder kurz eingestuft. Insbesondere wenn das mit Gleichung (1) berechnete Scherverhältnis unter 2,5 fällt, wird der Balken als tief eingestuft. Diese Klassifizierung ist in der Baustatik von entscheidender Bedeutung, da sie hilft, Balken mit ausgeprägtem Scherverhalten zu identifizieren und so Konstruktionsüberlegungen und Nachrüststrategien zur Gewährleistung der strukturellen Integrität und Sicherheit zu unterstützen.

$$\gamma_s = \frac{\gamma_v}{D} = \frac{M}{Vd} \leq 2,5 \quad (1)$$

Dabei stellt γ_v die Scherspanne des Elements dar, d bezeichnet die statische Höhe und M und V bezeichnen jeweils die Größen des Biegemoments und der Scherkraft des Querschnitts.

Nach dem Saint-Venant-Prinzip führt die Anwendung einer externen Last zu gestörten Bereichen innerhalb von tiefen Balken, in denen sich die Stützen überlappen, wodurch die Bereiche, in denen das Bernoulli-Prinzip bei Biegung auf den Balken zutrifft, aufgehoben werden. Folglich erfordert die Analyse von tiefen Balken die Anwendung von Streben- und Zugsimulationstechniken, wobei der Beton die Aufgabe übernimmt, Druckkräfte zu übertragen, während die Längsbewehrung die Zugkräfte aufnimmt.

Das mechanische Verhalten von Tiefbalken wird stark von ihren geometrischen Eigenschaften, Belastungsbedingungen und der vorhandenen Querbewehrung beeinflusst. In Stahlbetonkonstruktionen erfordern Tiefbalken aufgrund ihrer begrenzten Duktilität und unzureichenden Querbewehrung dringend Verstärkungsmaßnahmen.

Die Unfähigkeit, bestehende Infrastrukturen und Strukturen umfassend zu sanieren, hat die Entwicklung neuartiger Überwachungs- und Verstärkungsmethoden vorangetrieben. Diese innovativen Ansätze zielen darauf ab, die Mängel bestehender Stahlbetonstrukturen zu beheben und gleichzeitig ihre Belastbarkeit und Langlebigkeit angesichts dynamischer Belastungen und Umweltherausforderungen zu verbessern.

2. Vorgeschlagene Innovation und Ziel der Studie

In den letzten Jahrzehnten haben sich faserverstärkte Kunststoffe (FRP), die außen mit Epoxidharzen verklebt sind, als Standardlösungen für die Sanierung [17–19], Verstärkung, Aufrüstung und Reparatur von Stahlbetonkonstruktionen herausgestellt. Diese Anwendungen umfassen aufgrund ihrer unzähligen Vorteile verschiedene Strukturelemente [20], darunter schubverstärkte Balken [21,22], torsionsverstärkte Balken [23] und schubverstärkte Balken-Stützen-Unterbaugruppen [24].

Zu diesen Vorteilen zählen hohe Zugfestigkeit und Dauerfestigkeit, geringes Gewicht und außergewöhnliche Korrosionsbeständigkeit [25,26]. Insbesondere kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) zeichnen sich im Vergleich zu anderen FKV durch ihre überlegene Leistung in diesen Eigenschaften aus.

Darüber hinaus zeichnen sich CFKs durch eine hohe Steifigkeit aus, die es ihnen ermöglicht, den Bewehrungsanforderungen von Betonstrukturen gerecht zu werden und gleichzeitig die Verformung von Strukturelementen aufzunehmen [27]. Diese Eigenschaft verbessert ihre Eignung für Nachrüstungsanwendungen, bei denen die Aufrechterhaltung der strukturellen Integrität unter wechselnden Belastungsbedingungen von größter Bedeutung ist.

Trotz der zahlreichen Vorteile von FRP-Materialien bestehen jedoch Bedenken hinsichtlich ihrer Anwendung in realen Strukturumgebungen. Probleme wie vorzeitige Delamination

Es wurden Risiken wie Versagen und geringe Feuerbeständigkeit angesprochen, die bei ihrer Umsetzung sorgfältige Überlegungen erforderlich machten [28]. Die in der Grenzflächenzone zwischen dem FRP-Verbundwerkstoff und der Betonoberfläche beobachtete verringerte Kohäsion kann zu einer geringeren als der vorgesehenen Dehnungsreaktion führen und folglich die Nachrüsteffizienz der verwendeten FRPs aufgrund vorzeitiger Ablösung verringern [29,30].

Die Lösung dieser Probleme und die Optimierung der Leistungsfähigkeit von FRP-Materialien in Strukturanwendungen bleiben wichtige Forschungs- und Entwicklungsbereiche. Durch die Verbesserung der Grenzflächenbindungsfestigkeit, die Verbesserung der Feuerbeständigkeit und die Erforschung innovativer Nachrüsttechniken kann das volle Potenzial von FRP zur Verbesserung der Haltbarkeit und Belastbarkeit von Stahlbetonstrukturen ausgeschöpft werden.

Darüber hinaus hat umfangreiche Forschung in der vorhandenen Literatur durchgängig die vorherrschende Versagensart bei nachgerüsteten Stahlbetonelementen mit extern mit Epoxidharz verklebten FRP-Verbundwerkstoffen als vorzeitige Ablösung oder Delamination der FRP-Schicht vom Betonuntergrund identifiziert. Diese Versagensart wird typischerweise durch hohe Spannungskonzentrationen verursacht und ist mit Sprödbruch verbunden [31]. Dieses Phänomen tritt besonders häufig bei T-förmigen Stahlbetonelementen auf, die U-förmigen Verstärkungsschemata ausgesetzt sind, bei denen das Vorhandensein der Platte die Anwendbarkeit der FRP-Umwicklung um den Querschnitt einschränkt und die Zugänglichkeit für die ordnungsgemäße Umsetzung der Endverankerung begrenzt, wodurch das Risiko eines vorzeitigen Ablösungsversagens erhöht wird.

In diesem Zusammenhang untersuchten Chalioris et al. die potenziellen Vorteile einer neuartigen Verstärkungstechnik zur Steigerung der Schubtragfähigkeit und Verbesserung der Duktilität schubkritischer Stahlbetonträger [27]. Der Schwerpunkt der Studie lag auf der Querverstärkung ausschließlich mit C-FRP-Seilen. Für die Implementierung von C-FRP-Seilen wurden zwei verschiedene Konfigurationen untersucht: Embedded Through Section (ETS) für Balken mit rechteckigem Querschnitt und Near Surface Mounted (NSM) für T-förmige, geflanschte, tiefe Balken. In beiden Fällen lieferte die experimentelle Durchführung der angewandten Scherverstärkungstechnik vielversprechende Ergebnisse, da die untersuchten scherbereichen Balken letztendlich Biegeversagen aufwiesen. Diese Ergebnisse unterstreichen die Wirksamkeit des vorgeschlagenen Verstärkungsansatzes bei der Verbesserung der strukturellen Leistung von Stahlbeton-Tiefbalken und der Minderung des Risikos eines scherbedingten Versagens.

Daher erweist sich die Verwendung von C-FRP-Seilen zur Verstärkung der Scherfestigkeit von Stahlbetonbauteilen als vielversprechende Verstärkungstechnik. Die Vielseitigkeit der Verankerungsanordnungen für diese Seile ermöglicht die volle Ausnutzung ihrer hohen Zugfestigkeit und bietet Flexibilität bei nachträglichen Konstruktionsstrategien. Darüber hinaus können C-FRP-Seile in mehreren Konfigurationen eingesetzt werden, darunter in vorgekerbten Kerben entlang der Höhe des Trägers (NSM) [32,33] oder eingebettet durch den Steg des Trägers (ETS). Diese Anpassungsfähigkeit ermöglicht es den Ingenieuren, den Verstärkungsansatz an die spezifischen Anforderungen und Einschränkungen jedes Strukturelements anzupassen und so die Wirksamkeit der Verstärkungsmaßnahme zu maximieren.

Die vorgeschlagenen Techniken bieten zwar potenzielle Vorteile, doch aufgrund erheblicher Mängel sind weitere Untersuchungen erforderlich. Bisherige Forschungen konzentrierten sich vorwiegend auf die frühzeitige Erkennung von Schäden an epoxidgebundenen FRP-Verstärkungen und schlugen zerstörungsfreie Prüfmethoden (NDT) vor, insbesondere bei der Verstärkung von Stahlbetonstrukturen mit FRP-Verbundwerkstoffen. Viele dieser Methoden erweisen sich jedoch aufgrund struktureller Einschränkungen und der Notwendigkeit, den Schadensort im Voraus zu kennen, für große und komplexe Strukturen. Darüber hinaus sind die meisten ZfP-Ansätze durch zeitaufwändige Verfahren, hohe Kosten, Zugangsanforderungen vor Ort und einen Mangel an kontinuierlichen Echtzeitüberwachungsmöglichkeiten gekennzeichnet. Diese Einschränkungen unterstreichen den Bedarf an robusteren und vielseitigeren Techniken, um die Herausforderungen der Strukturüberwachung und Schadenserkennung effektiv anzugehen [16].

Wie oben hervorgehoben, stellt die Gewährleistung der nahtlosen Integration bestehender Strukturelemente mit Verstärkungsmaterialien eine vielschichtige Herausforderung dar, die mit Unsicherheiten behaftet ist. Daher wird die Überwachung der strukturellen Integrität nachgerüsteter Strukturelemente als vorteilhaft angesehen, um deren Lebensdauer sicher zu verlängern. Zahlreiche Forscher haben sich mit Techniken zur Überwachung der strukturellen Integrität (Structural Health Monitoring, SHM) befasst, die für Betonelemente anwendbar sind [34–36]. Untersuchungen, die sich speziell auf die

Beton mit eingearbeiteten synthetischen Makrofasern [37,38], FRP-Verbundwerkstoffe [39–41] sowie Untersuchungen zu C-FRP-verstärkten Strukturelementen sind in der Literatur relativ selten [42–45].

Während die Bedeutung von SHM für die Verbesserung der Haltbarkeit und Sicherheit von Betonkonstruktionen allgemein anerkannt ist, besteht hinsichtlich der Anwendung dieser Techniken auf faserverstärkten Beton und FRP-verstärkte Elemente weiterhin eine erhebliche Forschungslücke. Das Schließen dieser Lücke durch umfassende Untersuchungen von SHM-Methoden, die auf diese Materialien zugeschnitten sind, birgt großes Potenzial für die Weiterentwicklung des Bereichs der Strukturüberwachung und die Sicherstellung der langfristigen Leistungsfähigkeit nachgerüsteter Strukturen.

Die experimentelle Phase dieser Studie umfasste die Implementierung eines neuartigen Überwachungssystems an einem scherverstärkten Balken, der einer Vierpunkt-Biegebelastung ausgesetzt war, mit dem Ziel, die Wirksamkeit der C-FRP-Seilverstärkungstechnik zu beurteilen und zu bewerten. Die vorgeschlagene SHM-Methode verwendete ein auf elektromechanischer Impedanz (EMI) basierendes System, das mit piezoelektrischen Bleizirkonat-Titanat-Sensoren (PZT) für die drahtlose Impedanzüberwachung (WiAMS) ausgestattet war [46].

In diesem Versuchsaufbau wurden die Spannungsfrequenzreaktionen der entlang des Umfangs des C-FRP-Seils positionierten PZT-Patches unter unterschiedlichen Belastungsstufen aufgezeichnet. Diese Belastungsbedingungen entsprachen unterschiedlichen strukturellen Gesundheitszuständen oder Schadenszuständen. Darüber hinaus wurden Anstrengungen unternommen, den Beitrag der C-FRP-Seile zur Scherfestigkeit des Stahlbetonträgers quantitativ zu bewerten. Diese Bewertung wurde durch die Analyse statistischer Schadensindexwerte erleichtert, die aus den Überwachungsdaten abgeleitet wurden. Durch die Korrelation der Reaktion des Überwachungssystems mit den angewandten Belastungs- und strukturellen Gesundheitszuständen wurden wertvolle Erkenntnisse über die Leistung und Wirksamkeit der C-FRP-Seilverstärkungstechnik gewonnen.

Im Rahmen dieser experimentellen Studie bestand das Hauptziel darin, die Durchführbarkeit von EMI als angewandte SHM-Methode zur Überwachung der strukturellen Integrität, Wirksamkeit und Leistung von C-FRP-Seilen zu bewerten, die als Nachrüsttechnik in einem tiefen rechteckigen Träger verwendet werden. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden während der Installation piezoelektrische Sensoren neben den Seilen eingebettet. Die Spannungsreaktionen dieser PZTs im Frequenzbereich wurden dann bei verschiedenen Zuständen der angewandten Belastung und den entsprechenden strukturellen Gesundheitsbedingungen (Belastungsniveaus) erfasst.

Darüber hinaus wurde eine Bewertung der Leistung der Nachrüsttechnik bei den untersuchten Belastungsstufen durchgeführt. Diese Bewertung wurde anhand von Werten durchgeführt, die aus der Root Mean Square Deviation (RMSD) abgeleitet wurden, einem häufig verwendeten statistischen Schadensindex. Ein einzigartiger Aspekt dieser Studie ist die Entwicklung einer kombinierten Methodik, die die Reaktionen der in die C-FRP-Seile eingebetteten PZT-Patches während des Auszugstests als Basishomogenisierungsdaten einbezieht. Durch die Integration von Daten sowohl aus dem Versuchsaufbau als auch aus dem Auszugstest wurde eine umfassende Bewertung der Leistung des C-FRP-Seils unter verschiedenen Belastungsbedingungen erreicht.

3. Versuchsprogramm 3.1.

Eigenschaften des Tiefbalkens Der R-

Tiefbalken hatte über seine gesamte Länge einen rechteckigen Querschnitt mit den Maßen $L = 1,6$ m, $b = 150$ mm Breite und $h = 300$ mm Höhe. Die Längsbewehrung des R-Tiefbalkens war symmetrisch angeordnet und bestand aus $\varnothing 14$ -Stäben, die sowohl in der Druck- als auch in der Zugzone angebracht waren. Zusätzlich wurden Bügel von $\varnothing 8/50$ nur an den Enden des R-Tiefbalkens in der Nähe der Stützen angebracht, um die Längsbewehrung zu sichern und ein Abplatzen des Betons zu verhindern.

Die Schubspannweite des Trägers betrug $\bar{y} = 400$ mm, die gesamte Betondeckung 35 mm, was eine Nutzhöhe von 265 mm ergibt. Das daraus berechnete Schubverhältnis $\bar{y}/d$ beträgt 1,51. Auf der rechten Schubspannweite wurde ein eingliedriges C-FRP-Seil vertikal installiert, während das Seil auf der linken Schubspannweite in ein Bohrloch mit einer Neigung von ca. 52° eingeführt wurde. Beide Seile wurden als ETS-Bewehrung installiert. Alle Details des Trägers sind in Abbildung 1 dargestellt.

Füllen von Löchern mit Epoxidharz, um Hohlräume zu beseitigen und den Zusammenhalt der eingebetteten Materialien zu verbessern.

- Anwendung einer leichten Spannung auf das Ende der Seile, um die endgültige Verankerung zu erreichen Formation.

- Zugabe von mehr Epoxidharz auf die Oberfläche der Balken, um eine glattere Rillen.

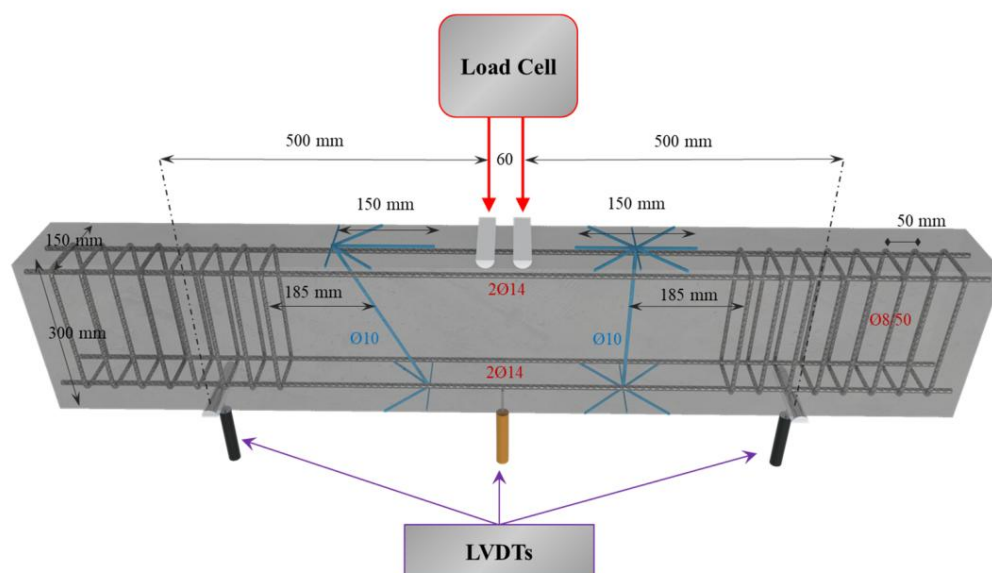


Abbildung 1. Geometrie- und Bewehrungsdetails des Trägers R-Deep Beam.

Die Installation des ETS-Prozesses für die C-FRP-Seile in „R-FRP“ verlief wie folgt:

3.2. Materialien

- Bildung der Quasten der Verankerung und Bohren der Löcher in den Steg des Balkens.
- Die Studie verwendete C-FRP-Seile aus unidirektionalen flexiblen Kohlenstofffasern. Die Angaben des Herstellers umfassten einen Querschnitt der Bohrlöcher von ca. 28 mm², eine Mindestdehnung vor dem Brechen von 1,6 % und eine Steifigkeit (E-Modul) von 240 GPa für die nicht imprägnierten Fasern.
- Epoxidharz imprägnierung des Seiles gemäß den technischen Daten des Herstellers

Anschließend wurde das Seil mit Epoxidharz (Sikadur-52, Sika) getränkt. • Füllung der Quastenrillen der Verankerung mit Epoxidharz. • C-FRP-Seile und darauf bestellte PZT-Verklebe Einfügungen in die Bohrlöcher. Ziel dieses Prozesses war es, verbessern die mechanischen Eigenschaften und die Haltbarkeit des C-FRP-Seils. Zusätzlich wird Epoxidharz Füllen von Löchern mit Epoxidharz, um Hohlräume zu beseitigen und die Kohärenz zwischen den Materialien zu verbessern. Zum Füllen und Abdichten der Rillen wurde eine Paste (Sikadur-330, Sika Hellas, Kryoneri, Griechenland) verwendet. Für den Versuchsaufbau wurden Löcher gebohrt, um eine ordnungsgemäße Haftung und strukturelle Integrität sicherzustellen.

- Zugabe von mehr Epoxidharz zur Oberfläche der Balken, um glattere Rillen zu erzielen.

3.2. Materialien

In der Studie wurde ein C-FRP-Seil verwendet, das aus unidirektionalen, flexiblen Kohlenstofffasern hergestellt wurde.

Die Angaben des Herstellers beinhalten einen Querschnitt von ca. 28 mm²

, eine Mindestdehnung vor dem Bruch von 1,6 % und eine Steifigkeit (Modul Elastizitätsgrenze) von 240 GPa für die unimprägnierten Fasern.

Anschließend wurde das Seil mit Epoxidharz (Sikadur-52, Sika Hellas Kryoneri, Griechenland) getränkt, mit den in Tabelle 1 aufgeführten Eigenschaften. Dieser Prozess zielte darauf ab, die mechanischen Eigenschaften und die Haltbarkeit des C-FRP-Seils. Zusätzlich wird Epoxidpaste (Sikadur-330, Sika Hellas, Kryoneri, Griechenland) wurde zum Füllen und Abdichten der Rillen verwendet

Für den Versuchsaufbau wurden Löcher gebohrt, um eine ordnungsgemäße Haftung und strukturelle Integrität sicherzustellen.

Zur Beurteilung der mechanischen Eigenschaften des Betons werden Standard-Betonzylinder mit Abmessungen von 150 mm Durchmesser und 300 mm Höhe wurden Druck- und Spaltfestigkeitsprüfungen unterzogen.

Am Tag der Prüfung betrug die durchschnittliche

Die gemessenen Druck- und Zugfestigkeiten betrugen 28,0 MPa bzw. 2,70 MPa.

Die in den Versuchen verwendete Betonmischung enthielt maximale Zuschlagstoffpartikel mit einem Durchmesser von 16 mm.

Die verformten Bewehrungsstäbe (Ø14 mm) hatten eine Streckgrenze von 580 MPa, während die Stahlbügel (Ø8 mm) hatten eine Streckgrenze von 310 MPa.

Die verformten Bewehrungsstäbe ($\bar{y}14$ mm) hatten eine Streckgrenze von 580 MPa, während die Stahlbügel ($\bar{y}8$ mm) hatten eine Streckgrenze von 310 MPa.

Mechanische Materialeigenschaften **Tabelle 1.** Mechanische Eigenschaften von C-FRP-Seilen:

~~3.3. Testaufbau~~

Abbildung 2. Ein hydraulischer Aktuator, der von einer servogesteuerten Maschine gesteuert wird, übt eine allmählich zunehmende Biegebelastung aus. Die Kraft, die auf die Oberfläche des Balkens durch zwei Biegepunkte aus den Balkenenden mit einer Maschinengesteuerung, vier kleine Stahlschrauben und ein Nylonband übertragen wird, die Oberseite des Balkens und die Unterseite aus. Karten werden so platziert, dass die Last (servogesteuerte Kraft) auf die Oberseite des Balkens durch zwei gleichmäßig verteilte 0,05-m-Nischen auf den Stahlschrauben. Der Balken wurde an seinen Enden durch zwei zusätzliche 0,05-m-Nischen auf jeder Seite. Eine Wägezelle mit hoher Präzision mit einer Genauigkeit von 0,05 kN, häufig als Variable Differenziale auf jeder Seite. Zur Lastmessung messen drei Sensoren, häufig als Variable Differenziale auf jeder Seite. Die aufzubringende Kraft mit höchster Genauigkeit wird durch die Auslenkungen der Balken durch hochempfindliche Wandler (LVDTs) eingesetzt.



Zusätzlich zur Lastmessung wurden drei Sensoren, nämlich lineare variable Differenzialwandler (LVDTs), eingesetzt, um die Auslenkungen der Balken zu messen.

Die EMI-Technik verwendet PZT-Wandler und nutzt die vorteilhaften Eigenschaften des piezoelektrischen Phänomens. Unter mechanischer Belastung können PZT-Wandler erzeugen eine oberflächliche elektrische Ladung, und umgekehrt induziert die Anwendung eines elektrischen Feldes mechanische Schwingung. Durch die Nutzung dieses Phänomens aktiviert und induziert die EMI Schwingungen in gebundenen oder eingebetteten PZT-Wandlern innerhalb einer Wirtsstruktur.

Die Änderung der mechanischen Impedanz der Struktur (oder der inversen Admittanz) spiegelt sich in Änderungen am extrahierten elektrischen Signal vom PZT (entweder in Spannung oder Frequenz Reaktion). Die Wechselwirkung zwischen dem PZT und der Wirtsstruktur wird dargestellt als Admittanzsignatur bestehend aus einem Realteil (Leitwert) und einem Imaginärteil (Suspensions-

mechanische Vibration. Durch Nutzung dieses Phänomens aktiviert und induziert die EMI Vibrationen in gebundenen oder eingebetteten PZT-Wandlern innerhalb einer Wirtsstruktur. Jede Änderung der mechanischen Impedanz (oder inversen Admittanz) der Struktur spiegelt sich in Änderungen des extrahierten elektrischen Signals vom PZT wider (entweder in der Spannung oder im Frequenzgang). Die Interaktion zwischen dem PZT und der Wirtsstruktur wird als

Admittanzsignatur dargestellt, die aus einem Realteil (Leitfähigkeit) und einem Imaginärteil (Suszeptanz) besteht. Diese Interaktionen manifestieren strukturelle Eigenschaften innerhalb der Signatur wie in Gleichung (2) für die komplexe Admittanz des befestigten PZT-Patches beschrieben durch Gleichung (2) für die komplexe Admittanz Y des befestigten PZT-Patches:

$$Y = G + Bj = 4\gamma j \quad (2)$$

$$Y = \frac{2}{H} \frac{1}{j\omega} + \frac{2d^2}{(1 - \gamma\gamma)} + \frac{2d^2}{(1 - \gamma\gamma)} \frac{Z_{s,eff}}{Z_{s,eff} + Z_{a,eff} V} + \frac{PanzerL}{kL} \quad (2)$$

wobei γ : harmonische Wechselspannung, die dem Stromkreis zugeführt wird, I : Strom, der durch PZT fließt, G : Leitwert (der Realteil der Admittanz), B : Suszeptanz (der Imaginärteil von wobei V : harmonische Wechselspannung, die dem Stromkreis zugeführt wird, I : Strom, der durch Admittanz), j : imaginäre Einheit, ω : Winkelfrequenz, L : halbe Länge des Patches, h : Dicke des Patches, d_{31} : piezoelektrischer Dehnungskoeffizient des PZT, $Z_{a,eff}$: Kurzschluss effektive mechanische Impedanz, $Z_{s,eff}$: effektive strukturelle Impedanz, n : Poissonzahl, k : Welle des Patches, d_{31} : piezoelektrischer Dehnungskoeffizient des PZT, $Z_{a,eff}$: kurzgeschlossene effektive Impedanz, $Z_{s,eff}$: effektive Strukturimpedanz, n : Poissonzahl, k : Wellenwiderstand der konstanten elektrischen Feld, und γ_{33} : komplexe elektrische Permittivität des PZT-Patches entlang der Achse bei konstanter Spannung, γ_{33} : komplexe elektrische Permittivität des PZT-Patches entlang der Achse bei ständigen Änderungen am Stahlbetonträger, wie z. B. Änderungen seiner Masse- und

Steifigkeitseigenschaften, führen zwangsläufig zu Änderungen der Strukturparameter und wirken sich folglich auf alle Änderungen am Stahlbetonträger, wie z. B. Änderungen seiner Masse- und Steifigkeitseigenheiten, die die effektive Strukturimpedanz. Diese Änderungen führen auch zu Änderungen der Strukturparameter und damit zu Änderungen der Admittanz gemäß Gleichung (2) und gibt damit den Gesundheitszustand des Elements an, die effektive Strukturimpedanz. Diese Änderungen führen auch zu Änderungen in der Admittanz Y , wie in Gleichung (2) definiert, und gibt dadurch den Funktionszustand des Elements an.

In dieser experimentellen Studie wurde der Ansatz zur Erkennung von Veränderungen der installierten

Bei den feststehenden C-FRP-Seilen wurden PZT-Wandler eingesetzt, die von einer sinusförmigen Harmonischen angeregt wurden. Bei den feststehenden C-FRP-Seilen wurden PZT-Wandler eingesetzt, die von einer sinusförmigen Harmonischen angeregt wurden. harmonische Spannung von 2,5 V innerhalb eines bestimmten Frequenzbereichs von 10 bis 250 kHz, Spannung von 2,5 V innerhalb eines bestimmten Frequenzbereichs von 10 bis 250 kHz, mit Schritten von 1 kHz pro Schritt. Die PZT-Wandler dienen sowohl als Aktuatoren als auch als Sensoren. Die Generatoren erzeugten das Spannungssignal und erfassten die EMI-Signaturen, die dann verarbeitet wurden. Dieses Gerät ist ein speziell entwickeltes drahtloses Gerät namens WiAMS [40,46] verarbeitet.

Das Gerät ist mit einer hohen Rechenleistung ausgestattet, die schnelle und umfangreiche Berechnungen ermöglicht, und ferngesteuert werden, wie in Abbildung 3 dargestellt. kann

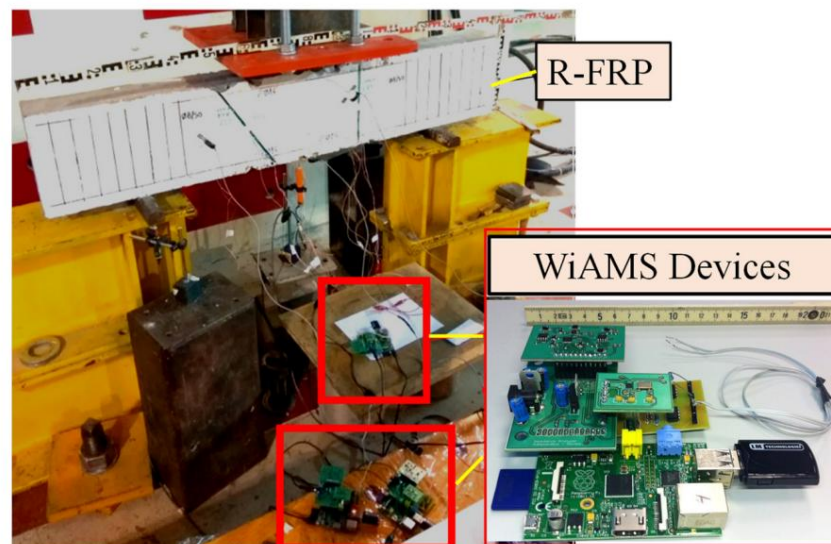


Abbildung 3. WiAMS-Gerät, wie vorgeschlagen, in der EMI-Methode.

Zu Beginn wurden EMI-Messungen am Strahl in seinem ursprünglichen Zustand durchgeführt. Zustand, wodurch eine Basislinie für den erklärten gesunden Zustand geschaffen wurde. Anschließend wurden diese Messungen unter verschiedenen potenziellen Schadensszenarien wiederholt, wobei Bedingungen simuliert wurden die die strukturelle Integrität beeinträchtigen könnten. Die erhaltenen Ergebnisse wurden dann sorgfältig verglichen, um Abweichungen anhand statistischer Kennzahlen zu bewerten, insbesondere des Mittelwerts Quadratische Abweichung (RMSD). Diese vergleichende Analyse ermöglichte die Erkennung und Bewertung struktureller Veränderungen und lieferte wertvolle Einblicke in den Gesundheitszustand des Strahls und Integrität unter verschiedenen Belastungsbedingungen. An dieser Stelle ist es erwähnenswert, dass

Die Messungen wurden unter verschiedenen potenziellen Schadensszenarien wiederholt, wobei Bedingungen simuliert wurden, die die strukturelle Integrität beeinträchtigen könnten. Die erhaltenen Ergebnisse wurden dann sorgfältig verglichen, um etwaige Abweichungen anhand statistischer Kennzahlen, insbesondere der quadratischen Mittelwertabweichung (RMSD), zu bewerten. Diese vergleichende Analyse ermöglichte die Erkennung und Bewertung struktureller Veränderungen, die wertvolle Einblicke in den Gesundheitszustand und die Integrität des Trägers unter verschiedenen Belastungsbedingungen liefert. An dieser Stelle ist es erwähnenswert, dass alle Spannungsmessungen unter kontrollierten Laborbedingungen durchgeführt wurden, um zu vermeiden, dass Störungen durch Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen zu vermeiden.

3.5. Installation von PZT-Patches

Der R-FRP-Strahl war mit identischen kleinen und dünnen PZT-Wandlern ausgestattet, die jeweils mit den Abmessungen $10 \times 10 \times 2$ mm. Diese PZT-Patches mit der Bezeichnung PIC151 wurden mit den Abmessungen $10 \times 10 \times 2$ mm hergestellt. Diese PZT-Patches mit der Bezeichnung PIC151 wurden mit den Abmessungen $10 \times 10 \times 2$ mm hergestellt. Die PZT-Patches wurden strategisch positioniert innerhalb der von der Firma PI Ceramics. Insgesamt zehn PZTs wurden strategisch positioniert innerhalb der Strahl in verschiedenen Konfigurationen, wie in Abbildung 2 dargestellt. Sechs PZTs (drei im Strahl platziert) in verschiedenen Konfigurationen, wie in Abbildung 2 dargestellt. Sechs PZTs (drei im vorderen, vorne und drei hinten) wurden extern mit Epoxidharz an kritischen mechanischen Stellen verklebt und drei hinten) wurden extern mit Epoxidharz an kritischen mechanischen Stellen verklebt an der Betonoberfläche, insbesondere an Stellen, die zu Biege- und Schubrisssen neigen, an der Betonoberfläche, insbesondere an Stellen, die zu Biege- und Schubrisssen neigen. Risse, bezeichnet als „X1–X6“. Zwei weitere PZTs wurden an die Stahlbewehrung geklebt, bezeichnet als „X1–X6“. Zwei weitere PZTs wurden an die Stahlbewehrung geklebt, mit wobei einer in der Mitte des Zugbewehrungsstabes (S2R) und der andere in der Mitte des Biegebewehrungsstabes (S1R). Die verbleibenden zwei PZT-Patches wurden sorgfältig auf den C-FRP-Seilen platziert. Die folgenden Verfahren angewendet: Die PZT-Patches wurden gleichzeitig mit folgenden Verfahren eingebettet: Die PZT-Patches wurden gleichzeitig mit folgenden Verfahren mit den Seilen, die in jedes Bohrloch eingeführt wurden. Jeder PZT-Patch wurde sicher an den Seilen befestigt, die in jedes Bohrloch eingeführt wurden. Jeder PZT-Patch wurde sicher an dem Seil befestigt das Seil gebunden, und die geschweißten Drähte wurden sorgfältig mit einem Epoxidkleber an eine Aufrollkomponente und ein Stahldraht, um die endgültige, vorgesehene Position des PZT-Patches sicherzustellen innerhalb des Lochs. Die Bindeposition wurde strategisch gewählt, so dass der PZT-Patch innerhalb des Lochs endete. Die Bindeposition wurde strategisch gewählt, so dass der PZT-Patch innerhalb des Lochs endete innen mit dem Bohrloch in der Mitte der Seildurchlaufänge verbunden. innen mit dem Bohrloch in der Mitte der Seildurchlaufänge verbunden. Stahldraht diente als Hilfsmittel zum Führen des Seils, des PZT-Patches und der Drähte durch das Loch, was entfernt wurde. Diese beiden Flicken wurden als W1 und W2 bezeichnet, das Loch, wie in Abbildung 2 dargestellt.



Abbildung 4. Einsetzen der PZT-Wandler in die mittels C-FRP-Seiten montierten Bohrlöcher.

4. Ergebnisse und Diskussion

4.1. Auszugstest

Um die Wirksamkeit des EMI-basierten SHM-Systems bei der Bewertung der Bindungsstärke zu beurteilen, Es wurde ein Auszugsversuch mit einer geraden Konfiguration zur Verankerung der C-FRP-Seile durchgeführt, ohne hervorstehendes Ende. In diesem Zusammenhang wurden kubische Betonproben hergestellt, um dienen als Aufnahme für die Verankerung, wie in Abbildung 5 dargestellt.

Dabei wurden die C-FRP-Seile mit einem geeigneten Harz imprägniert und anschließend Einsetzen in vorgebohrte Löcher in den Würfelproben. Das Verankerungsharz wurde zum Auffüllen der Löcher verwendet, um optimale Bindungsbedingungen zwischen dem Seil und dem Beton. Detaillierte Abmessungen der Würfelproben, einschließlich der Länge der eingebetteten und die Ankerkonfiguration sind in Abbildung 5 dargestellt. Diese Anordnung lieferte eine kontrollierte Umgebung zur Bewertung der Verbundfestigkeit zwischen den C-FRP-Seilen und

Um die Wirksamkeit des EMI-basierten SHM-Systems bei der Bewertung der Haftfestigkeit zu beurteilen, wurde ein Auszugsversuch mit einer geraden Konfiguration zur Verankerung der C-FRP-Seile ohne hervorstehende Enden durchgeführt. In diesem Zusammenhang dienten kubische Betonproben als Betonsubstrat, was eine genaue Beurteilung der Wirksamkeit des SHM ermöglichte. Die Betonproben wurden aus einer Betonmischung hergestellt, um als Wirt für die Verankerung zu dienen, wie in Abbildung 5 dargestellt. System 2 des Erkennungsprinzips zielt auf Bindungsdefekte oder einer Verschiebung und im Laufe der Zeit.

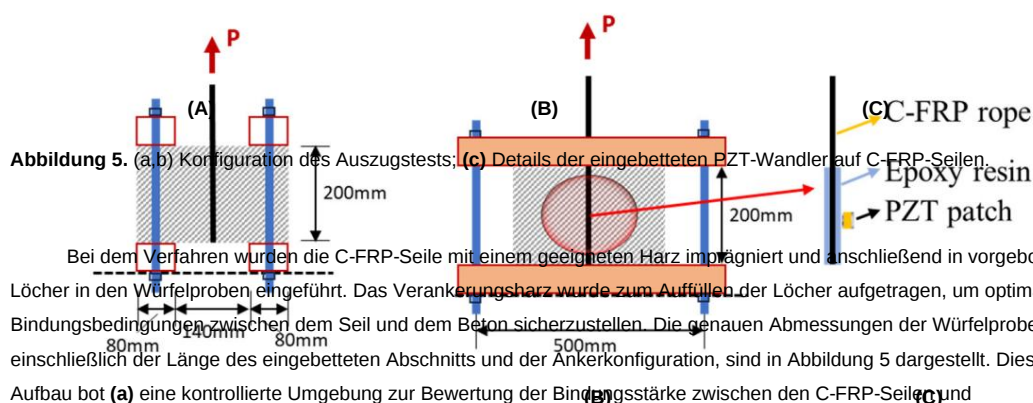


Abbildung 5. (a,b) Konfiguration für den Auszugstest; (c) Einzelheiten zu den eingebetteten PZT-Wandlern auf C-FRP

System zur Erkennung potenzieller Bindungsfehler oder einer Verschlechterung im Laufe der Zeit.

[illegible]

Dieser Aufbau bot eine kontrollierte Einbringung zur Beurteilung der Bindungsstärke zwischen den C-FRP-Seilen und dem Betonuntergrund und ermöglichte eine genaue Beurteilung der Wirksamkeit des SHM-Systems bei der Erkennung potenzieller Bindungsfehler oder einer Verschlechterung im Laufe der Zeit.



Abbildung 6. (a) Pullout - Testkonfiguration und WiAMS-Gerät ; **(b)** umgedrehte Ansicht des eingebetteten dedizierten PZT-Wandler auf der Konfiguration der C-FRP-Seile.

Darüber hinaus wurde ein strategisch platzierter PZT-Patch auf das Seil geklebt. Das Seil gab eine hohe Belastungsfähigkeit, was die Abbildung zu sehen ist. Dieser PZT-Patch spielte eine entscheidende Rolle bei der Überwachung und Erfassung der strukturellen Reaktion des Verankerungssystems und bietet wertvolle Erkenntnisse zum Verbindungsverhalten zwischen C-FRP-Seil und Betonuntergrund während des gesamten Auszugstests.

Das Spannungs-Frequenz-Diagramm zum Auszugsversuch ist in Abb. 6 dargestellt. **(a)** Konfiguration des Auszugsversuchs und WiAMS-Gerät; **(b)** Ansicht der Einbettung von oben nach unten. In einer schwarzen durchgezogenen Linie ist die Reaktion im ursprünglichen Zustand des C-FRP-Seils dediziert PZT-Wandler auf der Konfiguration der C-FRP-Seile.

Darüber hinaus wurde ein strategisch platzierter PZT-Patch auf das Seil geklebt und als „Dam1“ bzw. „Dam2“ bezeichnet. Darüber hinaus ist in der grünen durchgehenden das vorgebohrte Loch des Würfels, wie in Abbildung 60 dargestellt. Dieser PZT-Patch spielte eine entscheidende Rolle. Die Spannungsmessung im absteigenden Post-Peak-Stadium ist dargestellt und gekennzeichnet

als „Dam3“. Bei genauerer Betrachtung des Diagramms wurden erkennbare Abweichungen in der Reaktionskurven zwischen dem unbeschädigten Zustand und verschiedenen simulierten Schadensstufen

Abbildung 7. In einer schwarzen durchgehenden Linie ist die Reaktion im ursprünglichen Zustand des C-FRP-Seils dargestellt und als „Gesund“ gekennzeichnet. Darüber hinaus sind in cyanfarbenen und blauen durchgehenden Linien die Spannungsreaktionsmessungen im aufsteigenden Stadium und die Spitzenzugfestigkeit dargestellt und als „Dam1“ bzw. „Dam2“ gekennzeichnet. Darüber hinaus ist in der grünen durchgehenden Linie die Spannungsmessung im absteigenden Nachspitzenstadium dargestellt und bezeichnet als „Dam3“. Bei genauerer Betrachtung des Diagramms wurden in den Antwortkurven zwischen dem unbeschädigten Zustand und verschiedenen simulierten Schadensstufen im Frequenzbereich von 120–250 kHz erkennbare Abweichungen festgestellt. Diese Beobachtung unterstreicht die im Frequenzbereich von 120–250 kHz. Diese Beobachtung unterstreicht die Fähigkeit der Sensoren, Enthäftungsbedingungen oder das Versagen der C-FRP-Seile zu erkennen. Die Mag-Grad der Sprungänderung in der Gesamtantwort des PZT über den angegebenen Frequenzbereich. Grad der Sprungänderung in der Gesamtantwort des PZT über den angegebenen Frequenzbereich. Bereich zeigt das Ausmaß des Versagens an. Diese Abweichungen im Spannungs-Frequenz-Diagramm geben wertvolle Einblicke in die strukturelle Integrität des Verankerungssystems und ermöglichen die

die Erkennung potenzieller Bindungsfehler oder Degradationen während des Auszugstests. die Erkennung potenzieller Bindungsfehler oder Degradationen während des Auszugstests.

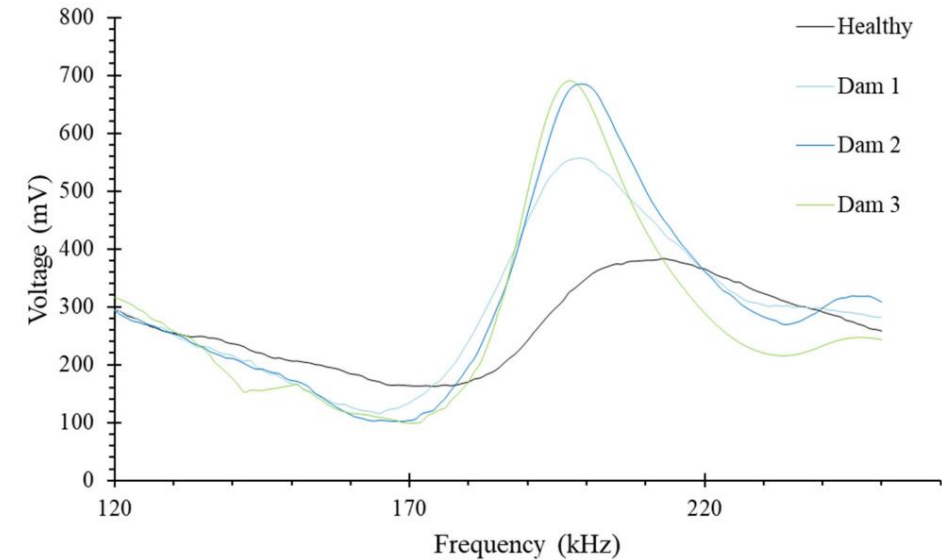


Abbildung 7. Spannungsreaktion von PZT beim Auszugstest des C-FRP-Seils. Abbildung 7. Spannungsreaktion von PZT beim Auszugstest des C-FRP-Seils.

4.2. Tiefenstrahl-Belastungstest

4.2. Belastungstest für tiefe

Träger Die umfassende Leistung des Trägers mit rechteckigem Querschnitt , dargestellt durch die Kurven, die die aufgebrachte Last gegenüber der Durchbiegung in der Mitte darstellen, ist in

Abbildung 8 dargestellt. Eine detaillierte Analyse des Gesamtverhaltens dieser Balken befindet sich in der Mitte der früheren Untersuchung von Chalioris et al. [27]. Darüber hinaus ist das Rissmuster

REVIEW einer Balkenoberfläche vor Risslasten auch [27] Abbildung 8 dargestellt ist, das beim Versagen der Balken zu sehen ist. Die zusätzlichen Einblicke in die strukturelle Reaktion unter unterschiedlichen Belastungsbedingungen gewähren zusätzliche Einblicke in die strukturelle Reaktion unter unterschiedlichen Belastungsbedingungen.

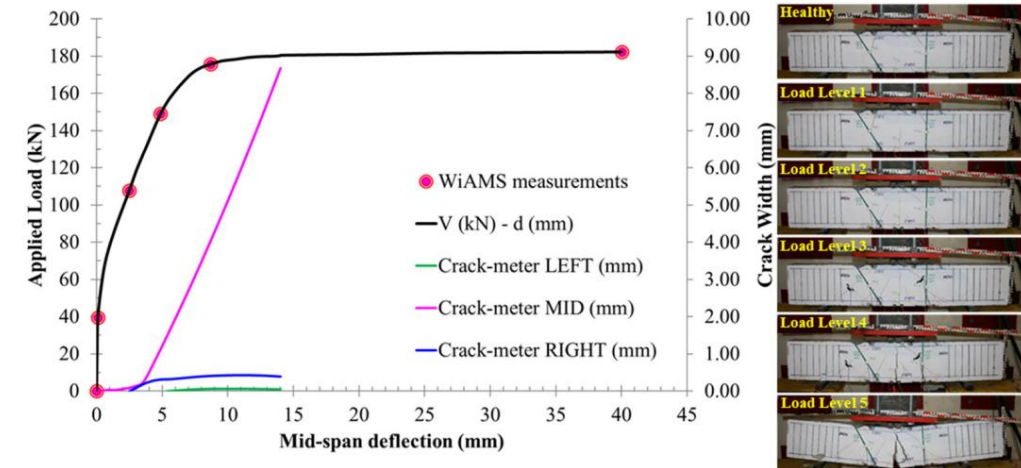


Abbildung 8. Rissmuster und experimentelles Verhalten der R-FRP-Probe. Abbildung 8. Rissmuster und experimentelles Verhalten der R-FRP-Probe.

4.3. Datenanalyse

Die statistische Analyse der EM-Signaturen kann ein wertvolles Werkzeug sein, um Veränderungen in EM-Signalen zwischen dem ursprünglichen Zustand und nachfolgenden Bedingungen in Stress-Indexmetriken umgewandelt. Somit werden die erfassten Spannungsreaktionen in diesem Kontext mithilfe des statistischen Index RMSD analysiert und ausgewertet. Der Ausdruck des Index ist unten in Gleichung (3) angegeben.

wurden in diesem Zusammenhang analysiert und mithilfe des statistischen Index RMSD ausgewertet. Der Ausdruck des Index ist unten in Gleichung (3) angegeben.

$$\text{RMSD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \left(V_p(\text{fr})_{\tilde{y}_D} - V_p(\text{fr})_0 \right)^2}{M}}$$

$$\text{wobei sich } V_p(\text{fr})_0 \text{ bezieht auf die Spannungsantwort im ursprünglichen Zustand, während } V_p(\text{fr})_D \text{ auf die Spannungsreaktionen in jedem nachfolgenden Zustand bezieht.}$$

(3)

4.4. Bewertung der Wirksamkeit der Nachrüsttechnik

Basierend auf den Ergebnissen des Auszugstests und den ermittelten RMSD-Indexwerten bei bestimmten Belastungsstufen bis zum endgültigen Bruch des C-FRP-Seils (siehe Abbildung 9) wurde versucht, die Restscherfestigkeit zu bewerten. Diese Bewertung wurde mithilfe eines homogenisierenden Ansatzes durchgeführt, bei dem die RMSD-Werte des Auszugstests mit denen des tiefen Trägers korreliert wurden.

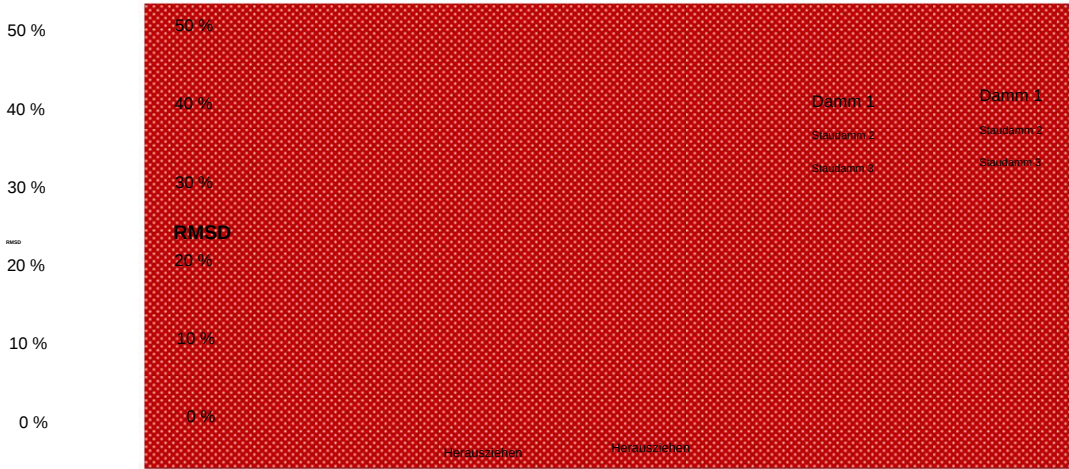


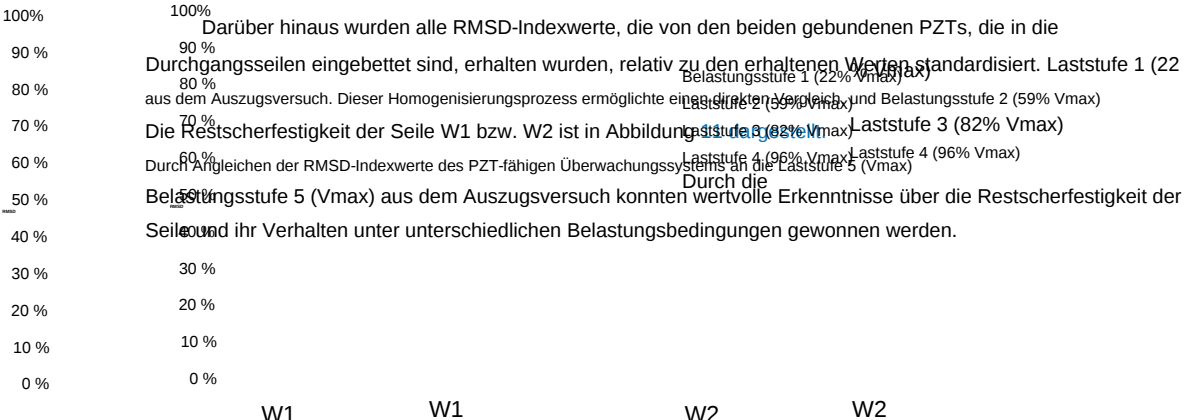
Abbildung 9. RMSD-Werte des PZT beim Auszugstest des C-FRP-Seils.

Die aufgezeichnete maximale Auszugslast war ungefähr 27 kN, was einer Seilverschiebung von 30 mm bei Durchgangsseile im Versagenszustand des Auszugstests entspricht. Dieser Homogenisierungsprozess ermöglichte einen direkten Vergleich und stellte das Totalversagen dar. Umgekehrt sind die 100 % RMSD-Werte am Punkt des Verlusts der Restscherfestigkeit der Seile W1 bzw. W2 in und der vollständige Verlust der Zugfestigkeit untrennbar miteinander verbunden sind. Durch diese Ausrichtung der RMSD-Indexwerte des PZT-fähigen Überwachungssystems an denen, die aus dem Auszugstest gewonnen wurden, wurden wertvolle Erkenntnisse über die Restscherfestigkeit der Seile gewonnen, wie in Abbildung 10 dargestellt.

Abbildung 10 bestätigt diesen Ansatz weiter.



Abbildung 10. Endgültiger Versagensmodus des C-FRP-Seils.



Condition	Laststufe 1 (22% Vmax)	Laststufe 2 (59% Vmax)	Laststufe 3 (82% Vmax)	Laststufe 4 (96% Vmax)	Belastungsstufe 5 (Vmax)
W1	91%	80%	63%	59%	46%
W2	95%	30%	24%	21%	17%

Im Abbildung 11 kann die allmähliche Reduzierung der Scherfestigkeit des W1-Seils beobachtet werden, was in erster Linie auf die Bildung des ersten Scherrisses im rechten Feld zurückzuführen ist. Mit zunehmender Belastung weitete sich dieser Riss weiter aus, was dazu führte, dass der Beton absorbierte. einen erheblichen Teil der entwickelten Scherspannungen . Folglich ist der Beitrag von Seil rechts Seil nach umgekehrt nach umgekehrt Stellung des Seils W2 W2 was sich im Bereich der Begrenzungen der Rissbildung sich im Bereich der erwies Diese Beobachtung wird durch das Rissmuster in Abbildung 8 bestätigt , wo es offensichtlich ist. dass sich der erste Riss im Bereich der Belastung des Seils W1 gebildet hat.

Um die Wirksamkeit der innovativen Verstärkungstechnik weiter zu bewerten, wurde das von Mofidi et al. [47] vorgeschlagene analytische Modell angewendet, um den Beitrag der Seile zu berechnen zur Gesamtschubfestigkeit des Balkens im Versagenszustand. Darüber hinaus ist es wichtig sicherzustellen, dass Die effektive Dehnung der C-FRP-Seile darf 0,4 % nicht überschreiten, um eine ausreichende Verzahnung der Die Zuschlagstoffe des Betons und das Auffangen von Rissöffnungen werden gemäß der Empfehlung von ACI 440.2R-08 [48] gemessen.

Darüber hinaus wird angenommen, dass die mittlere Laminatzugfestigkeit des Seil war ca. 2000 N/mm² , Die Gesamtrestscherscherfestigkeit für Seil W1 betrug berechnet als $V_{f,ETS, \text{Rope}} = 31,8 \text{ kN}$. Ebenso für Seil W2 wurde die Restscherscherfestigkeit berechnet als $V_{f,ETS, \text{Rope}} = 49,2 \text{ kN}$, was eine bemerkenswerte Nähe von 92,3 % zur analytischen Berechnungsergebnissen. Diese Erkenntnisse unterstreichen die Wirksamkeit der vorgeschlagenen Verstärkungstechnik und heben ihr Potenzial für eine genaue Schätzung der verbleibenden Scherfestigkeit in realen Anwendungen.

In diesem experimentellen Projekt wird die Wirksamkeit eines innovativen Verstärkungstechnik unter Verwendung von C-FRP-Seilen als Schubquerbewehrung durchgeführt. Diese Bewertung wurde durch die Implementierung einer EMI-basierten Methode durchgeführt ermöglicht durch PZT-Sensoren. Zusätzlich wird eine modifizierte Anwendung der statistischen Indexmetrik RMSD wurde eingesetzt, um die Wirksamkeit der Stärkungstechnik zu bewerten.

Im Gegensatz zur herkömmlichen Verwendung des RMSD-Index zur Darstellung von Schadenshöhen oder Belastungseinwirkungen wurden in dieser Studie die 100%-RMSD-Indexwerte zur Darstellung der Restscherkräfte verwendet.

Festigkeitskapazität. Dieser neuartige Ansatz bewertete die Leistung der Verstärkungstechnik und zeigte eine vielversprechende Konvergenz und Präzision mit den analytischen Vorhersagen. Diese vergleichende Analyse verbessert das Verständnis der Wirksamkeit der Verstärkungstechnik und liefert wertvolle Daten für die weitere Optimierung und Verfeinerung struktureller Verstärkungsstrategien.

Darüber hinaus bieten die mit der angewandten EMI-basierten Methode erzielten Ergebnisse eine bedeutende Möglichkeit, als zuverlässiges Zusatzinstrument für die Diagnose von Schadensdefekten und die Bewertung der Wirksamkeit faserbasierter Materialien in Echtzeitszenarien zu dienen. Es ist anzumerken, dass das Vorhandensein von Epoxidharz in den Bohrlöchern die Genauigkeit der mit dem EMI-basierten PZT- Ansatz erzielten Versuchsergebnisse leicht beeinträchtigen kann.

Obwohl diese Studie eine vielversprechende Übereinstimmung mit analytischen Vorhersagen hinsichtlich des Beitrags des Seils zur Scherfestigkeit zeigt, sind weitere experimentelle Arbeiten erforderlich, um die Genauigkeit der vorgeschlagenen Bewertungsmethode weiter zu bewerten und zu verbessern. Durch die Durchführung weiterer Experimente soll die Robustheit und Zuverlässigkeit dieses neuartigen Ansatzes für Anwendungen im realen Maßstab sichergestellt und so das Feld der Techniken zur Strukturverstärkung vorangebracht werden.

Beiträge der Autoren: Konzeptualisierung, NAP, MCN und GMS; Methodik, NAP und MCN; formale Analyse, NAP und GMS; Untersuchung, CEC, NAP und GMS; Datenkuratierung, NAP und MCN; Schreiben – Vorbereitung des Originalentwurfs, NAP und MCN; Schreiben – Überprüfung und Bearbeitung, NAP und CEC; Visualisierung, MCN; Überwachung, CEC. Alle Autoren haben die veröffentlichte Version des Manuskripts gelesen und stimmen ihr zu.

Finanzierung: Diese Forschung erhielt keine externe Finanzierung.

Datenverfügbarkeitserklärung: Die in der Studie vorgestellten Originalbeiträge sind im Artikel enthalten, weitere Anfragen können an den/die entsprechenden Autor(en) gerichtet werden.

Interessenkonflikte: Die Autoren erklären, dass keine Interessenkonflikte bestehen.

Verweise

1. Zhang, T.; Visintin, P.; Oehlers, DJ Scherfestigkeit von Stahlbetonträgern mit Stahlbügeln. *J. Struct. Eng.* **2016**, *142*, 04015135. [\[CrossRef\]](#)
2. Zararis, PD Schub-Druck-Versagen in Stahlbeton-Tiefbalken. *J. Struct. Eng.* **2003**, *129*, 544–553. [\[CrossRef\]](#)
3. Godat, A.; L'Hady, A.; Chaallal, O.; Neale, KW Bindungsverhalten der ETS FRP-Stabscherverstärkungsmethode. *J. Compos. Constr.* **2012**, *16*, 529–539. [\[CrossRef\]](#)
4. Azam, R.; Soudki, K.; West, JS; Noël, M. Verhalten von scherkritischen Stahlbetonträgern, verstärkt mit CFRCM. *J. Compos. Constr.* **2018**, *22*, 04017046. [\[CrossRef\]](#)
5. Karayannis, CG; Sirkelis, GM Verstärkung und Sanierung von Stahlbetonträger-Stützenverbindungen mit Carbon-FRP-Ummantelung und Injektion von Epoxidharz. *Earthq. Engng Struct. Dyn.* **2008**, *37*, 769–790. [\[CrossRef\]](#)
6. Karayannis, CG; Naoum, MC Torsionsverhalten mehrstöckiger Stahlbetonrahmenkonstruktionen aufgrund asymmetrischer seismischer Wechselwirkung. *Eng. Struct.* **2018**, *163*, 93–111. [\[CrossRef\]](#)
7. Tsonos, AG Wirksamkeit von CFK-Ummantelungen bei der Nachrüstung von Träger-Stützen-Unterbaugruppen nach und vor Erdbeben. *Struct. Eng. Mech.* **2007**, *27*, 393–408. [\[CrossRef\]](#)
8. Lampropoulos, AP; Dritsos, SE Modellierung von Stahlbetonstützen, die mit Stahlbetonmänteln verstärkt sind. *Earthq Engng Struct Dyn* **2011**, *40*, 1689–1705. [\[CrossRef\]](#)
9. Ma, C.-K.; Apandi, NM; Sofrie, CSY; Ng, JH; Lo, WH; Awang, AZ; Omar, W. Reparatur und Sanierung von Betonkonstruktionen mittels Einschluss: Eine Übersicht. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *133*, 502–515. [\[CrossRef\]](#)
10. Azam, R.; Soudki, K.; West, JS; Noël, M. Verstärkung schubkritischer Stahlbetonträger: Alternativen zu extern verklebten CFK- Platten. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *151*, 494–503. [\[CrossRef\]](#)
11. Ferreira, D.; Oller, E.; Marí, A.; Bairán, J. Numerische Analyse von scherkritischen Stahlbetonträgern, die mit FRP-Platten scherverstärkt sind. *J. Compos. Constr.* **2013**, *17*, 04013016. [\[CrossRef\]](#)
12. Baggio, D.; Soudki, K.; Noël, M. Verstärkung von schubkritischen Stahlbetonträgern mit verschiedenen FRP-Systemen. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *66*, 634–644. [\[CrossRef\]](#)
13. Aguilar, V. Scherfestigkeit von Betonbauteilen: Herausforderungen, aktuelle Entwicklungen und Möglichkeiten. *Adv. Civ. Eng. Technol.* **2020**, *4*, 1–2.
14. İsyk, E.; Ulutaş, H.; Harirchian, E.; Avcil, F.; Aksoylu, C.; Arslan, MH Leistungsbasierte Bewertung von Stahlbetongebäuden mit kurzen Stützen aufgrund unterschiedlicher Konstruktionsprinzipien. *Buildings* **2023**, *13*, 750. [\[CrossRef\]](#)

15. Pan, Z.; Li, B. Bewertung von Scherfestigkeits-Bemessungsmethoden für schlanke, scherkritische Stahlbetonträger. *J. Struct. Eng.* **2013**, *139*, 619–622. [\[CrossRef\]](#)
16. Papadopoulos, NA; Naoum, MC; Sapidis, GM; Chalioris, CE Rissbildung und Faserablösungserkennung von mit C-FRP-Seilen verstärkten Betontiefbalken gegen Scherung unter Verwendung eines Echtzeit-Überwachungssystems. *Polymers* **2023**, *15*, 473. [\[CrossRef\]](#)
17. Bilotta, A.; Ceroni, F.; Di Ludovico, M.; Nigro, E.; Pecce, M.; Manfredi, G. Verbundwirkungsgrad von EBR- und NSM-FRP-Systemen zur Verstärkung von Betonbauteilen. *J. Compos. Constr.* **2011**, *15*, 757–772. [\[CrossRef\]](#)
18. Seo, S.-Y.; Feo, L.; Hui, D. Bindungsstärke von oberflächennah montierten FRP-Platten zur Nachrüstung von Betonkonstruktionen. *Kompositionsstruktur.* **2013**, *95*, 719–727. [\[CrossRef\]](#)
19. Breveglieri, M.; Aprile, A.; Barros, JAO Eingebettete Querprofil-Scherverstärkungstechnik mit Stahl- und CFRP-Stangen in Stahlbetonträgern mit unterschiedlichem Anteil vorhandener Bügel. *Compos. Struct.* **2015**, *126*, 101–113. [\[CrossRef\]](#)
20. Li, P.; Wang, H.; Nie, D.; Wang, D.; Wang, C. Eine Methode zur Analyse der Langzeithaltbarkeit von unterirdischen Stahlbeton-Durchlassstrukturen unter gekoppelten mechanischen und Umweltbelastungen. *J. Intell. Constr.* **2023**, *1*, 9180011. [\[Querverweis\]](#)
21. Said, M.; Adam, MA; Mahmoud, AA; Shanour, AS Experimentelle und analytische Scherbewertung von mit glasfaserverstärkten Polymerstäben verstärkten Betonbalken. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *102*, 574–591. [\[CrossRef\]](#)
22. Naoum, M.; Sapidis, G.; Papadopoulos, N.; Golias, E.; Chalioris, C. Strukturelle Gesundheitsüberwachung von Stahlbetonträger-Stützenverbindungen mit piezoelektrischen Wandlern. In *Proceedings der Internationalen RILEM-Konferenz zur Synergie von Fachwissen für Nachhaltigkeit und Robustheit von zementbasierten Materialien und Betonstrukturen*, Milos, Griechenland, 14.–16. Juni 2023; J Jędrzejewska, A., Kanavaris, F., Azenha, M., Benboudjema, F., Schlicke, D., Hrsg.; RILEM-Buchreihe. Springer Nature: Cham, Schweiz, 2023; Band 43, S. 945–956. [\[CrossRef\]](#)
23. Turner, L.; Davies, VC Normal- und Stahlbeton bei Torsion, insbesondere im Hinblick auf Stahlbetonträger. *Sel. Eng. Pap.* **1934**, *1*, 165. [\[CrossRef\]](#)
24. Chalioris, CE; Papadopoulos, NA; Sapidis, G.; Naoum, MC; Golias, E. EMA-basierte Überwachungsmethode für verstärkte Balken-Stützen-Verbindungen. In *Proceedings der International ISCRAM Conference*, Omaha, NE, USA, 28.–31. Mai 2023; S. 853–873. [\[Querverweis\]](#)
25. Alam, P.; Mamalis, D.; Robert, C.; Floreani, C.; Brádaigh, CMÓ. Die Ermüdung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen – eine Übersicht. *Compos. Part B Eng.* **2019**, *166*, 555–579. [\[CrossRef\]](#)
26. Zhu, X.; Abe, H.; Hayashi, D.; Tanaka, H. Verhaltenseigenschaften von Stahlbetonträgern mit ungleichmäßiger Korrosion entlang der Verstärkung. *J. Intell. Constr.* **2023**, *1*, 9180019. [\[CrossRef\]](#)
27. Chalioris, C.; Kosmidou, P.-M.; Papadopoulos, N. Untersuchung einer neuen Verstärkungstechnik für Stahlbetonträger mit Carbon-FRP-Seile als Querverstärkungen. *Fibers* **2018**, *6*, 52. [\[CrossRef\]](#)
28. Bazli, M.; Abolfazli, M. Mechanische Eigenschaften von faserverstärkten Polymeren bei erhöhten Temperaturen: Ein Überblick. *Polymere* **2020**, *12*, 2600. [\[CrossRef\]](#)
29. Kytinou, VK; Gribniak, V.; Zapris, AG; Chalioris, CE Ein innovativer Gesundheitsüberwachungsansatz zur Diagnose der Ablösung von faserverstärkten Polymeren durch Auszugs- und Schertests. In *Analytische und experimentelle Methoden im Maschinenbau und Bauingenieurwesen*; Springer: Cham, Schweiz, 2024; Band 28, S. 228–239. [\[CrossRef\]](#)
30. Ju, S.; Li, D.; Jia, J. Experimentelle Untersuchung und Schadensbewertung einer neuartigen Bindungsverankerung für Kohlenstofffasern Verstärkte Polymerseilen. *J. Civ. Struct. Health Monit.* **2023**, *13*, 117–132. [\[CrossRef\]](#)
31. El-Sisi, AA; El-Emam, HM; El-Kholy, AE-MI; Ahmad, SS; Sallam, HM; Salim, HA Strukturelles Verhalten von Stahlbetonträgern mit unbewehrten Bohrröhrungen mit und ohne CFRP-Verstärkung. *Polymers* **2022**, *14*, 2034. [\[CrossRef\]](#)
32. Baena, M.; Jahani, Y.; Torres, L.; Barris, C.; Perera, R. Biegeverhalten und Vorhersage der Endablösung von mit NSM Carbon FRP verstärkten Stahlbetonträgern bei unterschiedlichen Betriebstemperaturen. *Polymers* **2023**, *15*, 851. [\[CrossRef\]](#)
33. Perera, R.; Gil, A.; Torres, L.; Barris, C. Diagnose der NSM FRP-Bewehrung in Beton mithilfe von Modellen mit gemischten Effekten und EMI-Ansätze. *Compos. Struct.* **2021**, *273*, 114322. [\[CrossRef\]](#)
34. Pellone, L.; Ciminello, M.; Mercurio, U.; Apuleo, G.; Concilio, A. Ein Strukturüberwachungssystem zur Erkennung von Verbindungslinienfehlern an einem Demonstrator für Flügelkastenabschnitte in Originalgröße. *Appl. Mech.* **2024**, *5*, 36–57. [\[CrossRef\]](#)
35. Ai, D.; Mo, F.; Yang, F.; Zhu, H. Elektromechanische Impedanz-basierte Erkennung von Betonstrukturschäden mittels Hauptkomponentenanalyse in Kombination mit einem neuronalen Netzwerk. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **2022**, *33*, 2241–2256. [\[CrossRef\]](#)
36. Ai, D.; Zhang, D.; Zhu, H. Schadenslokalisierung an Stahlbetonplattenkonstruktionen mittels elektromechanischer Impedanztechnik und wahrscheinlichkeitsgewichtetem Bildgebungsalgorithmus. *Constr. Build. Mater.* **2024**, *424*, 135824. [\[CrossRef\]](#)
37. Sapidis, GM; Kansizoglou, I.; Naoum, MC; Papadopoulos, NA; Chalioris, CE Ein Deep-Learning-Ansatz zur autonomen Identifizierung von Druckschäden in faserverstärktem Beton unter Verwendung piezoelektrischer Blei-Zirkonat-Titanat-Wandler. *Sensoren* **2024**, *24*, 386. [\[CrossRef\]](#)
38. Wang, Z.; Chen, D.; Zheng, L.; Huo, L.; Song, G. Einfluss der axialen Belastung auf die elektromechanische Impedanz (EMI) von eingebetteten Piezokeramische Wandler in Stahlfaserbeton. *Sensors* **2018**, *18*, 1782. [\[CrossRef\]](#)
39. Naoum, MC; Papadopoulos, NA; Voutetaki, ME; Chalioris, CE Strukturelle Zustandsüberwachung von faserverstärkten Betonprismen mit Polyolefin-Makrofasern unter Verwendung eines piezoelektrischen Materialnetzwerks unter verschiedenen lastinduzierten Spannungen. *Buildings* **2023**, *13*, 2465. [\[CrossRef\]](#)

40. Naoum, MC; Sapidis, GM; Papadopoulos, NA; Voutetaki, ME Eine elektromechanische, auf Impedanz basierende Anwendung der Echtzeitüberwachung der lastbedingten Biegespannung und -schädigung in faserverstärktem Beton. *Fibers* **2023**, *11*, 34. [\[Querverweis\]](#)
41. Khatir, A.; Capozucca, R.; Kathir, S.; Magagnini, E.; Benaissa, B.; Cuong-Le, T. Eine effiziente verbesserte Gradientenverstärkung für Dehnung Vorhersage in NSM FRP-verstärktem Stahlbetonträger. *Front. Struct. Civ. Eng.* 2024, im Druck.
42. Reddy, PN; Kavyateja, BV; Jindal, BB Methoden zur Überwachung der Strukturintegrität, Faserdispersion, mikro- und makrostrukturelle Eigenschaften, Sensorik und mechanische Eigenschaften von selbstsensorischem Beton – eine Übersicht. *Struct. Concr.* **2021**, *22*, 793–805. [\[CrossRef\]](#)
43. Perera, R.; Huerta, MC; Baena, M.; Barris, C. Analyse von mit FRP verstärkten Stahlbetonträgern mittels elektromechanischer Impedanztechnik und digitalem Bildkorrelationssystem. *Sensors* **2023**, *23*, 8933. [\[CrossRef\]](#)
44. Li, D.; Zhou, J.; Ou, J. Schäden, zerstörungsfreie Prüfung und Sanierung von FRP-Verbund-Stoffstrukturen: Eine Übersicht. *Konstr. Bau. Mater.* **2021**, *271*, 121551. [\[CrossRef\]](#)
45. Khatir, A.; Capozucca, R.; Khatir, S.; Magagnini, E.; Benaissa, B.; Le Thanh, C.; Wahab, MA Ein neuer Hybrid-PSO-YUKI für Double Risserkennung in CFK-Auslegerträgern. *Compos. Struct.* **2023**, *311*, 116803. [\[CrossRef\]](#)
46. Providakis, C.; Tsistrakis, S.; Voutetaki, M.; Tsompanakis, J.; Stavroulaki, M.; Agadakos, J.; Kampianakis, E.; Pentis, G.; Liarakos, E. Eine innovative aktive Sensorplattform zur drahtlosen Schadensüberwachung von Betonstrukturen. *Curr. Smart Mater.* **2016**, *1*, 49–62. [\[CrossRef\]](#)
47. Mofidi, A.; Chaallal, O.; Benmokrane, B.; Neale, K. Experimentelle Tests und Designmodell für Stahlbetonträger mit Scherverstärkung Verwendung der Embedded Through-Section FRP-Methode. *J. Compos. Constr.* **2012**, *16*, 540–550. [\[CrossRef\]](#)
48. ACI (American Concrete Institute). Leitfaden für die Konstruktion und den Bau von außen verklebten FRP-Systemen zur Betonverstärkung Strukturen; ACI-440.2R-08; American Concrete Institute (ACI): Farmington Hills, MI, USA, 2008; S. 76.

Haftungsausschluss/Anmerkung des Herausgebers: Die in allen Veröffentlichungen enthaltenen Aussagen, Meinungen und Daten sind ausschließlich die der einzelnen Autoren und Mitwirkenden und nicht die von MDPI und/oder den Herausgebern. MDPI und/oder die Herausgeber lehnen jegliche Verantwortung für Personen- oder Sachschäden ab, die aus den im Inhalt erwähnten Ideen, Methoden, Anweisungen oder Produkten resultieren.