



Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

Potentiale von nichtmetallischer Bewehrung im Infrastruktur-Betonbau NIMETBEW

Ein Projekt finanziert im Rahmen der Verkehrsinfrastrukturforschung 2019 (VIF 2019)

Mai 2022



1

[NIMETBEW]







Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung: Bundesministerium für Klimaschutz Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien Radetzkystraße 2 1030 Wien

ÖBB-Infrastruktur AG Praterstern 3 1020 Wien

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft Rotenturmstraße 5-9 1010 Wien

Für den Inhalt verantwortlich:

Universität für Bodenkultur Wien Institut für Konstruktiven Ingenieurbau Peter-Jordan-Straße 82 1190 Wien

Technische Universität Wien Institut für Tragkonstruktionen / Betonbau Paniglgasse 16 1040 Wien

Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH Thematische Programme Sensengasse 1 1090 Wien



[NIMETBEW]



2

ŐВВ INFRA

ASFINAG

💳 Bundesministerium

Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität,

Innovation und Technologie





Potentiale von nichtmetallischer Bewehrung im Infrastruktur-Betonbau NIMETBEW

Ein Projekt finanziert im Rahmen der

Verkehrsinfrastrukturforschung

(VIF2019)

AutorInnen:

BOKU Wien: Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Benjamin KROMOSER Dipl.-Ing. Dr.techn. Sara REICHENBACH Dipl.-Ing. Nadine STOIBER

TU Wien: Dipl.-Ing. Dr.techn. Philipp PREINSTORFER Dipl.-Ing. Dr.techn. Tobias HUBER

Auftraggeber: Bundesministerium für Klimaschutz ÖBB-Infrastruktur AG Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

Universität für Bodenkultur Wien (BOKU) Technische Universität Wien (TU Wien)







INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS					
ABKÜRZ	ZUNGSVERZEICHNIS	6			
1. EIN	LEITUNG				
1.1.	PROBLEMSTELLUNG	8			
1.2.	ZIELSETZUNG	9			
1.3.	Arbeitspakete				
2. CH	ARAKTERISIERUNG NICHTMETALLISCHER BEWEHRUNG	13			
2.1.	HERSTELLER				
2.2.	MATERIALIEN				
2.3.	Herstellung				
2.4.	MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN	25			
2.5.	Verbundeigenschaften	29			
2.6.	LIEFERZEITEN UND KOSTEN				
2.7.	ZULASSUNGEN				
2.8.	Derzeitige Einsatzgebiete				
3. KN	OWLEDGE-HUB	33			
3.1.	Allgemeines				
3.2.	Schadensbilder und Anforderungen				
3.3.	Identifiziertes Potential				
3.4.	Internationales Symposium				
4. EN	TWURF MATERIALGERECHTER BAUTEILE INKL. PARAMETERSTUDIE	40			
4.1.	RICHTLINIE UND NORMENSTAND				
4.2.	BENCHMARKBERECHNUNG				
4.3.	PARAMETERSTUDIE				
5. ÖK	OLOGISCHE ANALYSE	70			
5.1.	THEORETISCHE GRUNDLAGEN & NORMENSTAND				
5.2.	ERGEBNISSE				
5.3.	Beschreibung der Konsultierten Datenquellen				
6. ÖK	ONOMISCHE ANALYSE	86			
61	ALIGEMEINES	86			
6.2					
6.3.	METHODIK: KOSTENKENNWERTE FÜR DEN EINSATZ VON MIT NICHTMETALLISCHER BEWEHRUNG				
6.4.	STRAßenbrücke in Rahmenbauweise 15 m.				
6.5.	WINKELSTÜTZMAUER				
6.6.	Bahnsteigkante				
6.7.	Abschließendes Fazit und Abgrenzung	110			
7. RE0	CYCLING VON NICHTMETALLISCH BEWEHRTEN BAUTEILEN	112			
7.1.	LITERATURSTUDIE				
7.2.	VERSUCHE				
8. EM	PFEHLUNGSLEITFADEN	129			
Q 1		100			
8.2	Stufe 1 - Vereinfachtes Vereahren zur Δrschätzung des Δnimendungsdotentials				
8.3.	STUFE 2 - GENAUERES VERFAHREN ZUR ABSCHÄTZUNG DES ANWENDUNGSPOTENTIALS				
-					







9.	ZUS	AMMENFASSUNG	144
	9.1.	ZIEL 1: TECHNISCHE UND WIRTSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN FÜR DEN EINSATZ VON NICHTMETALLISCHER BEWEHRUNG	G IN
	ÖSTERREI	СН	144
	9.2.	ZIEL 2: BESTIMMUNG DES EINSATZPOTENTIALS VON NICHTMETALLISCHER BEWEHRUNG FÜR INFRASTRUKTURBAUWE	RKE
		145	
	9.3.	ZIEL 3: EMPFEHLUNGSLEITFADEN ZUR PROJEKTIERUNG FÜR INFRASTRUKTURBAUWERKE MIT NICHTMETALLISCHER	
	BEWEHRU	ING	148
	9.4.	ERKENNTNISSE UND AUSBLICK	149
A	BILDU	NGSVERZEICHNIS	152
T/	BELLE	NVERZEICHNIS	157
Lľ	TERATU	JRVERZEICHNIS	159
A	NHANG	A: FRAGEBOGEN KNOWLEDGE HUB	174



a Annuität in Geldeinheiten



ASFINAG

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

- Ac,ef Wirkungsbereich der Bewehrung für Rissbreitenberechnung ADP Abiotisches Ressourcenerschöpfungspotenzial Englisch: Abiotic depletion potential AE Versauerungspotential Englisch: Accumulated Exeedance Af Querschnittsfläche FRP-Bewehrung AP Versauerungspotential Englisch: Acidification Potential, Acrylat Dispersion A_r Bewehrungsfläche AR Alkaliresistent b Breite BFRP Basalt fibre-reinforced polymer BST Baustahlbewehrung c Betondeckung C₀ Kapitalwert Cc Abminderungsfaktor der Zugfestigkeit einer FRP Bewehrung zufolge Dauerstand C_E derungsfaktor Festigkeit FRP Bewewehrung zufolge Umwelteinfluss CED Kumulierter Energiebedarf Englisch: Cumulative energy demand CFRP Carbon fibre-reinforced polymer cmin,b Mindestbetondeckung zufogle Verbundkriterium CT Abminderungsfaktor Festigkeit FRP Bewewehrung zufolge Temperatur d statische Nutzhöhe DM Duromer E_{c,eff} effektiver E-Modul (für Verformungsberechnung) Ecm mittlerer E-Modul EF Environmental footprint ELCD European reference Life Cycle Database E-Modul FRP-Bewehrung 173 EP Epoxidharz EPD Umweltproduktdeklaration Englisch: Enviromental product declaration EPLCA European Platform on Life Cycle Assessment Er E-Modul der Bewehrung ER Edelstahlbewehrung F_c Druckkraft $f_{cd}\ Druckfestigkeit Beton, Design$ f_{ck} charakteristische Zylinderdruckfestigkeit f_{ctm} mittlere Betonzugfestigkeit f_{ftd} Designfestigkeit FRP Bewehrung f_{ftk,100} charakteristische Langzeitfestigkeit (100 Jahre) FRP Bewehehrung FRP Faserverbundkunststoff Englisch: Fibre-reinforced polymer Ft Zugkraft ftd Zugfestigkeit Bewehrung, Design GFRP Glass fibre-reinforced polymer GWP Global Warmin Potential h_{c,eff} Höhe des Wirkungsbereiches der Bewehrung für Rissbreitenberechnung
- ILCD International Life Cycle Data system

III Trägheitsmoment Zustand II

- IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change
- k Laufindex über die rechnerischen Betrachtungsjahre
 k₁ Beiwert zur Berücksichtigung der
 Verbundeigenschaften der Bewehrung
- k₂ Beiwert zur Berücksichtigung der Dehnungsverteilung auf die Rissbreiten
- k₃ empirischer Beiwert der in der Rossbreitenberechnung Anwendung findet
- k₄ empirischer Beiwert der in der Rossbreitenberechnung Anwendung findet
- kt Faktor zur Berücksichtigung der Dauer der Lasteinwirkung
- LCA Ökobilanz English: Life cycle assessment
- LCI Sachbilanzierung Englisch: Life cycle inventory
- LCIA Wirkungsabschätzung Englisch: Life cycle impact assessment
- LZK Lebenszykluskosten
- m Differenz zwischen dem jeweiligen rechnerischen Betrachtungsjahr und dem Referenzjahr des Kostenmodells
- M_E Einwirkendes Moment
- MP Materialpreis
- M_R Widerstandsmoment Bewehrung
- M_{Rd} Biegetragfähigkeit Design
- n Nutzungsdauer
- Ør Durchmesser Bewehrung
- ϕ_{r}^{*} modifizierter Bewehrungsdurchmesser
- PD Polymerdispersion
- PENRT Primiärenergiebedarf nicht erneuerbarer Ressourcen Total
- PERT Primärenergiebedarf erneuerbarer Ressourcen Total
- PKR Produktkategorieregel
- RH Reaktiver Harz
- RWt Restwertes nach t verstrichenen Jahren
- SBR Styrol-Butadien-Kautschuk Englisch: styrene
- butadiene rubber
- S₁ Statisches Moment Zustand I
- S_{II} Statisches Moment Zustand II
- SLS Grenzzustand Gebrauchstauglichkeit (GZG)
- s_{r,max} maximaler Rissabstand
- TP Thermoplast
- ULS Grenzzustand Tragfähigkeit (GZT)
- VE Vinylesterharz
- w_{cr} Rissbreite
- x Betondruckzonenhöhe
- $x_{\mbox{\tiny II}}$ Betondruckzonenhöhe Zustand II
- z_D Diskontierungszinssatz
- zv Zinssatz zur Berücksichtigung der Preisgleitung
- $\alpha\,$ Untersuchter Verformungsparameter
- α_f Verhältnis E-Modul Bewehrung zu E-modul Beton
- α₁ Werte des untersuchten Verformungsparameters f
 ür den ungerissenen Zustand

I₁ Trägheitsmoment Zustand I





ASFINAG

- α_{II} Werte des untersuchten Verformungsparameters f
 ür den vollst
 ändig gerissenen Zustand
- β Koeffizient der den Einfluss der Belastungsdauer und der Lastwiederholung auf die mittlere Dehnung berücksichtigt
- γ_M Materialsicherheitsbeiwert
- ϵ_{cm} mittlere Dehnung im Beton
- ϵ_{cs} Schwinddehnung
- ϵ_{cu} Bruchdehnung Beton
- ε_{rm} mittlere Dehnung in der Bewehrung
- ϵ_{tu} Bruchdehnung Bewehrung
- ζ Verteilungsbeiwert zur Berücksichtigung des Tension Stiffening
- $\eta\,$ Beiwert zur Bestimmungder effektiven Betonfestigkeit
- к *Krümmung*
- κ_I Krümmung Zustand I
- κ_{II} Krümmung Zustand II

- κ_m mittlere Krümmung
- $\lambda\,$ Beiwert zur BEstimmung der effektiven Höhe der Betondruckzone
- ξ Verhältnis Betondruckzonenhöhe zu statischer Nutzhöhe
- ρ Dichte
- ρ_b ausgeglichener Bewehrungsgrad
- ρ_{eff} effektiver Bewehrungsgrad für Rissbreitenberechnung
- ρ₁ Bewehrungsgrad Längsbewehrung
- τ_m mittlere Verbundspannung
- ϕ_{∞} Kriechbeiwert zum Zeitpunkt t $_{\infty}$
- σ_{c} Drucksspannung
- $\sigma_{
 m r}$ Zugspannung in der Bewehrung
- $\sigma_{\rm t}$ Zugspannung
- σ_{tr} Zugspannung in der Bewehrung für einen gerissenen Querschnitt unter dem Rissmoment





1. EINLEITUNG

1.1. Problemstellung

Ein Großteil der (Infrastruktur-)Bauwerke in Österreich und darüber hinaus wird in Stahlbetonbauweise errichtet. Um die Bewehrung in Stahlbetonbauwerken vor Korrosion zu schützen, wird diese in der Regel von einer geeigneten Betondeckung umhüllt (20 mm - 60 mm). Dennoch ist der Erhaltungszustand bestehender Infrastrukturbauten vielfach von Schäden aufgrund von Korrosion der Bewehrung geprägt [1], da die Passivierung im Laufe der Zeit durch fortschreitende Karbonatisierung des Betons verloren geht. Als mögliche Alternative zu metallischen Bewehrungen bieten sich deshalb Bewehrungen aus nichtmetallischen Faserverbundkunstoffen (FRP – Fibre-reinforced polymers) an. Diese sind als Bewehrungsstäbe bzw. -lamellen [2], Spannglieder [3] als auch in Form von flächigen Textilbewehrungen [4] erhältlich. Die Bewehrung der Regel besteht in aus Hochleistungsfasern (vorrangig AR-Glas [5] und Carbon [6], aber auch Basalt [7]), welche mit einer Kunststoffmatrix getränkt sind. Da die Bewehrung nicht rostet, kann einerseits die Betondeckung reduziert werden, wodurch der Bau und die Anwendung leichterer Tragwerke ermöglicht wird [8], [9]. Andererseits kann die Dauerhaftigkeit des Tragwerkes erhöht werden, wodurch sich sowohl aus ökonomischer [10], [11] als auch ökologischer Sicht [12] Vorteile ergeben.

Eine erste Phase der intensiven Forschung und Entwicklung zu diesem Thema gab es bereits in den 1980 Jahren in europäischen [13], [14], amerikanischen [15] und asiatischen Ländern [16]. Derzeit werden im Rahmen einer zweiten, vorrangig von deutschen Wissenschaftlern [17]-[19] vorangetriebene, Phase im Zuge der Entwicklung von Textilbewehrungen umfassende Forschungsarbeiten durchgeführt, die zu einer Renaissance rund um das Thema der Faserverbundkunststoffe geführt hat. Die Umsetzung zahlreicher Pilotprojekte [8], [20]-[22] zeugt demnach von der technischen Machbarkeit und dem Potential dieser Entwicklungen. Dennoch haben sich FRP-Bewehrungen bis dato nicht am Markt etabliert. Die oftmals angedeutete Absenz von Richtlinien und Normen als möglicher Hemmschuh ist mittlerweile unbegründet, da zahlreiche nationale Richtlinien [23] und Normen [24], sowie auch Empfehlungen internationaler Fachvereinigungen vorhanden sind [25]. Vielmehr stehen einer breiten Anwendung von FRP-Bewehrungen die aktuell noch höheren Errichtungskosten im Vergleich zu Stahlbetontragwerken gegenüber [10], [26]. Berücksichtigt man jedoch die Vorteile von FRP-Bewehrungen, so wird die Betrachtung der Errichtungskosten als alleiniges Entscheidungskriterium bei der Wahl des Tragwerkes dem Werkstoff nicht gerecht. Aufgrund der Dauerhaftigkeit der Bewehrung ergibt sich in vielen Fällen eine höhere Lebensdauer des







gleichzeitig geringerem Wartungsaufwand. Tragwerkes, bei Dies bringt sowohl volkswirtschaftliche (geringere Instandsetzungskosten) als auch gesellschaftspolitische (Umweltaspekte) Vorteile mit sich. Eine gesamtheitliche Betrachtung der ökonomischen und ökologischen Auswirkungen des Einsatzes von FRP-Bewehrungen über den Lebenszyklus eines Bauwerkes ist daher von Nöten, um eine transparente und nachvollziehbare Entscheidungsgrundlage bei der Projektierung eines Bauwerkes zu schaffen. Eine solche Entscheidungsgrundlage ist bis dato nicht vorhanden. Zwar existieren einzelne Untersuchungen zum ökonomischen Design von **FRP-bewehrten** Bauteilen auf Querschnittsebene [11] und einzelne vage ökologische Betrachtungen der Materialien [27], es hat aber noch keine gesamtheitliche Betrachtung auf der Systemebene stattgefunden.

1.2. Zielsetzung

Abgeleitet aus der Problemstellung ist das Projektziel durch die Herausgabe eines Empfehlungsleitfadens zum Einsatz nichtmetallischer Bewehrung bei der Projektierung von Infrastrukturbauwerken definiert (Ziel 3). Dieser soll auf Basis der aktuellen ökonomischen und neu erarbeiteten ökologischen Grundlagen (Ziel 1) erarbeitet werden. In einer umfassenden Analyse (Ziel 2) wird das Potential für den Einsatz nichtmetallischer Bewehrung in den jeweiligen Anwendungsgebieten aufgezeigt. Die in die Untersuchung einbezogene Bauteile und Bauwerke sind in Abbildung 1 dargestellt.



Abbildung 1: Darstellung eines Vorabzuges der untersuchten Bauteile bzw. Bauwerke







Ziel 1: Technische und wirtschaftliche Grundlagen für den Einsatz von nichtmetallischer Bewehrung in Österreich werden geschaffen.

Erhebung der am Markt verfügbaren nichtmetallischen Bewehrungen und Darstellung der Verfügbarkeit und Kosten.

Charakterisierung der technischen Eigenschaften der verfügbaren nichtmetallischen Bewehrung.

Ziel 2: Einsatzpotential von nichtmetallischer Bewehrung für Infrastrukturbauwerke wird bestimmt.

Relevante Bauteile im Infrastrukturbau filtern und Schadensbilder identifizieren.

Materialgerechte Bemessung relevanter Bauteile von Infrastrukturbauwerken durchführen (Brücke, Stützmauern, etc.).

Parameterstudien für den typischen Einsatzbereich erstellen.

Ökonomische und ökologische Bewertung der identifizierten Bauwerke durchführen.

Recycling von Bauteilen in Österreich erproben.

Ziel 3: Empfehlungsleitfaden zur Projektierung für Infrastrukturbauwerke mit nichtmetallischer Bewehrung wird herausgegen.

Empfehlungsleitfaden auf Basis der gesammelten Erkenntnisse wird herausgegeben, um eine Entscheidungsgrundlage für den Infrastrukturbetreiber zu schaffen: "Wo ist es sinnvoll nichtmetallische Bewehrung einzusetzen, wo nicht?" "Was sind in Hinblick auf die ökologische und ökonomische Effizienz sinnvolle Anwendungsbereiche?".

1.3. Arbeitspakete

Das Forschungsvorhaben gliederte sich in sieben Arbeitspakete, wobei AP1 dem Projektmanagement mit einer möglichst effizienten Abwicklung des Projektes durch die Partner gewidmet ist. Die Projektziele in Zusammenhang mit den restlichen sechs Arbeitspaketen sind in Abbildung 2 dargestellt.

AP2: Detaillierte Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften, Kosten und Verfügbarkeiten von nichtmetallischer Bewehrung

Charakterisierung der verschiedenen Formen von nichtmetallischen Bewehrungen. Daran anschließend werden mechanische Eigenschaften, Dauerhaftigkeitseigenschaften, Kosten und die Verfügbarkeit der jeweiligen Bewehrungsarten





dargestellt. Der Fokus wird hierbei auf bereits am Markt etablierte Produkte gelegt. Das Arbeitspaket beinhaltet eine Literaturrecherche, Kontaktaufnahme mit Herstellern, und eine klare Darstellung des derzeitigen Stand der Technik.

AP3: Bildung eines Knowledge Hubs

Durch den Austausch mit den Infrastrukturbetreibern und Forschenden werden folgende Ziele erarbeitet:

- Identifizierung der wesentlichen Schadensbilder und dem Instandsetzungsaufwand von Bewehrungskorrosion und Dauerhaftigkeitsproblemen im österreichischen Infrastrukturnetz.
- Bestimmung der wesentlichen Anforderungen an relevante Bauteile hinsichtlich der mechanischen Beanspruchung, der Umwelteinflüsse, der Lebensdauer etc.
- Definition von Bauteilen, bei denen durch den Einsatz von FRP-Bewehrung ein finanzielles Einsparungspotential zu erwarten ist.

Das Arbeitspaket beinhaltet die Durchführung eines Bedarfsanalyseworkshops mit externen Teilnehmern und einen Wissenstransfer mit internationalen Forschungspartnern.

AP4: Entwurf von materialgerechten Bauteilen inkl. Parameterstudien

Im Rahmen des Arbeitspaketes werden materialgerechte Entwürfe für verschiedene Bauteile erarbeitet. Materialgerecht bedeutet in diesem Kontext, dass die Materialeigenschaften bestmöglich ausgenutzt werden und die von verschiedenen Regelwerken gestellten Anforderungen an ein bewehrtes Betonteil gleichermaßen erfüllt werden (Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit, Dauerhaftigkeit etc.). In Parameterstudien wird zudem der ideale Anwendungsbereich der nichtmetallischen Bewehrungen in Diagrammen visualisiert.

AP5: Ökologische und ökonomische Analyse

Im Rahmen des AP5 wird eine Datenbasis für die Ökobilanzierung nichtmetallischer Bewehrung, welche für 3 Fasertypen (Carbonfasern, AR-Glasfasern, Basaltfasern) sowie 5 Matrixtypen (Epoxidharz, Vinylesterharz, Acrylat Dispersion, Polyesterharz, SBR) erarbeitet wird, geschaffen. Auf Basis der von Infrastrukturbetreibern zur Verfügung gestellten Aufwandsdaten für die Erhaltung von konventionellen Bauwerken





werden die monetären Aufwendungen über die Lebensdauer des Tragwerkes beleuchtet.

AP6: Machbarkeitsstudie zum Recycling nichtmetallisch bewehrter Bauteile

Durchführung einer Literaturstudie laufender Forschungsarbeiten und erste lokale Untersuchungen in Zusammenarbeit mit einem österr. Recyclingunternehmen.

AP7: Empfehlungsleitfaden und Dissemination

Die Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben werden in Form eines Leitfadens aufbereitet, in welchen Bereichen des Infrastrukturbaus der Einsatz von nichtmetallischen Bewehrungen sinnvoll ist. Dadurch wird den Infrastrukturbetreibern eine Entscheidungsgrundlage für zukünftige Projekte gegeben. Die gewonnen Erkenntnisse werden nach vorheriger Abstimmung mit den Auftraggebern in wissenschaftlichen Arbeiten und Fachpublikationen festgehalten.



Abbildung 2: Übersicht der Ziele und der zugehörigen Arbeitspakete





2. CHARAKTERISIERUNG NICHTMETALLISCHER BEWEHRUNG

Für die folgende Zusammenstellung und detaillierte Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften, Kosten und Verfügbarkeit wurden nur nichtmetallische Bewehrungsprodukte beurteilt, die für die Bewehrung von Beton im Neubau geeignet sind betrachtet. Matten zur Bewehrung von Mauerwerk oder Asphalt, sowie Produkte für temporäre Bauwerke oder Sanierung (Reparatur, Verstärkung oder Nachrüstung) waren somit nicht Teil der Untersuchung. Da glatte Stäbe keine ausreichende Verbundfestigkeit und Steifigkeit aufweisen wurden lediglich Stäbe, die durch eine entsprechende Oberflächenbehandlung (z.B. Besandung, Umwicklung, Profilierung etc.) verbesserte Verbundeigenschaften aufweisen, betrachtet.

Um einen Überblick über den Markt für nichtmetallische Bewehrung zu bekommen wurde ein Fragebogen an 40 Hersteller weltweit verschickt. Der Fragebogen bestand aus den folgenden 11 Punkten:

- Produktpalette
- Richtpreise
- Mechanischen Eigenschaften der Produkte
- Lieferzeiten
- Zusammensetzung (Faser/Harz-Volumenanteil, Dichten, Gewichtsanteile)
- Materialspezifikationen (Matrix/Faser)
- Langzeitfestigkeit
- Informationen über das Konzept der unternehmerischen Nachhaltigkeit (Corporate Sustainability Concept)
- Umweltproduktdeklaration (EPD)
- Infos zur Produktion (Bezugsort, Herstellungsort, Herstellungsverfahren, verwendete Brennstoffe, Transportwege)
- Referenzprojekte

Die erhaltenen Antworten (25 Firmen) in Kombination mit recherchierten Datenblättern wurden analysiert, verglichen und zusammengefasst. Im Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften wurden die von den Unternehmen bereitgestellten Information zusammengestellt. In den Bereichen in denen keine Daten zur Verfügung gestellt wurden, wurden eigene experimentelle Daten oder Daten aus der Literatur verwendet.





Alle weiteren Untersuchung wurden auf 20 Hersteller mit Produktionsstandorten in Europa inkl. Russland beschränkt. Die geografische Einschränkung wurde vorgenommen, um die Transportwege kurz zu halten.

2.1. Hersteller

Die Ergebnisse der Umfrage sowie die intensive Recherche zeigt, dass mind. 20 Hersteller in Europa und Russland ansässig sind (Produkte, die für die Bewehrung von Beton im Neubau geeignet sind). Die Hälfte der Hersteller hat ihren Sitz im deutschsprachigen Raum (Deutschland (7), Österreich (2), Schweiz (1)). Weitere Standorte sind Italien (3), Russland (3), die Ukraine (2), das Vereinigte Königreich (1) und Norwegen (1). Die genauen Zusammensetzungen und die Produktpaletten der Hersteller sind in Abbildung 3 zusammengefasst. Es wird zwischen der Faser (Carbon CFRP, Glas GFRP, Basalt BFRP), der verwendeten Tränkung/Matrix (Acrylat Dispersion AP, Styrol-Butadien-Kautschuk SBR, Epoxidharz EP und Vinylesterharz VE) und der Bewehrungsart (1D Stäbe, 1D Litzen, 2D/3D) unterschieden. Zusätzlich zu der Zusammensetzung wird auch die Oberflächenbehandlung und Herstellungsspezifikationen (1D: Bügelherstellung, Sandbeschichtung, Umwicklung, Profilierung, Fräsung; 2D/3D: Textil, Matte aus Stäben, Vorformung, 3D Herstellung, Sandbeschichtung), die von jeweiligem Hersteller angeboten werden, gekennzeichnet.



Abbildung 3: Verfügbare ein-, zwei- und dreidimensionale nichtmetallische Bewehrungen: Zusammensetzung gegliedert nach Faser und Matrix, Oberflächenbehandlung und Hersteller inkl. Herkunftsland mit Fokus auf Europa

Eine Vielzahl der Hersteller produziert 1D Stäbe aus Glas und Basalt, während nur zwei Hersteller Carbon-Stäbe anbieten. Produkte aus Aramid befinden sich nicht in der Produktpalette





der Hersteller. Die Recherche zeigt, dass alle 1D-Stäbe entweder mit Epoxidharz oder Vinylesterharz hergestellt werden. Litzen werden nur von einem Produzenten angeboten. Für die 2D- und 3D-Bewehrungen werden alle Fasertypen und Beschichtungen eingesetzt. Es wird unterschieden zwischen Textilien und Matten aus Stäben sowie der Möglichkeit der Formgebung und der 3D-Fertigung.

2.2. Materialien

Grundsätzlich bestehen alle FRP Bewehrungen (1D, 2D, 3D) aus kontinuierlichen unidirektionalen Fasern, die in einer Polymermatrix eingebettet sind. Die Verbundeigenschaften sind abhängig von den verwendeten Materialien, deren Zusammensetzung sowie dem Herstellungsverfahren. Während CFRP die besten mechanischen Eigenschaften aufweisen, haben andere Zusammensetzungen, wie GFRP, ein besseres Kosten-Festigkeit Verhältnis. Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick über die verschiedenen Bestandteile (Faser- und Matrixmaterialien) der FRP Bewehrungen, basierend auf den von den Herstellern zur Verfügung gestellten Angaben.

2.2.1 Faser

Hochleistungsfasern sind Bestandteil jeder FRP-Bewehrung. Die europäischen Hersteller verwenden sowohl organische (Carbon) als auch anorganische (Glas oder Basalt) Ausgangsmaterialien für ihre Produkte. Um als Bewehrung für Betonbauwerke geeignet zu sein, werden sie in der Regel als Endlosfasern (auch als Filamente bezeichnet) hergestellt und müssen folgende Anforderungen erfüllen [19]:

- Hoher Korrosionsbeständigkeit im alkalischen Milieu des Betons.
- Hohe Dehnsteifigkeit im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.
- Hohe Bruchdehnung, um eine gute Versagensankündigung zu gewährleisten.
- Hohe Ermüdungsfestigkeit.
- Wirtschaftlich im Vergleich zu Stahlbewehrung.

Die drei Hochleistungsfasern, die im Wesentlichen von den europäischen Herstellern für ihre Produkte verwendet werden, sind in Tabelle 1 angeführt. Da keine detaillierten Angaben zu den Eigenschaften der Fasern übermittelt wurden, sind in Tabelle 1 entsprechende Werte aus der Literatur angeführt. Die mechanischen Eigenschaften von Carbonfasern umfassen einen breiten Bereich, hauptsächlich abhängig von den verwendeten Rohstoffen und der Art der Herstellung [6]. Um die Anforderungen im Betonbau zu erfüllen, werden meist HT-Fasern





(HighTensity) eingesetzt. Diese Fasertypen überzeugen durch einen vergleichsweise geringen Preis und eine hohe Bruchdehnung, die eine Versagensankündigung der Betonstruktur im Grenzzustand der Tragfähigkeit ermöglichen [19]. Carbonfasern zeichnen sich durch eine hohe Dauerfestigkeit und eine gute Langzeitfestigkeit aus [28].

Easor	Dichte	E-Modul	Zugfestigkeit	Bruchdehnung
Fasei	[g/cm³]	[GPa]	[MPa]	[mm/m]
AR-Glas	2,7	76	2000	26
E-Glas	2,52-2,6	72-77	3400-3700	33-48
Carbon	1.73-1.96	200-500	1750-7000	3.5-24
Basalt	2.75	89	2000-4840	3.15
Bewehrungsstahl B550B	7.86	200	550	20

Tabelle 1: Mechanischen Eigenschaften der unterschiedlichen Fasermaterialien [29]

Glasfasern und Basaltfasern zeigen im alkalischen Milieu des Betons eine Degradation auf, wodurch die Langzeitfestigkeit deutlich geringer ist als die Kurzzeitfestigkeit [30]. Bei Glas kann die Alkalibeständigkeit durch den Zusatz von Zirkonium bei der Herstellung erhöht werden (alkaliresistentes (AR) Glas) was allerdings mit einer Verschlechterung der mechanischen Kennwerte einhergeht (siehe Tabelle 1) [31]. Trotz der Behandlung wird keine vollständige Beständigkeit erzielt, jedoch kann durch die zusätzliche Tränkung im späteren Herstellungsprozess die Beständigkeit erhöht werden. Basaltfasern, die den großen Vorteil einer sehr hohen Verfügbarkeit des Rohmaterials haben, sind noch relativ neu am Markt, wodurch die Produktpalette begrenzt ist. Zusätzlich zu den drei Faserarten, die von den europäischen Herstellern verwendet werden, können FRP Bewehrungen auch aus Aramid Fasern hergestellt werden. Diese Fasern weisen sehr gute mechanische Eigenschaften auf, haben jedoch einen vergleichsweise hohen Preis und neigen zur Wasseraufnahme, wodurch sie bei einem häufigen nass-trocken Wechsel anfällig auf Längsrisse sind [32].

Die Faserherstellung erfolgt mittels Primärspinnungsprozess, der für die jeweiligen Materialien angepasst wird. Für die Glasfaserherstellungs wird am häufigsten das Düsenziehverfahren verwendet. Hier wird das Faserglas bei Temperaturen von ca. 1400 °C geschmolzen und mithilfe von Schwerkraft von den Düsen abgezogen. Die rasche Abkühlung unterbindet die Kristallisation und die richtungsabhängige Anordnung der Moleküle verursacht das isotrope Materialverhalten. Nach dem Primärspinnungsprozess wird eine Schlichte auf die Faser aufgetragen, bevor sie zu einem Garn weiterverarbeitet werden. Dies reduziert das Aufkommen von



Filamentschädigung, verbessert die Haftung der Faser zum später eingebrachten Tränkung und vermeidet eine elektrostatische Aufladung. [29], [33]

2.2.2 Tränkung/Matrixmaterial

Das Matrixmaterial stellt den Verbund zwischen den einzelnen Filamenten sicher, was zu einer deutlich höheren Steifigkeit und Festigkeit führt und gleichzeitig den Verbund mit dem umgebenden Beton beeinflusst [34]. Es überträgt Spannungen zwischen den Fasern und sorgt für deren Schutz [35]. Die identifizierten Matrixmaterialien (siehe Abbildung 3) lassen sich in Polymerdispersionen (PD) und reaktive Harze (RH) unterteilen und müssen folgende Anforderungen erfülle [33], [36]:

- Gutes Eindringvermögen (niedrige Viskosität), um einen hohen Imprägnierungsgrad zu gewährleisten.
- Hohe Kohäsionsfestigkeit zur Übertragung von Verbundkräften.
- Hohe Steifigkeit im ausgehärteten Zustand.
- Hohe Dauerfestigkeit.
- Temperaturbeständig.

Reaktive Harze bestehen aus einem Grundharz und einem Härter [37]. Durch die unzähligen Kombinationsmöglichkeiten unterscheiden sich die Eigenschaften des Materials von Hersteller zu Hersteller. Wie in Abbildung 3 dargestellt, werden alle 1D Bewehrungen mit reaktiven Harzen hergestellt. Während Epoxidharz (EP) für alle drei Fasertypen verwendet wird, kommt Vinylesterharz (VE) nur bei Glas und Basalt zum Einsatz. Zusätzlich zu der Herstellung von 1D Bewehrung werden reaktive Harze auch in der Herstellung von 2D und 3D Bewehrungsarten verwendet. Aufgrund der steifen Materialkennwerte (siehe Tabelle 2) können vorgeformte Textilien gut hergestellt werden. Polymerdispersionen (PD) sind stabile Dispersionen von Polymerpartikeln in einer wässrigen Phase [38], die nur für 2D und 3D Bewehrungen verwendet werden. Die Matrix ist im ausgehärteten Zustand weniger steif, was den Transport der fertigen Produkte als Rollenware ermöglicht. Die mechanischen Eigenschaften der am häufigsten verwendeten Tränkungsmaterialien sind in Tabelle 2 dargestellt. Polyester wird in der Tabelle nicht angeführt, da es aufgrund der geringeren chemischen Beständigkeit im Vergleich zu den anderen Tränkungsmaterialien hauptsächlich in Produkten für den temporären Einsatz verwendet wird [35].







Bei der Klassifizierung der Matrixmaterialien in Tabelle 2 wird weiter zwischen Thermoplasten (TP), thermoplastischen Elastomeren und Duromeren (DM) unterschieden, wobei thermoplastische Elastomere nur äußerst selten für Bewehrungsherstellung verwendet werden. Im Gegensatz zu Duroplasten können Thermoplasten nach dem aushärten immer wieder, ohne jegliche Festigkeitsverluste, erwärmt und verformt werden. Dadurch wird auch die Recyclingfähigkeit verbessert. Trotz der besseren mechanischen und thermischen Eigenschaften von Thermoplasten, kommen sie kaum zur Anwendung bei der Herstellung von Bewehrung. Grund dafür ist unteranderem das spröde Bruchverhalten [39]. Die Aushärtung der fertigen Produkte kann entweder mit oder ohne Hitze erfolgen [40], [41]. Werden komplexe 3D-Formen benötigt, können Pre-Pregs eingesetzt werden [40]. Diese ermöglichen es, die Fasern auf einer ebenen Fläche oder in einem industriellen Prozess zu imprägnieren, bevor sie geformt werden. Die Aushärtung ist stark verzögert und ermöglicht so das Verformen. Sobald die gewünschte Form erreicht ist, kann ein vollständiges Aushärten erfolgen.

Matrix/ Tränkungs- material	Dichte [g/cm³]	Zug E-Modul [GPa]	Zugfestig- keit [MPa]	Bruchdeh- nung [mm/m]	Biege E-Modul [GPa]	Biegezug- festigkeit [MPa]	Klassifika- tion
Epoxidharz (EP)	1.17 - 1.25	bis 4.2	bis 100	13 - 50	2.6 - 3.6	100 - 130	RH - DM
Vinylesterharz (VP)	1.2	2.9 - 3.1	50 - 77	35 - 55	3.0 - 3.7	120 - 140	RH - DM
Acrylat Disper- sion (AD)	1.15 - 1.19	3.1 - 3.3	60 - 80	20 - 60	-	-	PD - DM - TP
Styrol Butadien Kautschuk (SBR)	1.0 - 1.05	3.0 - 3.4	3.5 - 20.5	17 - 37	3.5 - 6.2	46 - 122	PD - DM

Tabelle 2: Mechanischen Eigenschaften der unterschiedlichen Tränkungsmaterialien [42]-[46]

2.3. Herstellung

Für die Herstellung von allen Bewehrungsarten müssen die einzelnen Faserfilamente mit der Matrix verbunden und in die gewünschte Form gebracht werden. Hier unterscheiden sich die Herstellungsverfahren für ein- und mehrdimensionale Produkte wesentlich. Zusätzlich zu der Beschreibung der Herstellungsprozesse wird auf die nachträgliche Oberflächenbehandlung eingegangen. Dies ist besonders wichtig für die Bewehrungsstäbe, da glatte Stäbe keine ausreichende Verbundfestigkeit und Steifigkeit bieten.





Grundsätzlich werden aus den Fasern zuerst Einfachgarne bzw. in weiterer Folge Mehrfachgarne hergestellt. Für glatte, ungedrehte Multifilamentgarne wird im Bauwesen meist der Begriff Roving verwendet. [33]

2.3.1 Eindimensionale Bewehrung

Eindimensionale FRP-Bewehrung, wie in Abbildung 3 dargestellt, kann in ihrem Tragverhalten mit Bewehrungsstäben aus Stahl mit ihrer eindimensionalen Haupttragrichtung verglichen werden. Im Gegensatz zu Stahl ist FRP jedoch ein anisotroper Werkstoff mit einer höheren mechanischen Festigkeit in Längsrichtung und einer geringeren quer zur Faserrichtung führt. Die Materialeigenschaften sind abhängig von den verwendeten Fasern und Matrixmaterialien sowie dem Fasergehalt [47]. Eine Übersicht über die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der europäischen Hersteller sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Bis auf einen der kontaktieren Hersteller produzieren alle deren 1D Bewehrungen durch Verwendung eines Pultrusionsverfahrens. Mit diesem Verfahren kann eine breite Vielfalt an profilierten FRP-Elementen wirtschaftlich und mit gleichbleibender Qualität hergestellt werden.

Auf Gestellen montierte Endlos-Rovinge (gerade nicht eingedrehte Filamente) werden durch ein Führungssystem gezogen, das die Faser richtet und ein Verheddern verhindert. Die Gestelle sind mobil, wodurch ein schneller Wechsel des verwendeten Fasermaterials möglich ist. Im nächsten Verarbeitungsschritt werden die Rovinge mit der Tränkung imprägniert. Wie in Abbildung 3 und Tabelle 3 dargestellt, werden für die Herstellung von 1D Stäben nur reaktive Harze verwendet. Der Imprägnierungsprozess zählt zu den wichtigsten Prozessen im Herstellungsverfahren. Um möglichst gute Eigenschaften zu erlangen wird eine vollständige Imprägnierung der Fasern angestrebt, die jegliche Lufteinschlüsse vermeidet und einen optimalen Verbund zwischen den einzelnen Filamenten gewährleistet. Eventuelle Harzadditive, die die physikalischen Eigenschaften beeinflussen, werden ebenfalls in diesem Stadium zugegeben.

Es wird zwischen zwei Imprägnierverfahren unterschieden, dem offenen Tränkbadverfahren und dem Druckinjektionsverfahren. Die Imprägnierung mittels Tränkbad, ob im Tauch- oder Durchlaufverfahren, ist kostengünstiger und einfacher zu handhaben, liefert jedoch schlechtere Imprägnierergebnisse und eine weniger effiziente Nutzung des Tränkungsmaterials. Beim Tauchverfahren läuft die Faser durch ein System von Stäben im Bad, wodurch sie angedrückt und jegliche eingeschlossene Luft in den Faserbündeln ausgedrückt wird. Im Durchlaufverfahren werden die Rovinge durch Löcher in sogenannte Führungsplatten geführt, die in das nasse Harz getaucht sind, so dass eine gleichzeitige Vorformung ermöglicht wird. Nach der Impräg-







nierung werden die Stränge, beim Konsolidieren (Formgebung des Körpers), durch die Pultrusionsdüse gezogen, wodurch sie ihre Querschnittform erhalten. Bei dem teureren, aber effektiveren Druckinjektionsverfahren wird die Harztränkung direkt in die Pultrusionsdüse injiziert (5-30 bar), während die Faserstränge durchgezogen werden. Pultrusionsdüsen sind in der Regel ca. 1m lang und bestehen oft aus zwei oder mehr Werkzeugen, die die Faserstränge in die gewünschte Form bringen. Zur Verbesserung des Pultrusionsprozesses wird die Düse beheizt, was zu einer beschleunigten Aushärtung der FRP-Elemente führt. Das hinter der Düse angeordnete Zugsystem zieht die geformten 1D Stäbe mit einer kontinuierlichen Geschwindigkeit. Dies wird durch riemen- oder stollenartige Zugvorrichtungen oder hin- und herfahrende Zugmaschinen gewährleistet, die die Stäbe entweder klemmen oder greifen.

Das Endprodukt wird abschließend mit einer Kappsäge auf die gewünschte Länge geschnitten oder aufgewickelt [48]. Für die Herstellung von Seilen werde die einzelnen Litzen vorgeformt (z.B. durch Pultrusion), beschichtet, umwickelt und schlussendlich erhitzt und gehärtet [49].

Das Ergebnis des oben erläuterten Herstellungsprozesses ist in der Regel (einige Hersteller pultrudieren auch Profilstäbe, in Abbildung 3 mit ⁹ gekennzeichnet) ein glatter Stab, der keine ausreichende Verbundfestigkeit und Steifigkeit für den Einsatz in Betonkonstruktionen bietet. Die Hersteller verwenden unterschiedliche Oberflächenbehandlungen, um weitere Verbundmechanismen zu aktivieren und den Verbund zu erhöhen.

Eine der gebräuchlichsten Oberflächenbehandlungen ist das Umwickeln des Stabes (alle in Abbildung 3 mit ⁸ gekennzeichnet Firmen) mit einem Roving (Abbildung 4b-d) oder einem Faden (Abbildung 4g-h), wodurch eine spiralförmige Verzahnung auf der Bewehrung entsteht. Man unterscheidet zwischen eng umwickelten (wenn die Tränkung während des Wickelns noch nicht ausgehärtet ist) und leicht umwickelten (Tränkung bereits ausgehärtet) Stäben. Ein Vorteil der eng umwickelten Stäbe ist die bessere Verbindung zwischen dem Stab und der Umwicklung und die zusätzliche Oberflächenverformung (Abbildung 4 Stab (h)). Eine weitere gängige Methode der Oberflächenbehandlung ist die Sandbeschichtung der Produkte durch Bestreuen mit z.B. feinem Quarzsand auf eine zusätzlich aufgebrachte Lage des Tränkungsmaterials (alle in Abbildung 3 mit ⁷ gekennzeichnet Firmen). Zwei Beispiele für sandbeschichtete Bewehrungsstäbe sind in Abbildung 4 Stäbe (e) und (f) dargestellt. Die dritte Methode das Verbundverhalten zu verbessern ist mittels Fräsungen von einem Rippensystem in die bereits ausgehärteten Stäbe (Abbildung 4 Stab (a) produziert von allen in Abbildung 3 mit ¹⁰ gekennzeichnet Firmen). Dies führt zu einer erheblichen Steigerung des Verbundes, ist jedoch mit







einer Zerstörung wertvoller Fasern und einer Verringerung des Produktquerschnittes verbunden. Eine schematische Beschreibung der verschiedenen Oberflächenbehandlungen und Visualisierungen der Herstellungsprozesse sind in [50] zu finden.



Abbildung 4: 1D Bewehrung mit unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen. (a) CFRP Stab – gefräst – thyssenkrupp C4R, (b) CFRP Stab – umwickelt mit Carbon Roving – solidian REBAR CCE, (c) CFRP Stab – umwickelt mit einem flachen Carbonroving – solidian REBAR CCE, (d) GFRP Stab – umwickelt mit eingedrehten Basaltroving – solidian REBAR RBE, (e) GFRP Stab – sandbeschichtet – Galen Ltd ROCKBAR®, (f) BFRP Stab – sandbeschichtet – Galen Ltd ROCKBAR®, (g) BFRP Stab – umwickelt mit einem Faden – ReforceTech AS BasBars[™], (h) BFRP Stab – umwickelt mit einem Faden – ReforceTech AS BasBars[™], (h) BFRP Stab – umwickelt mit einem Faden – ReforceTech AS BasBars[™], (h) BFRP Stab – umwickelt mit einem Faden – ReforceTech AS BasBars[™], (h) BFRP Stab – umwickelt mit einem Faden – ReforceTech AS BasBars[™], (h) BFRP Stab – umwickelt mit einem Faden – ReforceTech AS BasBars[™], (h) BFRP Stab – umwickelt mit einem Faden – ReforceTech AS BasBars[™], (h) BFRP Stab – umwickelt mit einem Faden – ReforceTech AS BasBars[™], (h) BFRP Stab – umwickelt mit einem Faden – ReforceTech AS BasBars[™], (h) BFRP Stab – umwickelt mit einem Faden – ReforceTech AS BasBars[™], (h) BFRP Stab – umwickelt mit einem Faden – ReforceTech AS BasBars[™], (h) BFRP Stab – umwickelt mit einem Faden – ReforceTech AS BasBars[™], (h) BFRP Stab – umwickelt mit einem Faden – ReforceTech AS BasBars[™], (h) BFRP Stab – umwickelt mit einem Faden – ReforceTech AS BasBars[™], (h) BFRP Stab – umwickelt mit einem Faden – ReforceTech AS BasBars[™], (h) BFRP Stab – umwickelt mit einem Faden – ReforceTech AS BasBars[™], (h) BFRP Stab – umwickelt mit einem Faden – ReforceTech AS BasBars[™], (h) BFRP Stab – umwickelt mit einem Faden – ReforceTech AS BasBars[™], (h) BFRP Stab – umwickelt mit einem Faden – ReforceTech AS BasBars[™], (h) BFRP Stab – umwickelt mit einem Faden – ReforceTech AS BasBars[™], (h) BFRP Stab – umwickelt mit einem Faden – ReforceTech AS BasBars[™], (h) BFRP Stab – umwickelt mit einem Faden – ReforceTech AS BasBars[™], (h) BFRP Stab – umwickelt mit einem

Mehrere Firmen (alle in Abbildung 3 mit ⁶ gekennzeichnet sind) bieten Bügel aus gebogenen FRP-Stäben an. Zwei unterschiedlich geformte sandbeschichtete BFRP-Bügel sind in Abbildung 5 zu sehen. Shehatta et al. [51] beschreiben zwei verschiedene Verfahren zur Herstellung dieser Bügel. Beim Ersten werden vorimprägnierte Stäbe über Metallstäbe gebogen und anschließend ausgehärtet. Dies führt zu einer Abflachung des Stabes im Bereich der Biegung. Im zweiten beschriebenen Produktionsverfahren werden die Bügel während des Aushärtungsprozesses gebogen. In beiden Fällen werden duroplastische Tränkungen verwendet was dazu führt, dass keine weitere Verformung der Bügel möglich ist. Eine Möglichkeit Bügel auf der Baustelle zu biegen wäre bei Verwendung von Thermoplasten denkbar, diese sind jedoch nicht am europäischen Markt erhältlich. Einige Firmen geben an, dass Feldumformung von Bögen mit großen Radien erlaubt ist solange die induzierten Biegespannungen im Stab vordefinierte Spannungen nicht überschreiten.





Abbildung 5: BFRP Bügel – sandbeschichtet – Galen Ltd ROCKBAR®

2.3.2 2D/3D Bewehrung

Zwei- oder dreidimensionale FRP-Bewehrung kann entweder durch mechanisches Fügen von 1D Bewehrungsstäben (trifft auf Produkte zu, die in Abbildung 3 mit ² markiert sind) oder mit Textilherstellmethoden (trifft auf Produkte zu, die in Abbildung 3 mit ¹ markiert sind) produziert werden. Beispiele solcher Bewehrungen sind in Abbildung 6 zu sehen. Das mechanische Fügen erfolgt in der Regel über Verbindungsmittel, wie. z.B. kleine Kupplungsstücke, die in ihrer Größe und Form je Hersteller unterschiedlich sind. Die Kraftübertragung an den Kreuzungspunkten erfolgt dabei primär über diese Kupplungsstücke. Die eigentlichen Eigenschaften der 1D Stäbe werden davon im Wesentlichen nicht beeinträchtigt. Anders sieht dies bei der Fertigung von textilen 2D oder 3D Bewehrungselementen aus. Ausgangsprodukt sind Faserstränge (Rovings), die in textilen Fertigungsprozessen zu zwei- und dreidimensionalen Gittern verarbeitet werden. Generell ist bei der Herstellung der Bewehrungen darauf zu achten, dass die Gitter offenmaschig genug sind, um einen ungestörten Durchfluss des Betons zu gewährleisten. Der Herstellungsprozess beeinflusst dabei die mechanischen und geometrischen Eigenschaften des Endprodukts. Im Folgenden werden die von den Herstellern angewandten unterschiedlichen Herstellungsprozesse (wirken, sticken, weben bzw. flechten) beschrieben und die Vor- und Nachteile näher beleuchtet.



ASFINAG



Abbildung 6: 2D und 3D Bewehrungselemente. (a) 2D CFRP Textil – gewirkt – Hitexbau GmbH HTC 10/15-40, (b) 2D CFRP Textil – gewirkt – solidian Q142/142-CCE-38, (c) 2D CFRP Textil – gewirkt – SIT Wilhelm Kneitz GmbH SITgrid0051P, (d) zwei verschiede 2D Matten aus 1D BFRP Stäben– verbunden mit Kupplungsstücken – Galen Ltd ROCKMESH®, (e) 2D GFRP textile – knitted – SIT Wilhelm Kneitz GmbH SITgrid200, (f) 3D GFRP/CFRP Textil – gewirkt – SIT Wilhelm Kneitz GmbH SITgrid031, (g) 3D GFRP Textil – gewirkt – SIT Wilhelm Kneitz GmbH SITgrid031, gewebt – Imperatyv LIGHTmesh®

Kettenwirken: Bei dieser Technik werden einzelne Rovings mit einem Wirkfaden verbunden, um ein mehrlagiges Gewebe zu erzeugen [52]. Die Schuss- und Kettrovings werden typischerweise gestreckt, bevor sie mit dem Wirkfaden fixiert werden (siehe z. B. der rote Faden in Abbildung 6(e)). Dies ermöglicht es einen nicht gewellten Faserstrang (non-crimp fabric; NCF) herzustellen, der eine hohe Zugfestigkeit und einen hohen Elastizitätsmodul aufweist. Neben den guten mechanischen Eigenschaften des Endprodukts zeichnet sich diese Technologie durch eine hohe Produktionsrate aus, wodurch die Endprodukte im Vergleich zu anderen Herstellungsverfahren in der Regel kostengünstiger sind. Obwohl es möglich ist, ein mehrlagiges Gewebe, mit Bewehrungslagen, die in verschiedenen Winkeln angeordnet sind, herzustellen, bestehen die meisten Produkte der jeweiligen Hersteller aus nur einem Schuss- und einem Kettroving, die in einem Winkel von 90° angeordnet sind. Beispiel hierfür sind in Abbildung 6(a)- Abbildung 6(c) und Abbildung 6(e) zu sehen. Es ist möglich Textilien mit unterschiedli-







chen Faserquerschnitten in Schuss- und Kettrichtung (z.B. das in Abbildung 6(a) gezeigte Textil von Hitexbau GmbH HTC 10/15-40 mit 48 k in Schuss- und 12 k in Kettrichtung) oder sogar unterschiedlichen Fasermaterialien (z.B. das in Abbildung 6(f) gezeigte SIT Wilhelm Kneitz GmbH SITgrid031 mit einem Gemisch aus AR-Glas- und Kohlefasern) herzustellen, wodurch sich eine Hauptbelastungsrichtung ergibt. Darüber hinaus ist es möglich, zwei Textillagen in einem definierten Abstand mit einem zusätzlichen Strickfaden senkrecht zu den Textilien zu verbinden, der als Verstärkungslage in der dritten Richtung wirkt. Dies ermöglicht die Herstellung von 3D-Textilien, wie in Abbildung 6(f) und Abbildung 6(g) dargestellt bzw. die in Abbildung 3 mit ⁴ gekennzeichnete Hersteller. Aufgrund der vielfältigen Vorteile des Kettenwirkens ist sie bei den befragten Herstellern die mit Abstand am häufigsten eingesetzte Herstellungsmethode für textile Bewehrungen.

Tailored Fibre Placement (TFP): dieses Verfahren, das zur Herstellung von 2D-Textilien verwendet wird, ist ein mit dem Sticken verwandtes Herstellungsverfahren. Hierbei werden die Garne auf ein Basismaterial gelegt und mit einem Nähfaden fixiert. Das Basismaterial besteht typischerweise aus einem wasserlöslichen Material oder einer TP-Folie und wird nach dem Stickvorgang aufgelöst, so dass ein fertiges 2D- oder sogar 3D-Textil [53] zurückbleibt. Die derzeit von Herstellern angebotenen Textilien, die mit der TFP-Technik hergestellt werden, sind jedoch auf 2D-Gitter beschränkt (z.B. Texible GmbH). Der Hauptvorteil dieses Herstellungsverfahrens ist die Möglichkeit, Garne mit unterschiedlichen Faserquerschnitten in beliebiger Orientierung zu platzieren, wodurch ein Textil entsteht, das der Spannungsverteilung im Betonbauteil angepasst ist. Nachteile sind eine geringere Zugfestigkeit und ein geringerer Elastizitätsmodul aufgrund der fehlenden Vorstreckung des Garns bei der Herstellung sowie eine geringere Produktionsgeschwindigkeit im Vergleich zu gewirkten Textilien.

Weben und flechten: Neben gewirkten und genähten Textilien ergab die Umfrage, dass 2D-Textilien auch durch Weben (z.B. IMPERATYV GFRP LIGHTmesh® wie in Abbildung 6(h) gezeigt) und Flechten (z.B. IMPERATYV GFRP HARDmesh®) hergestellt werden. In beiden Fällen wird die Bewehrung in einem automatisierten Produktionsprozess hergestellt. Die Verflechtung von Schuss- und Kettfaden bei gewebten Textilien führt jedoch zu einer Wellung in beide Richtungen, während geflochtene Textilien in Längsrichtung verdrillt sind, was in beiden Fällen die Endprodukte aufgrund der nicht lastrichtungsparallelen Anordnung der Fasern weniger effizient macht [54].

Die Imprägnierung der Textilien erfolgt typischerweise in einem separaten Arbeitsschritt nach der Produktion. Im Gegensatz zu FRP-Stäben ist ein Imprägnieren durch Pultrusion aufgrund der Querstränge nicht möglich. Die Imprägnierung erfolgt in diesem Fall meist indem das Textil







durch eine Wanne geführt wird die mit dem Tränkungsmaterial gefüllt ist (Foulard) und das dabei aufgebrachte Tränkungsmaterial über Rollen in die Faserstränge eingepresst wird [55]. Je nach verwendetem Tränkungsmaterial kann das Textil entweder nach dem Aushärten noch verformt werden (bei flexiblen Materialien; z.B. SBR) oder muss bereits vor dem Aushärten in die gewünschte Endform gebracht werden (bei steifen Matrizen; z.B. EP). Das Formen der Textilien zu 3D-Strukturen, wie es von einigen der kontaktierten Hersteller (in Abbildung 3 mit ³ gekennzeichnete Unternehmen) angeboten wird, führt mit den derzeitigen Methoden aber zu einer Verringerung der Steifigkeit und Zugfestigkeit, da im Rahmen des Formgebungsprozesses die Fasern nicht gleichmäßig gedehnt werden oder durch die zusätzlichen Fertigungsschritte Schaden nehmen können. Um die Verbundeigenschaften der textilen Bewehrung zu verbessern kann in einem separaten Prozessschritt, nach der eigentlichen Herstellung des Textils, eine Sandbeschichtung aufgebracht werden (in Abbildung 3 mit ⁵ gekennzeichnete Unternehmen). Dabei wird wie bei den sandbeschichteten GFRP-Stäben eine zusätzliche Matrixbeschichtung aufgetragen, in die feiner Quarzsand eingestreut wird, um eine raue Oberfläche zu erzeugen.

2.4. Mechanische Eigenschaften

Hinsichtlich der Materialeigenschaften werben alle Hersteller mit den gleichen Vorteilen:

- Mehrfach höhere Zugfestigkeit im Vergleich zu Stahl mit gleichem Durchmesser
- Geringeres Gewicht im Vergleich zu Stahl mit gleichem Durchmesser
- Hohe Korrosionsbeständigkeit
- Elektrisch nicht leitfähig (GFRP und BFRP)

Die Zusammenstellung aller verfügbarer Produkte zeigt große Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften von Stäben bzw. Textilien mit gleichen Zusammensetzungen. Bedingt durch das Pultrusionsverfahren, die Unterschiede im Bewehrungsgehalt (liegt zwischen 65% und 85%), die verwendeten Tränkungen und das Fehlen von einer tatsächlichen Standardisierung weisen die Produkte deutlich unterschiedliche Eigenschaften mit gleichem Durchmesser auf. Die in Tabelle 3 aufgelisteten Eigenschaften beziehen sich auf die Produkte aufgeteilt nach Faser, Matrix und Durchmesser bzw. Texcount. Exemplarische Vergleiche und Bewertungen von drei Stabdurchmessern von GFRP und BFRP Stäben verschiedener Hersteller sind in [56] dargestellt.







Tabelle 3: Übersicht der mechanischen Eigenschaften der Produkte der europäischen Hersteller mit Unterscheidung basierend auf Bewehrungsart, Dimensionierung, Faser und Tränkung

	Durch- messer Texcount	Faser	Matrix ¹	Hersteller ²	Dichte [g/cm³]	Zugfestigkeit [MPa]	E-Modul [GPa]	Bruch- dehnung [%]
1D	2 - 6	Basalt	EP	ARM, BAS, CGC, GAC, TEC	2	-	55 - 59	2,27 – 2,3
1D	2 - 6	Carbon	I EP	SOL, THY	1.5	2500	159 - 162	1.8
1D 2-6	2 - 6	Glass	EP	ARM, CGC, FIX, GAC, IMP, SOL	1.5 - 2.15	800 - 1350	55 - 65	1,9 – 2,2
			VE	SIR	-	900	46	1,9
1D	7-12	Basalt	EP	ARM, BAS, CGC, GAC, TEC	2	1565	59	2,8
			VE	ASA, REF	2,1	1950	59	1,72
1D	7-12	Carbon	I EP	SOL, THY	1,5	1650 - 2500	151 - 158	1,1 – 1,8
1D	7-12	Glas	EP	ARM, CGC, FIX, GAC, IMP, SOL	1,9 – 2,2	1150 - 1415	54.5 - 61	2,4 - 2,6
	7 12	Club	VE	ASA, ATP, FIR, SCH, SIR	2,1	1000 - 1200	46 - 63	1,6 – 2,1
1D	13 - 18	Basalt	EP	ARM, BAS, CGC, GAC, TEC	2	1190 - 1420	67	2.46 - 2.74
			VE	ASA, REF	2,1	1950	59	1.78 – 1.81
1D	13 - 16	Carbon	I EP	THY	1,5	1650	151	1.1
1D	13 - 18	Glas	EP	ARM, CGC, FIX, GAC, IMP, SOL	1,9 - 2	800 - 1300	58	2.2 - 2.39
			VE	ASA, ATP, FIR, SCH, SIR	2,1 – 2,2	800 - 1200	46 - 63	1.6 - 2.3
1D	19 - 25	Basalt	EP	ARM, BAS, CGC, GAC, TEC	2	900 - 1172	42 - 53.1	1.9 - 2.21
10	10 25	Glas	EP	ARM, CGC, FIX, GAC, IMP, SOL	2-2,2	870 - 1150	58	1.81 - 2.14
	19-20		VE	ASA, ATP, FIR, SCH, SIR	2,1 – 2,2	750 - 1200	46 - 63	1.3 - 2.3
			EP ³	ARM, FIX	-	-	-	-
1D	27 - 45	Glas	VE	ASA, ATP, FIR, SCH, SIR	2,1 – 2,2	413 - 1000	46 - 63	1.2 - 2.3
			EP	SOL, TEX	-	3000 - 4000	230	-
2D	12k - 96k	Carbon	AD	HIT, SIT, TEX, CHT	1,77 – 1,78	2200 - 3250	195 - 210	1.4 - 2.3
			SBR	HIT, SIT, TEX	1,77 – 1,8	1200 - 2850	170 - 210	1.17 - 1.24
2D	2400 tex -	Basalt	AD EP	HIT BAS	2,75 -	1140 - 1350 -	-	1.54 - 162 4
	3200 -		EP	SOL, TEX	-	1300 – 1500	72	-
2D	9600tex	Glas	AD	HIT, TEX	1,95	760 – 1000	40 – 46	-
			SBR	SIT, TEX	2,68	1200	-	-
1D 2D	6 – 40 5 – 14	BST – E	3550B		7,85	550	210	20
1D	6,9 - 15,7	SPST -	St1570/	1770	7,81	1770	195	3,5

¹ AD: Akrylatdispersion; EP: Epoxidharz; SBR: Styrol-Butadien Kautschuk; VE: Vinylesterharz

² ARM: Armastek; ASA: ASA.TEC; ATP: ATP Srl; BAS: Basalt Technologies UK Limited; CHT: CHT Group; CGC: Composite Group Chelyabinsk; FIR: FiReP; FIX: Fibrolux GmbH; FUF: Future Fibres Ltd; GAC: Galen Ltd; HIT: Hitexbau GmbH; IMP: IMPERATYV; REF: ReforceTECH AS; SCH: Schöck Bauteile GmbH; SIR: SIREG GEO-TECH SRL; SIT: SIT WilherIm Kneitz GmbH; SOL: solidian; TEC: Technobasalt-Invest LLC; TEX: Texible GmbH; THY: thyssenkrupp

³ max. hergestellter Durchmesser: 40mm







Da es sich bei FRP um einen Verbundwerkstoff handelt, wird zwischen der tatsächlichen und der Faserquerschnittsfläche unterschieden. Bei den eindimensionalen Bewehrungen, die in Längsrichtungen einen einheitlichen Querschnitt aufweisen, kategorisieren die Hersteller ihre Produkte nach dem Durchmesser des Produktes, wobei die Zugfestigkeit und der E-Modul in Bezug auf den tatsächlichen Querschnitt des Stabes angegeben werden. Aufgrund der Produktionsprozesse weisen Textilien keine einheitliche Querschnittsgeometrie in Längsrichtung auf. Die Hersteller kategorisieren ihre Produkte in Abhängigkeit von der Anzahl der Einzelfilamente (1k = 1.000 Einzelfilamente) oder der tex-Zahl, die das Längengewicht der Faser beschreibt (1tex= 1g/km). Die Zugfestigkeit und der E-Modul von Textilien wird meist in Bezug auf die Faserquerschnittsfläche oftmals auch in Bezug auf den gesamten Bewehrungsquerschnitt angegeben.

Generell kann zusammengefasst werden, dass Stäbe und Textilien aus Carbon eine höhere Zugfestigkeit und einen höheren E-Modul, aber eine geringere Bruchdehnung im Vergleich zu den Produkten aus Basalt und Glas aufweisen. Die Zugfestigkeit variiert mit dem Stabdurchmesser, während sich der E-Modul nicht nennenswert verändert [35]. Des Weiteren kann die Spannungs-Dehnungs-Beziehung als linear-elastisch bis zum Versagen beschrieben werden, eine Eigenschaft, mit der sich FRP Bewehrung wesentlich von konventionellem Betonstahl unterscheidet. Ein großer Einfluss des verwendeten Tränkungsmaterials auf die Zugfestigkeit ist bei dem Vergleich der Eigenschaften der Textilien zu erkennen, wobei epoxidharzimprägnierte Textilien die höchste Zugfestigkeit aufweisen.

Eine Besonderheit bei der Konstruktion und Bemessung mit nichtmetallischer Bewehrung, die noch nicht vollständig erforscht ist, betrifft die Dauerhaftigkeit im alkalischen Milieu des Betons. Während im normalen Stahlbeton das alkalische Milieu den Stahl vor Rost schützt, greift es bei FRP-Stäben die Faser und die Tränkung an. Es wird berichtet, dass die Langzeitfestigkeit durch Feuchtigkeit, alkalische Lösungen sowie Temperatur beeinflusst werden [57]. Viele der kontaktieren Hersteller geben eine im Bereich von 60%-90% der Kurzzeitfestigkeit an. Die Festigkeitsreduzierung wird aus beschleunigten Laborversuchen abgeleitet (z.B. Schöck), die nicht den realen Bedingungen in einer Betonstruktur entsprechen. Aktuelle Normen und Regelwerke geben Belastungsgrenzen für die Dauerbelastungen im Bereich von dem 0,2-(GFRP) bis 0,9-fachen (CFRP) der Kurzzeitfestigkeit an. Niedrigere Werte für die Dauerhaftigkeit werden im Allgemeinen für GFRP und BFRP-Bewehrungen angegeben, die eine ähnliche Degradation aufweisen [58] jedoch im Vergleich zu CFRP-Bewehrungen empfindlicher gegenüber chemischen Angriffen im alkalischen Beton sind [59].







Umfassende Literaturrecherchen und der Austausch mit anderen Forschern zeigen eine höhere Langzeitfestigkeit auf. Die in einem Bericht [60] beschriebenen Ergebnisse von Untersuchungen von zwei GFRP-verstärkten Brückenbauwerken nach elf und fünfzehn Jahren zeigten keine merkliche Degradation der Stäbe, obwohl der pH-Wert des Betons mäßig bis hoch war. Die Problematik der niedrigen Angaben von Langzeitfestigkeiten ist ein Thema, das mit Bedacht betrachtet werden sollte, um nicht sofort als Ausscheidungsgrund zu gelten.



Abbildung 7: Zugfestigkeit-E-Modul- Verhältnis der nichtmetallischen Bewehrungen der europäischen Hersteller

Ein weiterer zu beachtender Faktor für den Einsatz von FRP ist die elektromagnetische Leitfähigkeit. CFRP ist im Gegensatz zu GFRP und BFRP leitfähig. Während dies für die CFRP-Bewehrung selbst keine Probleme verursacht, kann die Leitfähigkeit zu einer beschleunigten Korrosion (Bimetallkorrosion) der in der unmittelbaren Nähe verlegten Stahlbewehrung führen [61]. Dies Phänomen muss berücksichtigt werden, um Probleme in hybriden Stahl/CFRP-Stahlbetonkonstruktionen zu vermeiden.







2.5. Verbundeigenschaften

Ein ausreichender Verbund zwischen Bewehrung und Beton ist Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit des Verbundwerkstoffes. Da es keine verbindlichen Regelungen zu den geometrischen Eigenschaften der FRP-Bewehrung gibt, wie dies z.B. bei Stahlbewehrung der Fall ist, findet man bei den Herstellern eine Vielzahl unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheiten mit daraus resultierendem deutlich unterschiedlichem Verbundverhalten. Ein qualitativer Vergleich des Verbundverhaltens unterschiedlicher FRP-Bewehrungen mit Stahlbewehrungen wird in Abbildung 8 gegeben.



Abbildung 8: Vergleich des Verbundes in Abhängigkeit des Schlupfes von unterschiedlichen Bewehrungsarten mit unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen (basierend auf Werten aus der Literatur [62]–[64])

Generell kann das Verbundverhalten wie auch bei Stahlbewehrungen in (a) adhäsiven Verbund, (b) Verbund durch Reibung und (c) mechanischen Verbund unterteilt werden, wobei der maßgebende Mechanismus stark vom Schlupf zwischen der Bewehrung und dem Beton abhängig ist. Während die übertragbaren Verbundspannungen infolge Adhäsion schon bei sehr geringen Verformungen abnehmen, sind für eine Übertragung von Verbundspannungen infolge Reibung und mechanischer Verzahnung eine raue Oberfläche der Bewehrung und Relativverschiebungen zwischen Bewehrung und Beton erforderlich.

Wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben, wird der unzureichenden Verbundfestigkeit und Steifigkeit von glatten FRP-Stäben mit verschiedenen Oberflächenbehandlungen entgegengewirkt, die eine mechanische Verzahnung ermöglichen bzw. die Reibung erhöhen und so die Verbund-festigkeit verbessern [55], [65]. Aufgrund der verschiedenen Oberflächenbehandlungen liegen die von den Herstellern angegebenen Werte für die mittlere Verbundfestigkeit in einer großen Bandbreite, die von 3,0-7,4 MPa für umwickelte FRP-Stäbe bis zu mehr als 30,0 MPa für ge-rillte Stäbe reicht [66], [67]. Bei Letzteren ist die Verbundfestigkeit und die Verbundsteifigkeit







vergleichbar mit einer normalen Stahlbewehrung. In eigenen Versuchen wurde festgestellt, dass die kurzfristige Verbundfestigkeit die von den Herstellern angegebenen Werte aber deutlich übertreffen kann [68]. Dies gilt insbesondere für umwickelte FRP-Stäbe, bei denen die Verbundfestigkeit davon abhängt, wie eng der Faden um den Stab gewickelt ist. Weiters wird die Verbundfestigkeit durch die langfristige Exposition in der ungünstigen Betonumgebung verringert. Prognosemodelle (z. B. [25]) geben eine Verringerung gegenüber der Kurzzeit-Verbundfestigkeit um bis zu 50 % an. Neue Literaturquellen berichten jedoch von sehr hohen Erhaltungsraten unter verschiedenen Expositionsumgebungen und Expositionszeiten [69]. Insgesamt kann festgestellt werden, dass nicht nur die Verbundfestigkeit, sondern auch das Verbundverhalten an sich sehr unterschiedlich ist [3], [63], [64], [70], und die von den Herstellern angegebenen Werte eine konservative Untergrenze der Verbundfestigkeit von FRP-Stäben darstellen.

Im Gegensatz zu FRP-Stäben weisen textile Bewehrungen bereits eine gewisse Rauheit und Rippenstruktur auf. Diese ist auf den Herstellungsprozess zurückzuführen, da die Faserstränge typischerweise an der Kreuzung der Längs- mit den Quersträngen, wo sie durch einen Faden verbunden sind, kompaktiert werden. Je nach verwendetem Tränkungsmaterial und der Größe der Querschnittsabweichung an diesen Stellen sind entweder Adhäsion und Reibung die entscheidenden Verbundmechanismen, wie es bei einem weichen Tränkungsmaterial und einer geringen Querschnittsabweichung der Fall ist [63], [71] (z. B. SIT Wilhelm Kneitz GmbH SITgrid030), oder es wird eine mechanische Verzahnung erreicht, die durch eine ausgeprägte Querschnittsvariation der Faserstränge entsteht, die durch ein steifes Matrixmaterial fixiert wird [70], [72] (z. B. solidian Q95/95-CCE-38). Zur weiteren Verbesserung der Verbundeigenschaften ihrer textilen Produkte bieten einige Hersteller eine zusätzliche Sandbeschichtung an (in Abbildung 3 mit ⁵ gekennzeichnete Firmen).

2.6. Lieferzeiten und Kosten

Die erhaltenen Kosten (von 4 Herstellern von 1D Bewehrung und 3 Herstellern von 2D/3D Bewehrung) für die Produkte variieren stark (Stäbe 3,50 €/kg – 82,50 €/kg bzw. 0,08 €/m -9,90 €/m, 2D/3D 0,50 €/m² - 46 €/m²). Die Hersteller geben an, dass alle Kosten Projektabhängig abzufragen sind und sehr von der Projektgröße und dem gewünschten Produkt abhängen, wodurch eine pauschale Aussage nicht möglich ist. Die Faktoren, die den Preis ausmachen können folgendermaßen definiert werden: (1) Faser (Carbon, Glas, Basalt), (2) Abmessung (Stabdurchmesser zwischen 2mm und 45mm), (3) Bewehrungsgehalt (Gewichtsanteil Faser zwischen 65% und 85%), (4) Herstellungsart und Nachbearbeitung (gestrickt, gewebt,





gesteckt, sandbeschichtet, gefräst, umwickelt, Formbewehrung, usw.) und (5) Abnahmemenge. Die Gegenüberstellung inklusive möglichem Einsparungspotential bei den Erhaltungskosten auf Grund von Korrosionsschäden bei Betrachtung eines gesamten Lebenszyklus kann Kapitel 6 entnommen werden.

2.7. Zulassungen

Um eine breite Anwendung von nichtmetallischer Bewehrung im Neubau zu gewährleisten ist eine bauaufsichtliche Zulassung unumgänglich. Durch die Zulassung entfallen aufwändige Verfahren für eine Zulassung im Einzelfall. Derzeitig ist nur der Glasfaserbewehrungsstab Schöck ComBAR (Schöck Bauteile GmbH) mit den Nenndurchmessern 8, 12, 16, 20 und 25 Millimetern bauaufsichtlich zugelassen. Die Firmen soldian und ASA.TEC sind kurz vor der Einreichung für Zulassungen für mehrere Produkte. Eine aktuelle Liste zu weiteren allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen zum Thema Carbon- und Textilbauweise (Fassadenplatten, Wandhalter, unterschiedliche Verfahren, Textilglasgewebe zur Bewehrung von Putzen, Sandwichwände usw.) sind unter: <u>https://www.bauen-neu-denken.de/abz/</u> zu finden [73].

2.8. Derzeitige Einsatzgebiete

FRP-Bewehrung für den Betonbau werden seit den 1960er Jahren in den USA erforscht. Umfangreiche Forschungstätigkeiten wurden auch in Europa und Japan in den 1970er Jahren durchgeführt. In den späten 1980er Jahren wurden FRP-Bewehrungen als interne Bewehrung für Betonkonstruktionen erstmals kommerziell verfügbar und praktikabel einsetzbar.

Typische Anwendungsbereiche sind Betonbauwerke, die in einer aggressiven Umgebung betrieben werden, einschließlich Bauwerke in Meeresgebieten [74], Bauwerke in Kontakt mit Grundwasser oder Boden, z. B. Fundamentplatten und Pfähle [75], oder Bauwerke, die Tausalzen ausgesetzt sind, z. B. Brückenbauwerke [76]. Aufgrund der hohen Korrosionsbeständigkeit der FRP-Bewehrung wird davon ausgegangen, dass die Lebensdauer solcher Bauwerke deutlich erhöht werden kann, ohne dass eine große Betonüberdeckung wie bei stahlbewehrten Betonbauwerken erforderlich ist. Weitere Vorteile der FRP-Bewehrung hängen mit ihren elektromagnetischen Eigenschaften zusammen. Da GFRP- und BFRP-Bewehrungen nichtmagnetisch sind, können sie in Betonstrukturen eingebaut werden, die elektromagnetisch empfindliche Geräte beherbergen, z. B. Krankenhäuser, insbesondere in der Nähe von MR-Räumen, oder in Umspannwerke [77], [78]. Andererseits ist CFRP-Bewehrung elektrisch leitfähig, was zur Herstellung eines kathodischen Korrosionsschutzes genutzt werden kann. Erste Untersuchungen an CFRP-Textilbewehrungen als flächige Anode zeigten vielversprechende Ergebnisse [79].







Darüber hinaus zeichnen sich GFRP-Stäbe durch eine einfach mögliche spanende Bearbeitung aus. Diese Eigenschaft ist von großem Vorteil, wenn das Bauteil z.B. gebohrt oder geschnitten werden muss. GFRP-Stäbe wurde deshalb zur Schaffung eines "weichen Auges" in Tunnelbauwerken verwendet. Ein Teil des Ausbruchsschachtes kann mit GFRP-Stäben bewehrt werden, so dass die Tunnelbohrmaschine die Schachtwand leicht durchschneiden kann, ohne den Schneidkopf zu beschädigen [80]. Bei der Anwendung von textilbewehrtem Beton (ausschließlich textilbewehrt oder in Kombination mit FRP-Stäben) ist in neu errichteten Bauwerken ein Trend zu sehr schlanken und leichten Bauteilen zu beobachten [8], [81], [82], was eine Verringerung des Materialverbrauchs und eine Reduzierung des Transport- und Montagegewichts ermöglicht. Aufgrund der sehr kleinen Bewehrungsfläche pro Faserstrang kann die Betondeckung auf ein Minimum reduziert werden, wobei die Abtragung der auftretenden Verbundspannungen der textilen Bewehrung dennoch möglich ist [83]. Weiters eröffnen FRP-Bewehrungen neuen Möglichkeiten für die Herstellung von Stützen [84], Platten [85], Fassadensystemen [86], Wänden [87], Spannbetonträgern [88], Brücken [89] und Eisenbahnschwellen [90].

Abschließend kann zusammengefasst werden, dass FRP-Bewehrung vielfältiges Einsatzpotential im Betonbau aufweist. Dies zeigt sich auch in der großen Anzahl an umgesetzten Referenzprojekten, die seitens der kontaktierten Hersteller angegeben wurden. Diese reichen vom Schienen- und Gleisbau, Brückenbau (z. B. Fairway Road Bridge in Kanada (Schöck) oder Fußgängerbrücke Albstadt-Ebingen wie in Abbildung 9(a); solidian) bis hin zum Tunnelbau, Wohnbau (z. B. mehrstöckiges Gebäude in Krasnojarsk; Galen Ltd.), Industrieböden, Forschungseinrichtungen (z. B. Conrad-Observatorium in der Schweiz; FiReP), wie in Abbildung 9(c) gezeigt, und Krankenhäusern, Parkhäusern, Fundamenten und Bohrpfählen.



Abbildung 9: Beispiele für Referenzprojekte mit FRP-Bewehrung: (a) Fußgängerbrücke, Deutschland, bewehrt mit 2D-CFRP-Bewehrung (© soldian GmbH) (b) Schulprojekt in Oksenoya, Norwegen, bewehrt mit BFRP-Bewehrungsstäben (ReforceTech) (c) Conrad-Observatorium, Schweiz, bewehrt mit GFRP-Bewehrungsgittern aus Stäben (FiReP), die aufgrund der Notwendigkeit, magnetische Materialien zu vermeiden, verwendet wurden.





3. KNOWLEDGE-HUB

3.1. Allgemeines

Die Abwicklung von Forschungsprojekten birgt mitunter die Gefahr, dass die Forschungspartner an den Bedürfnissen auf Auftraggeberseite vorbeiarbeiten, da es im üblichen Prozess nie eine beidseitig erarbeitete Definition von Zielen gibt. Zusätzliche Feedbackschleifen mit den Auftraggebern wurden bei der Bearbeitung dieses Projekts deshalb als sinnvoll erachtet, da das Projekt eine große Schnittmenge mit praktischen Aufgabenstellungen der Infrastrukturbetreibers hat. Durch gemeinsame Fokuslegung sollen die Ziele aufgrund der Bedürfnisse auf beiden Seiten in einem ko-kreativen Prozess erarbeitet werden und in die Bearbeitung des Projekts einfließen. Dabei wurde eine Bündelung von Know-How zwischen den Forschungspartnern, den Auftraggebern und externen Forschungseinrichtungen prozessorientiert organisiert. Dies erfolgte in mehreren Schritten:

- Fragebogen für Infrastrukturbetreiber (siehe Anhang A)
- Bedarfsanalyseworkshop mit Auftraggebern
- Symposium mit internationalen Forschungspartnern



Abbildung 10: Mehrstufiger Aufbau eines Knowledge-Hubs

Folgende Grundsätze wurden im Prozessdesign integriert:

(a) Den Kreis der Mitwirkenden größer werden lassen: Der Adressatenkreis wurde im Prozess stetig erweitert, um bewusst verschiedene Kommunikationsräume zu schaffen. So wurde in der Fragebogenbogenphase die Möglichkeit interner Abstimmungen gegeben, bevor mit weiteren Projektpartnern vernetzt wurde. Die Erstellung des Fragebogens, konnte wiederum dazu beitragen, im Forschungskonsortium ein gemeinsames Bild der Aufgabenstellung zu schaffen. Die Ergebnisse bildeten die Grundlage für den gemeinsamen Workshop bei dem auf Augenhöhe offene Fragen und Bedürfnisse in einem extern moderierten Prozess angesprochen werden konnten. Im letzten Schritt





wurde auf die Größenordnung Symposium erweitert, bei dem auch die Sicht von externen Forschungseinrichtungen mit fundierter Erfahrung auf dem Gebiet nichtmetallischer Bewehrung einfließen konnte.

- (b) Externe Moderation: Beim Workshop mit 14 geladenen Teilnehmern wurde besonders darauf geachtet, eine bedürfnis- und ergebnisorientierte Arbeitsbasis zu schaffen. Nicht nur die Vielzahl der Teilnehmer, auch die begrenzte Zeit von einem Tag waren Kriterien, die zu einer Entscheidung für eine externe Moderation führten.
- (c) Vernetzung: Durch das Schaffen unterschiedlicher Kommunikationsräume fernab von den obligatorischen Ergebnispräsentationen konnten verbindende Elemente inner- und außerhalb des Forschungsprojekt geschaffen werden. Das liefert auch eine langfristige Basis des Zusammenarbeitens und des gemeinsamen Entwickelns.

Folgende Ziele konnten dadurch erreicht werden

- Identifizierung der wesentlichen Schadensbilder und dem Instandsetzungsaufwand aufgrund von Bewehrungskorrosion und Dauerhaftigkeitsproblemen im österr. Infrastrukturnetz (siehe 3.2).
- Bestimmung der wesentlichen Anforderungen an relevante Bauteile hinsichtlich der mechanischen Beanspruchung, der Umwelteinflüsse, der Lebensdauer etc. (siehe 3.2).
- Definition von Bauteilen, bei denen durch den Einsatz von FRP-Bewehrung ein finanzielles Einsparungspotential zu erwarten ist (siehe 3.3)
- Wissenstransfer mit internationalen Forschungspartnern (siehe 3.4).

Dies bildete die Basis für die zielgerichtete und praxisnahe Analysen in den weiteren Arbeitspaketen (AP 4-6).

3.2. Schadensbilder und Anforderungen

Die Ergebnisse der Fragbögen und des moderierten Workshops werden nachfolgend aufbereitet zusammengefasst. Dabei war der Blickpunkt der Infrastrukturbetreiber von besonderer Relevanz, da diese "ihr Netz" am besten kennen.

Zur Bestimmung des Potentials von nichtmetallischer Bewehrung im Infrastruktur-Betonbau ist vor allem eine Kenntnis der Schäden, als auch der finanziellen Auswirkungen notwendig. Ty-



pische Schäden sind Risse, Abplatzungen und Ausblühungen bzw. Korrosion aufgrund zu geringer Betondeckungen oder abgeplatzte Betondeckungen. Diese Schäden kommen laut Angaben der Infrastrukturbetreiber vor allem bei folgenden Bauteilen vor:

- Mittelstützen Überführungen, Wänden im Spritzwasserbereich
- Bewehrung von Stützmauern im hinteren Bereich (mögliche klaffende Fuge bei Druckwasser)
- Innenschale Tunnel
- Deckel bei Kabelkanälen im Tunnel
- Bereiche Widerlager unter Fahrbahnübergangskonstruktionen (FÜK) bzw. Folgeschäden bei undichter FÜK.
- Kragplatten bei Brückenrändern
- hochgradig bewehrte Bauteile (Stützen)
- Sockelbrett Lärmschutzwand (LSW)

Abgesehen von Dauerhaftigkeitsproblemen aufgrund der Bewehrungskorrosion, stellen aktuell folgende Bauteile die größten Herausforderungen für die Infrastrukturbetreiber dar:

- FÜK-Schäden
- Fahrbahnbelag auf Brücken inkl. Abdichtung
- Risse und Karbonatisierungsschäden in Betongewölben, Frostschäden bei Beton
- Risse und Frost- bzw. Karbonatisierungsschäden bei Fundamenten und Rinnen in Wasserläufen
- Schäden an Lagern und Übergängen (eher selten)

Die dadurch anfallenden Kosten werden aus Erfahrungswerten als Benchmarkwerte (€/m², siehe Tabelle 4) für verschiedene Bauteile in der Erhaltung bzw. in Lebenszykluskostenanalyse von Brücken gib es die RVS13.05.11 [91], welche durchschnittliche Kostensätze für Brücken und ihre Bauteile liefert. Prinzipiell werden bei Bahnbauwerken laut Aussagen der ÖBB erhaltungsoptimierte Lösungen gebaut. Die Erstinvestitionssumme allein ist nicht die bestimmende Größe. Bei größe-







ren Objekten werden 2 bzw. 3 Varianten untersucht und hinsichtlich der LZK-Kosten verglichen. Die wirtschaftlichste Variante, unter Berücksichtigung der Lebensdauer, Kosten für Ausund Einbau, Kosten über die Lebensdauer inkl. Abbruch, Kosten aus den Ausbaugewerken, sowie Kosten der erforderlichen Gleissperren kommt dann zur Ausführung. In seltenen Fällen kann es vorkommen, dass zwei Lösungen ausgeschrieben werden, wenn aus der Planung keine eindeutigen Kostenvorteile entstehen. Im Straßenbau werden ebenfalls LZK-Analysen gemacht, jedoch nicht flächendeckend. Sowohl bei Straße und Schiene wurden erhaltungsoptimierte Regelbauweisen (z.B. Bahnsteigkante, Winkelstützmauer) erarbeitet, welche auch die wesentlichen mechanischen Anforderungen aus diversen Regelwerken berücksichtigen. Diese sind online unter Planungshandbücher: Asfinag (https://www.asfinag.net/planung/plapb/bau/) und Regelplanung ÖBB (https://infrastruktur.oebb.at/regelwerke/normen/preview/27) verfügbar.

T - I II		 	D - 4 - 12 12 - 4 - 12 - 1 4 - 12 - 12
I ADOLO 4. EVOR	nniarische Kenci	nmarkwerte tur	Retoningtangetzi ing
			Dotormistanusotzung

Instandsetzung	Bauteil	Kosten je m² Instand- setzungsfläche	Quelle	
Betoninstandsetzung bei Brücken (einschließlich Rüstung)	 Tragwerksunter- sicht Stützen Widerlager 	150 €/m² (Preisbasis 2015)	RVS 13.05.11	
Sanierung bei Stützmau- ern	 Ersatz einzelner Bauteile (Erneue- rung von Randbal- ken, Ausrüstung, Ersatz einzelne An- ker) Betoninstandset- zungen 	50 €/m² (Preisbasis 2018)	Asset Management Handbuch Gean- kerte und nicht ge- ankerte Stützbau- werke	

Der Zustand eines Infrastrukturbauwerks wird regelmäßig kontrolliert und geprüft (Bei Stützwänden alle 12 Jahre, Brücken alle 6 Jahre). Die Kosten für Kontrolle und Prüfung sind hier ebenfalls im Lebenszyklus zu berücksichtigen (€ 2 bis 3 €/m²,a). Die materielle Alterung hat genauso wie die Dauerhaftigkeitsproblematik Einfluss auf die Bewertung des Netzzustandes, jedoch können diese nicht isoliert betrachtet werden. Über die Zustandsnote (Schulnotensystem: 1-5 bei Straße bzw. 1-4 bei Schiene) geht die Bauwerksstruktur in den Netzzustand ein. Die Zustandsnote wird anhand des Bauwerkszustandes ermittelt. Der Zustand entscheidet über den Umfang und die Dringlichkeit einer Maßnahme.






3.3. Identifiziertes Potential

Korrosionsbedingte Schäden sind aufgrund der permanenten Belastung durch Umwelteinflüsse der Hauptkostentreiber bei der Instandhaltung von Infrastrukturbauwerken. Eine aktuelle Studie schätzt, dass in der Schweiz etwa 50% der Instandhaltungskosten von Infrastrukturbauwerken in direktem Zusammenhang mit Korrosion stehen könnten [92]. Dies entspricht etwa 0,1 % des BIP, was ebenso den in den USA geschätzten Werten entspricht [93], obwohl der jeweilige Instandhaltungsansatz völlig anders ist.

Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit von Infrastrukturbauwerken kann darin bestehen, die Angriffsanfälligkeit des Bewehrungsstabs zu verringern, indem der Stahl durch ein alternatives und haltbareres Material, wie beispielsweise FRP-Bewehrung, ersetzt wird [94]. Allerdings werden die Dauerhaftigkeitseigenschaften der GFRP-Bewehrung widersprüchlich diskutiert, da keine Daten über eine übliche Nutzungsdauer für den Infrastrukturbau von bis zu 100 Jahren vorliegen. Mehrere Faktoren beeinflussen die Dauerhaftigkeit der FRP-Bewehrung wie Belastung, Temperatur, Feuchtigkeit und Alkalität, wobei die Belastung den größten Einfluss hat [25]. Dabei ist zu beachten, dass die Abhängigkeit von diesen Faktoren im Hinblick auf das jeweilige FVK-Verstärkungsprodukt (Fasermaterial, Matrixmaterial und Produktform) sehr spezifisch ist, wobei Carbonfasern als besonders widerstandsfähig erscheinen [59].

Mehrere Erstanwendungsbeispiele von Carbon-Textilverstärkungen im Brückenbau in Deutschland haben das Potenzial der neuen Materialien gezeigt. Eine erfolgreiche Anwendung beim Bau einer Plattenbrücke [95], der Verstärkung von Fahrbahnplatten sowie Plattenelementen für Brückenfahrbahnen für Fußgängerbrücken [8] oder Parkplätzen [96] präsentiert werden.

Zur Bewertung eines möglichen Einsatzes nichtmetallischer Bewehrung in Infrastrukturprojekten wurde gemeinsam mit den österreichischen Infrastrukturbetreibern korrosionsanfälligen und instandhaltungsintensiven Elemente betrachtet. Drei unterschiedliche Potentialfelder wurden identifiziert: Verbesserung der Dauerhaftigkeit, Steigerung der Materialeffizienz, Verbesserung des Wartungsprozesses.

- 1) Verbesserung der Dauerhaftigkeit:
 - Konstruktionen mit Tausalzbelastung (z. B. Bahnsteigkanten)
 - Spritzwasserbereiche (z. B. Stützen/Zwischenwände in Überführungen, Tunnelinnenschalen)





- Bereiche mit Druckwasser (z.B. hinter Widerlagerwänden durch Folgeschäden durch undichte Straßenübergangsbauwerke, hinter Stützmauern)
- 2) Steigerung der Materialeffizienz:
 - massengefertigte dünne Elemente (z. B. Kabelkanäle, Kabelkanal-Abdeckplatten)
 - hochbewehrte, für die Tragfähigkeit kritische Bauteile (z.B. Rahmenecken, Stützen)
- 3) Verbesserung des Wartungsprozesses:
 - kritische Bewehrungslagen, die nicht inspiziert werden können und wesentlich zur Tragfähigkeit beitragen



Abbildung 11: Potentielle Einsatzfelder von nichtmetallischer Bewehrung im Infrastrukturbau

Folgende Bauteile werden daher in den Arbeitspaketen 4 + 5 ökologisch als auch ökonomisch durch Lebenszykluskostenberechnungen von Alternativentwürfen analysiert, mit dem Ziel ein ausgewogenes Spektrum von Bauteilen im Infrastrukturbereich abzubilden.

- Große Rahmenbrücke (15 m) (siehe 6.4)
- Winkelstützmauer (siehe 6.5)
- Bahnsteigkante (siehe 6.6)







3.4. Internationales Symposium

Aufgrund reger Forschungstätigkeiten auf dem Gebiet in Deutschland (RWTH Aachen, TU Dresden, TU Berlin) wurden bestehende partnerschaftliche Beziehungen dazu genutzt, um einen Wissenstransfer über die Grenzen hinaus, in beide Richtungen zu ermöglichen. Basis dafür bildete ein von Dr. Tobias Huber moderiertes Symposium am 22.01.2021.

Das Vortragsprogramm wurde unter der Maßgabe ein möglichst breites Bild der Anwendungspotentiale von nichtmetallischer Bewehrung zu zeigen und eine vertiefende Diskussion zu ermöglichen. Dafür wurde ein Format mit Kleingruppen in Breakoutsession gewählt.

- Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung von der Grundlagenforschung über Anwendungsprojekte zur DAfStb-Richtlinie Dr.-Ing. Norbert Will – RWTH Aachen
- Vorspannung von nichtmetallischer Bewehrung Dipl.-Ing. Juan Pablo Osman Letelier – TU Berlin
- Ökologische Analyse von nichtmetallischer Bewehrung Dipl.-Ing.ⁱⁿ Nadine Stoiber – BOKU Wien
- Verstärkung von Brücken mit Carbonbeton Dipl.-Ing. Oliver Steinbock – TU Dresden

Eine einleitende Umfrage der anwesenden Teilnehmer zeigte, dass es sich hier zum Großteil um Experten mit einem hohen Wissenstand über die Materie handelte. Über das zukünftige Potential von nichtmetallischer Bewehrung waren sich die Teilnehmer einig, wobei die heutige breite Anwendung noch nicht gegeben sei.

Zustimmung

Hohe

Nichtmetallische Bewehrung... Das Thema ist mir bekannt" ¹Das Thema ist mir bekannt" ¹

Abbildung 12: Einleitende Umfrage unter den Teilnehmern des Symposiums

Ein zwölfseitiges Follow-up der Veranstaltung wurde an die teilnehmenden Organisationen versendet. Die Videos der Vorträge und die angesprochenen Punkte in den Breaktoutsessions sind in diesem enthalten. Sowohl in Bezug auf den Stand der Richtlinienerarbeitung in Deutschland (für Berechnungen AP4), als auch zum Recycling (AP6) wurde der Grundstein für den späteren Austausch gelegt.



4. ENTWURF MATERIALGERECHTER BAUTEILE INKL. PARAMETER-STUDIE

4.1. Richtlinie und Normenstand

In den letzten Jahrzehnten wurden verschiedene Richtlinien, Regelwerke sowie Bemessungsvorschriften und Empfehlungen zur Konstruktion und Bemessung sowie zur Prüfung von FRP-Strukturen erarbeitet (z. B. [24], [25], [47], [97]–[101]). Ein umfassender Überblick zu diesem Thema findet sich auch in Emparanza et al. [102]. Während die nordamerikanischen Richtlinien und Normen regelmäßig bestätigt wurden, sind die europäischen Regelungen etwas veraltet. Es ist aber geplant, der neuen Generation des Eurocodes 2 einen informativen Anhang hinzuzufügen, der sich mit der Bemessung von mit FRP-bewehrten Betonstrukturen befasst [103]. Die aktuellen Richtlinien und Vorschriften spiegeln jedoch nicht die Entwicklungen im Bereich der Textilbewehrung wider. Obwohl es Ähnlichkeiten im Tragverhalten gibt, müssen Unterschiede in anderen Eigenschaften, z.B. im Verbundverhalten, berücksichtigt werden. Erste europäische Richtlinien, die sowohl die FRP-Stabbewehrung als auch die Textilbewehrung einbeziehen, werden derzeit entwickelt [18]. Eine Einführung der Richtlinien ist laut Kenntnisstand der AutorInnen dieses Berichts im Jahr 2022-2023 geplant. Die Ausführung mit textilbewehrtem Beton ist bis dahin noch abhängig von Bauproduktzulassungen oder der Zulassung im Einzelfall [104].

Im Zuge dieses Forschungsprojektes wurde eine Gegenüberstellung der in Tabelle 5 agenführten Normen durchgeführt. Eine genaue Zusammenstellung ist im Repositum der TU Wien zur finden: https://repositum.tuwien.at/handle/20.500.12708/16025

Dokumentenname	Land	Erscheinungsjahr (letztgültige Fassung)
JSCE 1997 [98]	Japan	1997
ACI 440 2015 [47]	USA	2015
AASHTO 2018 [100]	USA	2018
CSA 2012 [24]	Kanada	2017
CSA 2019 [105]	Kanada	2019
CNR 2007 [97]	Italien	2007

Tabelle 5: Regelwerke zu Design und Bemessung von FRP-bewehrten Betonbauteilen, die im Zuge des Forschungsprojektes verglichen wurden

Es können folgende Schlussfolgerungen aus diesem Vergeich gezogen werden:

 Die Sicherheitsfaktoren unterscheiden sich z.T. wesentlich, wobei ACI 440 2015 den konvervativsten Ansatz verfolgt (FRP-Abminderung auf 0.55) und JSCE 1997 den am wenigsten konservativen (0.87 für CFRP). Selbiges gilt für die Mindestbewehrung. ACI 440 2015 weist mit dem 1,8-fachen Rissmoment die höchsten Anforderungen auf und



ist demnach konservativer als andere Regelwerke mit z.B. 1,5-fachem Rissmoment (CSA 2012; CNR 2007).

- Die Bemessung der Biegemomente beruht im Allgemeinen auf dem inneren Kräftegleichgewicht, wobei ein Versagen der Bewehrung und ein Versagen des Betons unterschieden wird. ACI 440 2015 gibt in Abhängigkeit des Versagens unterschiedliche Sicherheitsfaktoren für den Momentenwiderstand an, wobei diese für ein Betonversagen geringer ausfallen, da angenommen wird, das es "duktiler" verläuft. Bei dem empfohlenen Betonversagen kann die hohe Zugfestigkeit der Bewehrungen in der Regel aber nicht ausgenutzt werden.
- Die Bemessungsmodelle für die Querkrafttragfähigkeit unterscheiden sich z.T. wesentlich. Es werden in allen Regelwerken zwei seperate Traganteile, bestehend aus dem Betontraganteil und dem Traganteil der Bewehrung, berücksichtigt. Die Formeln sind meist aus dem Stahlbetonbau abgeleitet und angepasst. Um ein sprödes Schubversagen zu vermeiden wird in allen betrachteten nordamerikanischen Regelwerken die Spannung der Schubbewehrung begrenzt. Zusätzlich begrenzen ACI 440 2015 und CSA 2019 die Dehnung der Schubbewehrung auf 0,004. Eine Variation des Druckstrebenwinkels wie im Stahlbetonbau wird nicht in allen Regelwerken zugelassen, da die Plastizitätstheorie bei FRP-bewehrten Bauteilen keine Gültigkeit besitzt. CSA 2012 sowie AASHTO 2018 lassen jedoch eine Variation des Druckstrebenwinkels in Abhängigkeit der Längsbewehrungsdehnung zu.
- Die Spannung im Bewehrungsstab muss im SLS auf teils sehr niedrige Werte begrenzt werden, um Kriechbruch zu vermeiden. Generell ist die Größenordnung stark vom verwendeten Fasermaterial abhängig, weswegen in fast allen Regelwerken in dieser hinsicht differenziert wird. Einzig JSCE 1997 unterscheidet nicht nach Material der FRP-Bewehrung und ist auch am wenigsten konservativ, während in ACI 440 2015 die Abminderungen am größten ausfallen. Insgesamt ist die Spannung auf deutlich niedrigere Werte als bei Betonstahl nach dem EN 1992-1-1 begrenzt (abgesehen für Carbon in CNR 2007).
- Die Rissbreitenbeschränkung findet entweder auf Basis einer direkten Berechnung der Rissbreiten (CNR 2007; JSCE 1997; ACI 440 2015; CSA 2019), oder durch Einhaltung von Höchstabstandsgrenzen der Bewehrung (indirekte Methode des ACI 440 2015, AASHTO 2018; CSA 2012) statt. Da Korrosion keine Rolle spielt, sind je nach Regelwerk großzügigere Rissbreiten zulässig. In CNR 2007 und JSCE 1997 sind dies





0,5 mm während in den nordamerikanischen Regelwerken unter Umständen bis zu 0,7 mm erlaubt sind.

- Die Begrenzung der Verformungen wird in der Regel mittels direkter Berechnungen der Durchbiegungen (CNR 2007; ACI 440 2015; AASHTO 2018; CSA 2012) durchgeführt. Lediglich ACI 440 2015 führt ein vereinfachtes Verfahren über die Begrenzung der Biegeschlankheit an, das allerdings recht konservativ und damit unwirtschaftlich ist.
- Für eine ausreichende Dauerhaftigkeit verwenden ACI 440 2015; AASHTO 2018; CNR 2007 einen Umweltfaktor, der materialabhängig eine Festigkeitsabminderung zufolge Umwelteinflüsse berücksichtigt. Dabei findet jedoch keine Differenzierung der Art des Einflusses statt.
- Insgesamt gilt es zu beachten, dass das Bauteilverhalten weniger duktil ist und ein Bewehrungsversagen schlagartig auftreten kann. Mit hohen Sicherheitsfaktoren wird versucht, dieser Besonderheit Rechnung zu tragen. Damit wird eine wirtschaftliche Ausnutzung des Materials jedoch schwierig.

4.2. Benchmarkberechnung

Im nachfolgenden Abschnitt wird exemplarisch eine Bemessung eines FRP-bewehrten Bauteiles durchgeführt. Um die Nachweisführung nachvollziehbar zu gestalten wird das Nachweisformat an ÖNORM EN 1992-1-1 [106] angelehnt. Da in dieser Normung prinzipiell keine FRP-Bewehrung berücksichtigt ist, werden auf Basis der Erkentnisse, die in Kapitel 4.1 gesammelt wurden, einige Anpassungen vorgenommen, die die Besonderheiten von FRP-Bewehrungen abbilden:

- Zugfestigkeiten und E-Moduln werden aus Tabelle 3 gewählt
- Abminderungsfaktor f
 ür Langzeitfestigkeiten zufolge Umwelteinfl
 üssen C_E und zufolge Temperaturen C_T (Details siehe unten)
- Abminderungsfaktor zur Spannungsbegrenzung der Bewehrung zufolge C_C (Details siehe unten)
- zulässige Rissbreite ist höher als bei Stahl (0,5 mm bei Außenbauteilen)
- Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_M = 1,5$







In weiterer Folge wird die zugrunde gelegte Bemessung parametrisiert, wobei einerseits die Bauteilhöhe (in Form der statischen Nutzhöhe d; aufgetragen auf der y-Achse) und die jeweils zugehörige minimal erforderliche Bewehrungsfläche (Ar, aufgetragen auf der x-Achse) variiert werden, während alle weiteren Randbedingungen konstant gehalten wurden. Der realisierbare **Bereich** der Querschnittsdimensionierung Einbeziehung unter verschiedener Nachweisformate (SLS: Rissbreiten – Kapitel 4.2.4, Durchbiegung – Kapitel 4.2.2, Begrenzung der Spannungen - Kapitel 4.2.3; ULS: Biegung - Kapitel 4.2.1) ergibt sich aus dem eingehüllten Bereich, der von keiner weiteren Funktion mehr geschnitten wird (wird in den nachfolgend angeführten Diagrammen als grau schraffierter Bereich dargestellt). Der sich daraus ergebende Materialverbrauch kann mit ökologischen und ökonomischen Kennwerten verknüpft werden, um ein optimales Querschnittsdesign zu veranschaulichen. Als Einschränkung ist zu nennen, dass keine Querkraftbemessung durchgeführt wird. Dies ist einerseits auf fehlende Erfahrungswerte bzw. Bemessungsmodelle zurückzuführen.

4.2.1 Biegetragfähigkeit

Für die Ermittlung der Biegetragfähigkeit sind zwei Fälle zu unterscheiden, (a) Versagen der Bewehrung und (b) Versagen des Betons. Die Herleitung der Biegetragfähigkeit unter Annahme eines rechteckigen Spannungsblocks ist z.B. in Rempel [107] zu finden. Da kein Fließen der Bewehrung stattfindet gibt es exakt einen Bewehrungsgrad bei dem ein Versagen der Bewehrung und ein Versagen des Betons gleichzeitig auftritt. Dieser wir der ausgeglichene Bewehrungsgrad ρ_b genannt Mit der Bedingung $F_t = F_c$ ergibt sich:

$$\rho_l \cdot b \cdot d \cdot \sigma_t = \eta \cdot \sigma_c \cdot b \cdot \lambda \cdot x \tag{1}$$

Durch ersetzen von σ_t und σ_c mit der jeweiligen Bruchfestigkeit f_{td} und f_{cd} sowie x als Verhältnis der Bruchdehnungen ε_{cu} und ε_{tu} ausgedrückt, kann der ausgeglichene Bewehrungsgrad explizit berechnet werden

$$\rho_b = \frac{f_{cd}}{f_{td}} \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{tu} + \varepsilon_{cu}} \cdot \eta \cdot \lambda \tag{2}$$

Für den Fall $\rho_l < \rho_b$ ergibt sich ein Bewehrungsversagen. Die Biegetragfähgkeit M_{Rd} kann über folgende Gleichung berechnet werden

$$M_{Rd} = \rho_l \cdot b \cdot d^2 \cdot f_{td} \cdot \left(1 - \frac{\rho_l \cdot f_{td}}{\eta \cdot f_{cd}}\right)$$
(3)

Für den Fall $\rho_l > \rho_b$ ergibt sich ein Betonversagen. Die Biegetragfähgkeit kann über folgende Gleichung berechnet werden

[NIMETBEW]







(4)

mit

$$\xi = \frac{x}{d} = \frac{\sqrt{\frac{E_l \cdot \varepsilon_c}{\eta \cdot f_{cd} \cdot \lambda}} \sqrt{\frac{E_l \cdot \varepsilon_c}{\eta \cdot f_{cd} \cdot \lambda} \cdot \rho_l + 4} \cdot \sqrt{\rho_l}}{2} - \frac{\frac{E_l \cdot \varepsilon_c}{\eta \cdot f_{cd} \cdot \lambda} \cdot \rho_l}{2}$$
(5)

Bei gegebener Einwirkung und Variation der Bewehrungsfläche lässt sich die erforderliche statische Nutzhöhe ermitteln. In Abhängigkeit des Bewehrungsgrades kommt dabei entweder Gleichung (3) oder (4) zur Anwendung. Die Verhältnis lässt sich als Grenzkurve in ein Diagramm eintragen, wie es in Abbildung 13 der Fall ist. Alle A_f/d Verhältnisse die über der Grenzkurve liegen (grau schraffierte Bereich) weisen eine ausreichende Biegetragfähigkeit auf.

 $M_{Rd} = \eta \cdot f_{cu} \cdot b \cdot \lambda \cdot \xi \cdot d^2 \cdot \left(1 - \frac{\lambda \cdot \xi}{2}\right)$



Abbildung 13: Darstellung der Grenzkurve zur Erfüllung der Biegetragfähigkeit

4.2.2 Begrenzung der Verformungen

Die Begrenzung der Verformungen wird mithilfe der direkten Berechnung laut ÖNORM EN 1992-1-1 [106] für die quasi-ständige Lastkombination nachgewiesen.

$$\alpha = \zeta \alpha_{II} + (1 - \zeta) \alpha_I \tag{6}$$

Das nichtlineare Verhalten des Betons wird dabei über einen Verteilungsbeiwert ζ beschrieben, der das Verhalten zwischen einem ungerissenen α_i und einem nicht vollständig gerissenen Betonquerschnitt α_{ii} mit folgender Beziehung beschreibt.

$$\zeta = 1 - \beta \cdot \frac{\sigma_{tr}}{\sigma_t} \tag{7}$$





Wird als maßgebender Verformungsparameter α die Krümmung κ angenommen kann die Durchbiegung des Tragwerks über numerische Integration der berechneten Krümmungen entlang des Tragwerks erfolgen. Die Krümmung in Zustand I und II ergibt sich zu:

$$\kappa_I = \frac{M_E}{E_{c,eff} \cdot I_I} + \varepsilon_{cs} \cdot \alpha_r \cdot \frac{S_I}{I_I}$$
(8)

$$\kappa_{II} = \frac{M_E}{E_{c,eff} \cdot I_{II}} + \varepsilon_{cs} \cdot \alpha_r \cdot \frac{S_{II}}{I_{II}}$$
(9)

Mit Ec,eff als den effektiven E-Modul zur Berücksichtigung des Kriechens

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi_{\infty}} \tag{10}$$

und ϵ_{cs} als der Schwindverformung. Die mittlere Krümmung κ_m in jedem Schnitt ergibt sich demnach zu:

$$\kappa_m = \zeta \kappa_{II} + (1 - \zeta) \kappa_I \tag{11}$$

Die Grenzkurve zur Erfüllung der Verformungsnachweise im GZG ist in Abbildung 14 als gestrichelte Linie, welche mit SLS Verformung bezeichnet ist, zu sehen. Da die Durchbiegung von der Systemlänge abhängig ist liegt den Diagrammen jeweils eine Annahme zugrunde. Abbildung 14 dient dabei als Beispiel. In den späteren Vergleichen sind die Randbedingungen jeweils angegeben. Der grau hinterlegte Bereich, der den Anforderungen entsprechende Querschnitte anzeigt, ist hier kleiner als beim alleinigen Nachweis des Biegewiderstandes. In jenem Bereich in dem die gestrichelte Linie die durchgehende Linie überschreitet wird lediglich der Biegewiderstand erfüllt. Die Verformungsnachweise werden erst für Querschnittskonfigurationen erfüllt, die über der gestrichelten Linie liegen. Dies führt zu höheren erforderlichen statischen Nutzhöhen.









Abbildung 14: Darstellung der Grenzkurve zur Erfüllung des Verformungsnachweises

4.2.3 Begrenzung der Spannungen

Die Spannungen im Querschnitt lassen sich für einen dreiecksförmigen Spannungsverlauf im Beton (siehe Abbildung 70) mit folgenden Formeln berechnen:

$$\xi = -\alpha_r \rho_l + \sqrt{(\alpha_r \rho_l)^2 + 2\alpha_r \rho_l}$$
(12)

$$\sigma_c = \frac{M_E}{bd^2 \frac{\xi}{2} \left(1 - \frac{\xi}{3}\right)} \tag{13}$$

$$\sigma_t = -\sigma_c \alpha_r \left(\frac{1}{\xi} - 1\right) \tag{14}$$

Der Nachweis gilt als erbracht, wenn die vorhandenen Spannungen unter charakteristischer Lastkombination gewisse Grenzwerte nicht überschreiten. Beim Beton wird die Spannung mit dem Faktor k₁ aus der ÖNORM EN 1992-1-1 7.2(2) [106] begrenzt. Dieser Faktor wird mit 0,6 angegeben und soll eine Längsrissbildung im Beton, die mit einer Reduktion der Dauerhaftigkeit einhergehen kann, vermeiden; Gleichung (*15*). Die Begrenzung der Bewehrungsspannung erfolgt mit dem Abminderungsfaktor für Dauerstand C_c, welcher maßgebend vom jeweils verwendeten Fasermaterial abhängig ist; Gleichung (*16*).

$$\sigma_{c,max} \le 0.6 \cdot f_{ck} \tag{15}$$

$$\sigma_{r,max} = C_C \cdot f_{tk} \tag{16}$$

Die Grenzkurve zur Begrenzung der Spannungen wird für den Beton als auch für die Bewehrung in Abbildung 15 eingetragen. Die Gernzkurve zur Einhaltung der Bewehrungsspannung wird als punktierte Linie dargestellt, während die Grenzkurve für die







Betonspannung als strichpunktierte Linie dargestellt ist. In diesem exemplarischen Beispiel wird der grau hinterlegte, realisierbare Bereich wo alle Nachweise erfüllt sind weiter verkleinert.



Abbildung 15: Darstellung der Grenzkurven zur Erfüllung der Spannungsnachweise

4.2.4 Begrenzung der Rissbreiten

Für den Nachweis der Rissbreitenbegrenzung wird eine direkte Berechnung der Rissbreiten nach ÖNORM EN 1992-1-1 [106] durchgeführt. Die Berechnung erfolgt dabei unter quasiständiger Lastkombination. Um Sekundärrissbildung zu berücksichtigen wird zunächst der Wirkungsbereich der Bewehrung im Beton A_{c,eff} ermittelt.

$$A_{c,eff} = h_{c,eff} \cdot b \tag{17}$$

mit

$$h_{c,eff} = min\left\{2,5 \cdot (h-d); \frac{h - x_{II}}{3}; \frac{h}{2}\right\}$$
(18)

Die Rissbreite w_{cr} selbst ergibt sich aus dem maximalen Rissabstand s_{r,max} und der Dehnungsdifferenz zwischen Bewehrung und Beton ($\epsilon_{rm} - \epsilon_{cm}$)

$$w_{cr} = s_{r,max} \cdot (\varepsilon_{rm} - \varepsilon_{cm}) \tag{19}$$

mit

$$s_{r,max} = \frac{k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \phi_r}{\rho_{eff}} \tag{20}$$

$$(\varepsilon_{rm} - \varepsilon_{cm}) = max \left\{ \frac{\sigma_r - k_t \cdot \frac{f_{ctm}}{\rho_{eff}} \cdot (1 + \alpha_r \cdot \rho_{eff})}{E_r}; 0, 6 \cdot \frac{\sigma_r}{E_r} \right\}$$
(21)

Für die Berechnung der Rissbreiten wird mangels Alternativen für die FRP-Bewehrungen ähnliche Verbundeigenschaften wie bei Stahlbewehrung angenommen.

[NIMETBEW]





Damit lässt sich die Grenzkurve ab der die Begrenzung der Rissbreiten eingehalten ist darstellen; siehe in Abbildung 16 (mit Sternen markierte Kurve). Da alle betrachteten Bauteile einer höheren Expositionsklasse als XC1 ausgesetzt sind und nicht vorgespannt werden, beträgt die maximal zulässige Rissbreite von Stahlbetonbauteilen $w_{cr} = 0,3mm$. Aufgrund der Korrosionsbeständigkeit von nichtmetallisch bewehrten Bauteilen sind prinzipiell höhere Rissbreiten zulässig. Aus konstruktiven, ästhetischen und Dauerhaftigkeitsgrüdnen wird dennoch ein Begrenzung der Rissbreite von $w_{cr} = 0,5mm$ bei den FRP-bewehrten Bauteilen angenommen. In diesem exemplarischen Beispiel verkleinert sich jener Bereich an möglichen Querschnittsdimensionierungen nicht, da mit Erfüllung der anderen Nachweise auch die Rissbreitenbegrenzung eingehalten wird.



Abbildung 16: Darstellung der Grenzkurve zur Erfüllung des Rissbreitennachweises

4.2.5 Ökonomische und Ökologische Auswertung

In weiterer Folge kann die aus Kapitel 4.2.1 - 4.2.4 ermittelte Grenzkurve, ab der die geführten Nachweise im SLS und ULS erfüllt sind mit ökonomischen und ökologischen Kennzahlen in Verbindung gesetzt werden. Dazu werden die zur Grenzkurve gehörigen Materialmassen (querschnittsbehafteter Wert) mit den jeweiligen Kennzahlen multipliziert - beispielhaft das Global Warming Potential/m³ (GWP) als ökologische Kennzahl. Damit ergibt sich das GWP/m Tragwerk. Durch Multiplikation dieses Wertes mit der Systemlänge kann das GWP des gesamten Tragwerks ermittelt werden, das in Abbildung 17 (links) als grün strichpunktierte (und mit GWP bezeichneten Kurve) Linie dargestellt ist. In diesem Fall wird davon ausgegangen, dass keine Abstufung der Bewehrung und/oder des Querschnitts entlang der Systemachse vorliegt. Zusätzlich wird das GWP, das alleine durch die Bewehrung erzeugt







wird mit einer grünen Fläche hinterlegt. Während das Treibhauspotential der Bewehrung mit der Bewehrungsfläche entlang der x-Achse konstant steigt, ist das GWP der Betonmasse abhängig von der statischen Nutzhöhe, die sich aus der Grenzkurve zur Erfüllung aller Nachweise ergibt. Selbige Vorgehensweise kann mit ökonomischen Kennzahlen in Form von Kosten/m³ durchgeführt werden. In diesem Fall ergibt sich in vorliegendem Beispiel das Diagramm in Abbildung 17 (rechts) mit der orange strichlierten Linie als die Kosten des Bauwerks. Analog zur Vorgehensweise bei der ökologischen Beurteilung werden die reinen Kosten der Bewehrung mit einer orangen Fläche hinterlegt. Wichtig hierbei ist, dass diese Werte sich nur auf die Errichtung der Baustoffe beziehen, welche jedoch großen Einfluss (im Infrastrukturbau) auf die Gesamtökobilanzierung haben.



Abbildung 17: Verknüpfung der Grenzkurven mit ökologischen und ökonomischen Kennzahlen

4.3. Parameterstudie

Die nachfolgend angeführten Beispiele wurden im Rahmen einer Diplomarbeit am Insitut für Tragkonstruktionen der TU Wien erarbeitet. Die gesamte Arbeit ist im Repositum der TU Wien zu finden [108]. In weiterer Folge werden die Inputparameter dieser Arbeit erläutert und die wesentlichen Outputs zusammengefasst.

4.3.1 Konstruktive Durchbildung

Die erforderliche Betondeckung bei Betonbauteilen ergibt sich einerseits aus einem Verbundkriterium und andererseits aus einem Dauerhaftigkeitskriterium. Für stahlbewehrte Bauteile werden in der Parameterstudie beide Kriterien mit den Regeln nach EN1992-1-1 [106] für die Bestimmung der Betondeckung herangezogen. Da FRP-bewehrte Bauteile in Relation





dazu sehr korrosionsbeständig sind, wird für Bauteile in der Parameterstudie, die mit diesen Bewehrungstypus bewehrt sind, nur das Verbundkriterium herangezogen. Die erforderliche Betondeckung aus dem Verbundkriterium wird dabei in Abhängigkeit des Stabdurchmesser mit $c_{min,b} \ge 2,0$ · Stabdurchmesser gewählt, wobei die max. Betondeckung bei diesen Bauteilen mit c = 30 mm begrenzt wird.

Auf Basis der Ergebnisse der Parameterstudie werden Bewehrungsdurchmesser gewählt, welche nach ausgeführter Berechnung auf mögliche minimale und maximale Stababstände überprüft werden.

4.3.2 Materialien

In den nachfolgenden Parameteruntersuchungen werden drei verschiedene FRP-Bewehrungsstäbe unterschieden (Carbon, Glas und Basalt) und mit Betonstahlbewehrung B550B verglichen. Zusätzlich wird für sehr schlanke Bauteile als Alternative ein Carbontextil angegeben. Die entsprechenden Materialkennwerte aller Bewehrungen sind in Tabelle 6 zu sehen. Zusätzlich zu den Materialeigenschaften werden für die FRP-Bewehrungen Abminderungsfaktoren für Temperatur C_T, Umwelteinfluss C_E und Dauerstand C_C angegeben, welche auf Basis des Vergleiches der unterschiedlichen Regelwerke in Kapitel 4.1 abgeleitet wurden. Aufgrund der hohen Temperaturunterschiede im Infrastrukturbau wird der Abminderungsfaktor für Temperatur bei allen analysierten Bauteilen berücksichtigt. Für die Bewertung der Ökologie und Ökonomie werden GWP-Werte und Materialkosten (MK) auf Basis von Literaturwerten oder Rückmeldungen der jeweiligen Hersteller ergänzt.

Eigenschaft	Einheit	Stahl Stab	CFRP Stab	CFRP Textil	GFRP Stab	BFRP Stab
Ef	N/mm²	200 000	162 000	230 000	59 500	59 000
f _{ftk}	N/mm²	550	2100	3000	1100	1300
Ст	-	1,00	0,80	0,80	0,80	0,80
CE	-	1,00	0,90	0,90	0,70	0,70
Cc	-	0,80 ^d	0,55	0,55	0,35	0,35
Υм	-	1,15	1,50	1,50	1,50	1,50
f _{ftd}	N/mm²	478,3	1008,0	1440,0	410,7	485,3
ρ	kg/m³	7850	1500	1770	2130	2100
GWP	kg CO2-Äq./kg	2,3ª	19,7ª	18,4ª	3,1 ^b	2,5 ^b
MK	€/kg	1,00°	100,00°	40,00 ^c	8,00 ^c	8,00 ^c

Tabelle 6: Kennwerte der in der Parameterstudie verwendeten Bewehrungen

^a Werte aus Stoiber et al. [109]

^b Werte aus Kromoser [110]

^c Herstellerangaben

^d entspricht Faktor k4 aus EC-2 7.2(5) um unkontrolliertes Risswachstum zufolge Rissbildung zu vermeiden







Die charakteristische Langzeitfestigkeit $f_{ftk,100}$ der Bewehrung ergibt sich mit den Abminderungsfaktoren zufolge Termperatur C_T und Umwelteinfluss C_E in Tabelle 6 zu:

$$f_{ftk,100} = C_T \cdot C_E \cdot f_{ftk} \tag{22}$$

Die Designfestigkeit f_{ftd} ergibt sich durch Divison der Langzeitfestigkeit durch den Materialsicherheitsbeiwert γ_M

$$f_{ftd} = \frac{f_{ftk,100}}{\gamma_M} \tag{23}$$

Die Materialeigenschaften und Kennwerte der verwendeten Betone sind in Tabelle 7 angegeben. Es werden Betone in drei verschiedenen Festigkeitsklassen bei den Parameteruntersuchungen berücksichtigt.

. .

D (

Tabelle 7: Kennwerte	aer in der Param	neterstuale verwena	eten Betone

.

Eigenschaft	Einheit	C25/30	C30/37	C40/50
f _{ck}	N/mm2	25	30	40
GWP	kg CO2-Äq./kg	198,5ª	219ª	260ª
MP	€/m3	110 ^b	120 ^b	135 ^b

^aWerte aus Kromoser [110]

^b Herstellerangaben

T I II **J** I/

Die Designfestigkeiten für die Betone ergeben sich entsprechend nach EN1992-1-1 [106]

4.3.3 Rahmenbrücke

Der Einsatz von nichtmetallischer Bewehrung wurde unter anderem für Straßenbrücken untersucht. Im ersten Beispiel wird ein Rahmenbauwerk in Anlehnung an die Rahmenbrückennormalie der RVS 15.02.31 [111] betrachtet. Das gewählte Bauwerk besteht aus einem 15 m langen Plattentragwerk (Rahmenriegel), welches auf 8 m langen Rahmenstielen aufliegt (siehe Abbildung 18; links). Für den Einsatz von FRP- Bewehrungen ist es denkbar, dass andere Tragwerke wie z.B. ein Plattenbalkentragwerk, vorteilhafter sind. Um aber einen direkten Vergleich mit der am häufigsten vorkommenden Tragwerksart im Brückenbau in Österreich zu haben wurde dieser Tragwerkstyp gewählt. Der Tragwerksquerschnitt setzt sich aus zwei 3,0 m breiten Fahrspuren, einer Restfahrbahnfläche von je 0,5 m und Randbalken von je 1,0 m Breite zusammen (siehe Abbildung 18; rechts). Für die Berechnung wird das Bauwerk zu einem Zweigelenkrahmen mit steifen Rahmenecken vereinfacht.



Abbildung 18: Untersuchtes Rahmentragwerk: Längsschnitt (links) und Querschnitt (rechts)

Es werden zwei Lastfallkombinationen (LK) betrachtet. Bei LK1 wird die Fahrbahn, neben den ständigen Belastungen, durch die Lastgruppe des LM1 (entsprechend ÖNORM EN 1991-2 [112]) beansprucht. Bei LK2 wird das LM3 (Bemessungsfahrzeug 3000/200¹ gemäß ÖNORM EN 1991-2 [112]) berücksichtigt. Die Achslasten werden dabei auf einem Fahrstreifen angesetzt und vereinfacht über die Brückenbreite verteilt. Die Gesamtbelastung des Systems für beide Lastkombination ist in Abbildung 19 dargestellt. Die genaue Beschreibung der Lastfälle und deren Kombinationsbeiwerte, die aus ÖNORM EN 1990 [113] entnommen wurden, ist in [108] zu finden



💳 Bundesministerium



Abbildung 19: Untersuchtes Rahmentragwerk: Einwirkungen in Lastkombination 1 (oben) und Lastkombination 2 (unten)

In weiterer Folge wird das Bauteil mit den unterschiedlichen Bewehrungsvarianten jeweils in Feldmitte untersucht. Dazu werden die maßgebenden Schnittgrößen aus den beiden Lastkombinationen ermittelt. Für alle Varianten wird eine Stabbewehrung gewählt. Die Festigkeitsklasse des Betons ist durchgehend C30/37. Die Verformungsnachweise werden vernachlässigt, da die Möglichkeit zur Überhöhung der Brücke besteht. Nach RVS 15.02.31 [111] ist für diese Brücke kein Ermüdungsnachweis erforderlich. Die Ergebnisse der Parameterstudie sind in Abbildung 20 dargestellt.











Abbildung 20: Grenzkurven der Rahmenbrücke und Darstellung des damit verknüpften GWP und der Kosten für (a) betonstahlbewehrt, (b) CFRP-bewehrt, (c) GFRP bewehrt und (d) BFRP bewehrt.

Beim Vergleich der Ergebnisse fällt auf, dass bei den FRP-bewehrten Bauteilen in der Regel der SLS-Nachweis maßgebend ist (Betonspannungen bzw. Rissbreiten). Die geringste Bauteidicke wird bei der Stahlbetonvariante erreicht, gefolgt von der CFRP-Variante. GFRPund BFRP-Varianten benötigen deutlich höhere Nutzhöhen. Bei Betrachtung des GWP-Verlaufs ist bei der CFRP-Variante ein starker Anstieg bei einer Vergrößerung des Bewehrungsquerschnitts nach einem optimalen Querschnitt zu erkennen, während das GWP bei den anderen FRP-Varianten mit steigender Bewehrungsfläche sinkt. Die Stahlbeton-Variante führt zum geringsten GWP, wobei der Unterschied etwa 5 % zur GFRP- und BFRP-





Variante und etwa 15 % zur CFRP-Variante beträgt. Die Nutzungsdauer ist hier nicht mitberücksichtigt.

Die Stahlbeton-Variante ergibt bei der Parameterstudie ebenfalls die niedrigsten Materialkosten. Diese sind im Vergleich zur CFRP-Variante etwa 75% und im Vergleich zu den GFRP und BFRP-Varianten etwa 40 % niedriger. Mit Berücksichtigung der konstruktiven Bewehrung wird dieser Unterschied noch größer.

Beim Vergleich der Ergebnisse sprechen die meisten Faktoren demnach für die Stahlbeton-Variante, da dabei deutlich geringere Bauteildicken und Materialkosten, sowie auch das niedrigere GWP erzielt werden können. Ein möglicher Vorteil einer FRP-Konstruktionen, der in dieser Studie nicht betrachtet wurde kann jedoch der mögliche wegfallende Straßenbelag und/oder Abdichtung sein, wodurch Unterhaltungskosten gespart werden können. Optimierungspotential besteht außerdem in der Wahl der Betonfestigkeitsklasse. Da bei allen Varianten die Betonspannungsbegrenzung maßgebend ist, könnten mit erhöhten Festigkeitsklassen des Betons geringere Bauteildicken erzielt werden, was positive Effekte auf die Materialkosten und das Treibhauspotential hat. Dies trifft insbesondere auf die BFRP- und GFRP-Varianten zu, da hier der Beton einen größeren Einfluss hat. Es ist allerdings zu beachten, dass höhere Betonfestigkeiten ebenfalls höhere Kosten und Treibhausemissionen verursachen.

4.3.4 Einfeldbrücke

Als zweites Beispiel wird eine kürzere, 6 m lange Straßenbrücke, untersucht, siehe Abbildung 21 (links). Die Lastfälle und Lastfallkombinationen bleiben unverändert zum zuvor in 4.3.3 behandelten Beispiel (siehe Abbildung 22), wodurch das Einsatzpotential der Bewehrungen bei Brücken unterschiedlicher Länge verglichen wird. Es handelt sich ebenfalls um ein Plattentragwerk (siehe Abbildung 21; rechts), wobei es sich hier um ein Einfeldträger-System handelt.











Abbildung 22: Untersuchte Einfeldträgerbrücke: Einwirkungen in Lastkombination 1 (links) und Lastkombination 2 (rechts)

Das Bauteil wird wiederum mit den unterschiedlichen Bewehrungsvarianten an der maßgebenden Stelle in Feldmitte untersucht. Für alle Varianten wird eine Stabbewehrung gewählt. Analog zum vorigen Beispiel wird auch hier eine Betonfestigkeitskalsse C30/37 angenommen.







ASFINAG



Abbildung 23: Grenzkurven der Einfeldbrücke und Darstellung des damit verknüpften GWP und der Kosten für (a) betonstahlbewehrt, (b) CFRP-bewehrt, (c) GFRP bewehrt und (d) BFRP bewehrt.

Die geringere Spannweite der Brücke ergibt im Vergleich zum vorigen Beispiel der Rahmenbrücke kaum einen Unterschied in der Bewertung der verschiedenen Varianten. Werden alle Faktoren für die Errichtung einer Straßenbrücke berücksichtigt, ergibt die Stahlbeton-Variante auch bei diesem Beispiel die sinnvollste Lösung, wenn lediglich die Herstellung ökologisch und ökonomisch betrachtet werden. Grund dafür ist die vergleichsweise niedrige Bauteilhöhen, die zu niedrigeren Kosten sowie mit zum geringsten GWP führen. Wie auch beim vorigen Beispiel kann aber auch hier ein weiteres Optimierungspotential beim Einsatz höherfester Betone erkannt werden, wodurch insbesondere bei der GFRP und BFRP-Variante das Treibhauspotential verringert werden kann. Auch hier wurde keine mögliche verlängerte Nutzungsdauer berücksichtigt.







4.3.5 Winkelstützmauer

Neben Brücken, die in den ersten beiden Abschnitten behandelt wurden (Kap. 4.3.3 und 4.3.4) wird der Einsatz von nichtmetallischer Bewehrung bei einer 5 m hohen Winkelstützmauer untersucht; siehe Abbildung 24 (links). Die gewählte Konfiguration entspricht einem Bauteil mit mittlerer Belastung. Für die Parameterstudie wird der vertikale Abschnitt der Winkelstützmauer durch einen Kragarm vereinfacht; siehe Abbildung 24 (rechts). Das erforderliche Fundament wird in weiterer Folge vernachlässigt.

Die Belastung auf die vertikale Wand der Winkelstützmauer ergibt sich aus dem Erdruck zufolge Erdlast und einer Verkehrslast gemäß ÖNORM B 1991-1-1 [114] q_{Verkehr} = 16,7 kN/m² (Nutzlast der Kategorie G), wodurch auch Fahrzeuge der Feuerwehr abgedeckt werden.



Abbildung 24: Untersuchte Winkelstützmauer: Abmessungen (links) und Belastungen (rechts)

Das Bauteil wird mit den unterschiedlichen Bewehrungsvarianten an der maßgebenden Stelle an der Einspannung untersucht. Für alle Varianten wird eine Stabbewehrung gewählt. Im Unterschied zu den vorigen Beispielen wird eine Betonfestigkeitsklasse C25/30 angenommen.







ASFINAG



Abbildung 25: Grenzkurven der Winkelstützmauer und Darstellung des damit verknüpften GWP und der Kosten für (a) betonstahlbewehrt, (b) CFRP-bewehrt, (c) GFRP bewehrt und (d) BFRP bewehrt.

Wie auch bei den vorherigen Beispielen sind auch für die FRP-bewehrte Winkelstützmauern die SLS-Nachweise primär maßgebend. Die erforderliche Bewehrungsfläche wird in der Regel über die Rissbreitenbegrenzung vorgegeben. Die größere zulässige Rissbreite wird durch den geringeren E-Modul der Bewehrung kompensiert. Im Vergleich zur STB-Variante sind höhere Bauteildicken aufgrund der Betonspannungsbegrenzung erforderlich.

Bei Betrachtung des GWP-Verlaufs der CFRP-Variante ist auch hier ein steiler Anstieg nach einem ausgeprägten lokalen Minima zu erkennen, obwohl die Bauteildicke mit zunehmender Bewehrungsfläche deutlich sinkt. Dies folgt aus dem großen Einfluss der Bewehrung, die am rechten Rand der Darstellung mehr als die Hälfte des GWPs der Gesamtkonstruktion





ausmacht. Dies ist bei den GFRP- und CFRP-Varianten weniger stark ausgeprägt, da hier umgekehrt die notwendige Betonmasse das GWP der Gesamtkonstruktion sehr stark bestimmt. Bei Betrachtung der Konstruktion (unter Berücksichtigung allfälliger konstruktiver Bewehrung) ist festzustellen, dass die geringsten Treibhauspotentiale für die BFRP- und GFRP-Varianten erzielt werden. Den höchsten ökologischen Fußabdruck weist die CFRP-Variante auf, bei der für die Herstellung 50% mehr GWP im Vergleich zu den anderen FRP-Lösungen ausgestoßen wird.

Der Verlauf der Materialkosten sieht bei den Varianten mit GFRP und BFRP anders aus als der ökologische Verlauf. Dieser wird bei beiden Varianten sehr stark von den Materialkosten der Bewehrungen bestimmt, wodurch auch hier ein steiler Anstieg nach dem optimalen Querschnitt zu erkennen ist. Die Kosten der stahlbewehrten Variante sind bei der Parameterstudie am niedrigsten.

Eine ideale Variante, bei der alle Faktoren für eine Variante sprechen, gibt es bei diesem Bauteil daher nicht. Bei Betrachtung der alleinigen Errichtung einer Winkelstützmauer in dieser Größe und mit diesen Belastungen dürfte die Wahl jedoch nicht auf die CFRP-Variante fallen, da das GWP und die Kosten mit Abstand am höchsten sind. Die GFRP- und BFRP-Variante hingegenen weisen eine bessere Bilanz bezüglich GWP auf, wobei die Kosten für die Herstellung solcher Konstruktionen fast doppelt so hoch sind wie die der stahlbewehrten Variante. Die Stahlbeton-Variante ist bei Errichtung die günstigste Variante. Es ist jedoch zu beachten, dass bei dieser Variante eine hohe Gefahr der Bewehrungskorrosion vor allem an der erdzugewandten Seite besteht. Dies kann über den Lebenszyklus betrachtet zu einem hohen Inspektions- und Instandhaltungsaufwand führen. Hier würde sich insbesondere eine hybride Bewehrung des Bauteils anbieten, bei der FRP-Bewehrungen erdseitig in den kritischen Bereichen und Stahlbewehrungen luftseitig eingebaut werden. Somit entsteht zwar bei Errichtung ein höheres GWP als bei alleinigen BFRP- oder GFRP-Lösungen, allerdings können gleichzeitig Errichtungskosten reduziert und Instandhaltungsmaßnahmen gespart werden.

4.3.6 Bahnsteigkante

Im Folgenden wird das Potential nichtmetallischer Bewehrung bei geringer belasteten Bauteilen anhand einer Bahnsteigkante untersucht; siehe Abbildung 26 (links). Diese wird so wie die Winkelstützmauer insbesondere durch Erddruck belastet (siehe Abbildung 26; rechts), wobei sie lediglich eine Höhe von \sim 1,0 m aufweist. Dadurch fällt die Belastung wesentlich





geringer aus. Wie bei der Winkelstützmauer wird nur der vertikale Abschnitt des Bauteils betrachtet und als Kragarm vereinfacht.



Abbildung 26: Untersuchte Bahnsteigkante: Abmessungen (links) und Belastungen (rechts)

Dieses Bauteil wird ebenfalls mit den verschiedenen Varianten der Bewehrungen und den jeweils zugehörigen Materialeigenschaften gemäß Tabelle 6 berechnet, wobei in diesem Fall für die CFRP-Variante eine Textilbewehrung gewählt wurde. Die maßgebende Nachweisstelle ist auch hier die Einspannstelle des idealisierten Kragarms. Für alle Varianten wird ein Beton der Festigkeitsklasse C25/30 gewählt.







ASFINAG



Abbildung 27: Grenzkurven der Bahnsteigkante und Darstellung des damit verknüpften GWP und der Kosten für (a) betonstahlbewehrt, (b) CFRP-bewehrt, (c) GFRP bewehrt und (d) BFRP bewehrt.

Im Vergleich zu den vorher untersuchten Bauteilen können bei gering belasteten Bauteilen wesentliche Unterschiede festgestellt werden. Im Falle der Stahlbeton- und CFRP-Varianten ist die Bewehrungsfläche insbesondere zur Einhaltung des Nachweises im ULS maßgebend. Die Bewehrungsmenge wird bei BFRP- und GFRP-Bauteilen benötigt, um die Spannung in der jeweiligen Bewehrung zu begrenzen. Bei der durchgeführten Parameterstudie ist mit großem Unterschied am wenigsten Bewehrungsfläche und -gewicht bei der CFRP-Variante erforderlich. Die statische Nutzhöhe ist in allen Fällen erforderlich, um die Spannungsgrenzen im Beton einzuhalten. Bei der Stahlbeton-Variante ergibt sich die geringste erforderliche





statische Nutzhöhe. Aufgrund der Betondeckung fällt die Bauteildicke im Vergleich zu den FRP-Varianten etwas geringer aus.

Die Ergebnisse zeigen, dass die FRP-Varianten bei der Bahnsteigkante durchgehend ein geringeres Treibhauspotential als die Stahlbeton-Variante aufweisen. Umgekehrt zum GWP sind aber höhere Materialkosten für die FRP-Varianten einzuplanen. Für die Errichtung von BFRP- oder GFRP-Bahnsteigkanten entstehen etwa 40 % höhere Kosten, während die Kosten der CFRP-Variante etwa doppelt so hoch sind wie die der stahlbewehrten Variante.

Zusätzlich zu den oben angeführten Beispielen wurde für die Bahnsteigkante auch eine Studie unter Verwendung höherfester Betone (Betonfestigkeitsklasse C40/50) durchgeführt. Besonders bei den BFRP- und GFRP-Varianten wird unter Berücksichtigung der höherern Betonfestigkeit der Nachweis der Spannungsbegrenzung in der Bewehrung maßgebend. Die Bewehrungen können demnach effizienter ausgenutzt werden. Dies führt zu einem reduzierten GWP und zu geringeren Kosten. Im Gegensatz zu den höher belasteten Bauteilen in den vorhergehenden Kapiteln ist ein größeres Einsatzpotential von nichtmetallischer Bewehrung bei der Bahnsteigkante zu erkennen.

4.3.7 Lärmschutzwand Sockelelement

In folgendem Abschnitt wird der Einsatz von nichtmetallischer Bewehrung bei einem Bauteil ohne nennenswerter ständiger Belastung am Beispiel eines Lärmschutzwand-Sockelelements untersucht. Die Geometrie ist in Abbildung 28 (a) dargestellt. Das statische System wird als Einfeldträger idealisiert, welcher primär durch eine Windlast und eine quasi-statische Ersatzlast der Druck-Sog-Welle belastet wird. Die Einwirkungen auf das 1 m hohe Sockelelement sind in Abbildung 28 (b) dargestellt. Nachweise der vertikalen Einwirkungen werden bei dieser Untersuchung vernachlässigt.







Abbildung 28: Untersuchtes Lärmschutzwand-Sockelelement: (a) Abmessungen und (b) Belastungen

Auch dieses Bauteil wird mit den verschiedenen Varianten der Bewehrungen untersucht, wobei für die CFRP-Variante, wie schon bei der Bahnsteigkante, eine Textilbewehrung gewählt wurde. Für den Beton wird eine Festigkeitsklasse C25/30 angenommen.

Für das Lärmschutzwand-Sockelelement können ähnliche Beobachtungen wie auch schon für die Bahnsteigkante im vorigen Abschnitt gemacht werden, wobei sich ein großes Potential für den Einsatz von nichtmetallischer Bewehrung zeigt. Zwar werden bei der gewählten Bauteillänge für den optimalen Querschnitt keine geringeren Bauteildicken als bei der Stahlbeton-Variante erreicht, allerdings kann durch die reduzierte Menge das GWP reduziert werden. Bei Sockelelementen mit geringeren Bauteillängen ist davon auszugehen, dass der positive Effekt der nichtmetallischen Bewehrung noch größer ist, da durch die wesentlich geringere Betondeckung zunehmend geringere Bauteildicken erzielt werden können. Speziell für die GFRP- und BFRP-Variante, deren GWP wesentlich vom Beton bestimmt ist, ergibt sich damit eine weitere deutliche Reduktion des Treibhauspotentials. Als weiterer Vorteil kann das viel geringere Bewehrungsgewicht angeführt werden, wodurch Transport und Montage erleichtert werden. Weiteres Optimierungspotential der FRP-Varianten besteht bei Verwendung höherer Betonfestigkeit, wie im vorigen Abschnitt an der Bahnsteigkante gezeigt werden konnte.









[NIMETBEW]







4.3.8 Randbalken

Abschließend wurde der Einsatz nichtmetallischer Bewehrung bei zwangsbeanspruchten Bauteilen anhand eines Randbalkens untersucht. Als Referenz wird der Randbalken nach Regelplanung gemäß Abbildung 30 (links) betrachtet, welcher bei Straßenbrücken mit 14 cm starken Fahrbahnbelagsdicken zum Einsatz kommt. Für die Vergleichsberechnungen wird der Querschnitt des Bauteils gemäß Abbildung 30 (rechts) vereinfacht. Anders als bei den bisherig behandelten Bauteilen wird die Höhe dieses Bauteils nicht variiert, wodurch in diesem Fall lediglich die jeweils erforderliche Bewehrung zur Begrenzung der Rissbreiten zufolge Zwangsbeanspruchungen für eben jene Bauteilhöhe ermittelt und verglichen wird.



Abbildung 30: Untersuchter Randbalken: Querschnitt It. Regelplanung (links) und vereinfachter Querschnitt (rechts)

Das Bauteil wird mit den unterschiedlichen Bewehrungsvarianten untersucht, wobei für alle Varianten eine Stabbewehrung gewählt wird. Für die Berechnungen wird ein Beton der Festigkeitsklasse C25/30 gewählt. Der Bewehrungsdurchmesser wird für alle Varianten gleich mit Ø 14 mm gewählt

Der Berechnung der notwendigen Bewehrung zur Begrenzung Rissbreiten bei gegebenen Bewehrungsdurchmesser erfolgt aus dem indirekten Nachweis über die Begrenzung der Stabdurchmesser nach EN 1992-1-1 [106]. Der modifizierte Bewehrungsdurchmesser kann über folgende GI. ermittelt werden:

$$\emptyset_r^* = \emptyset_r \cdot \frac{4 \cdot d_1 \cdot 2.9}{k_c \cdot k \cdot h_{cr} \cdot f_{ct,eff}} \le \emptyset_r \cdot \frac{2.9}{f_{ctm}}$$
(24)

Die zulässige Bewehrungsspannung bei gegebener Rissbreite und Bewehrungsdurchmesser ergibt sich zu:







$$\sigma_r = \sqrt{\frac{6 \cdot w_{cr} \cdot f_{ct,eff} \cdot E_f}{\emptyset_r^*}}$$
(25)

Damit kann die erforderliche Mindestbewehrung A_r ermittelt werden:

$$A_r = \frac{k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{c,eff}}{\sigma_r}$$
(26)

Die ermittelte Bewehrungsfläche ist auf beiden Seiten des Querschnitts erforderlich. Für den Vergleich der verschiedenen Varianten wird die Masse der Bewehrung/m betrachtet und mit den ökologischen und ökonomischen Kennwerten aus Tabelle 6 multipliziert. Eine allfällige Querbewehrung wird bei den Berechnungen nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse des Vergleichs sind in Tabelle 8 angeführt.

Tabelle 8: erforderliche Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreiten aus Zwang am Beispiel eines Randbalkens

		Einheit	Stahl	CFRP	GFRP	BFRP
Grenzdurchmesser	Ør	mm	15,6	15,6	15,6	15,6
Spannung in der Bewehrung	σr	N/mm²	244,8	284,5	172,4	171,7
Bewehrungsfläche je Seite	Ar	cm²/ Seite	15,93	13,71	22,62	22,72
Bewehrungsmasse	m	kg	25,0	4,1	9,6	9,5
GWP der Bewehrung	GWP	kg CO2-Äq.	57,5	81,0	29,9	23,9
Materialkosten der Bewehrung	MK	€	25,0	411,0	77,1	76,3

Aus dem Berechnugsablauf selbst ist ersichtlich, dass die geringere erforderliche Betondeckung der FRP-Varianten keinen Einfluss auf den Grenzdurchmesser hat, wenn die Bauteilhöhe konstant bliebt. Der Unterschied in den erforderlichen Bewehrungen der jeweiligen Varianten ergibt sich demnach nur durch die zulässige Rissbreite und die Steifigkeit des Bewehrungsmaterials. Diese Kenngrößen bestimmen die in der Bewehrung zulässige Spannung. Höhere zulässige Bewehrungsspannungen führen zu geringeren erforderlichen Bewehrungsflächen. Dies führt im Falle der GFRP- und BFRP-Variante, die zwar eine größere zulässige Rissbreite ermöglichen, die Bewehrungssteifigkeit aber gleichzeitig signifikant geringer ist, zu geringeren zulässigen Bewehrungsspannungen. Dadurch ist etwa 30 % mehr Bewehrungsfläche erforderlich als bei der Stahlbeton-Variante. Im Falle der CFRP-Variante ergibt sich aufgrund des vergleichsweisen hohen E-Moduls bei gleichzeitig größerer zulässiger Rissbreite im Vergleich zum Stahl höhere Spannungen die zugelassen werden können. Dadurch wird in diesem Beispiel ungefähr 15 % an Bewehrungsquerschnittsfläche weniger benötigt, als bei der stahlbewehrten Variante.

Beim Vergleich des GWP wird mit BFRP- und GFRP-Bewehrungen das geringste Treibhauspotential erzielt. Betrachtet man allerdings nur die Materialkosten, weisen alle FRP-





Bewehrungen höhere Kosten auf. In dieser Hinsicht werden klare Vorteile bei der Verwendung von Stahlbewehrungen erkannt.

4.3.9 Schlussfolgerungen

In der Parameterstudie konnten verschieden bewehrte (stahl- bzw. nichtmetallisch bewehrt) Bauteilkategorien ökonomisch und ökologisch verglichen werden. Generell ist zum jetzigen Zeitpunkt davon auszugehen, dass nichtmetallisch-bewehrte Bauteile höhere Kosten bei der Errichtung verursachen. Auf der anderen Seite ist speziell für glas- und basaltbewehrte Bauteile ein geringerer ökologischer Einfluss zu erkennen. Die genannten Wirkungskategorien sind aber abhängig vom Bauteil und der jeweiligen Belastung.

So ist ergeben sich Vorteile speziell bei kleineren und gering belasteteren Bauteilen, da die höheren Kosten im Vergleich zu einer stahlbewehrten Ausführung gering ausfallen, während gleichzeitig das GWP signifikant reduziert werden kann. Dies kann unter anderem auf die geringere erforderliche Betondeckung zurückgeführt werden, die bei kleinen Bauteilabmessungen einen wesentlichen Einfluss auf die Gesamtkosten und das GWP hat. Mit größer werden Bauteilabmessungen verringert sich das Einsatzpotential bei alleiniger Betrachtung der Kosten und des GWP bei Errichtung. Speziell für Bauteile, bei denen nur ein gewisser Bereich korrosionsgefährdet ist (z.B. Winkelstützmauer), kann eine hybride Bewehrung vorteilhaft sein. Die nichtmetallische Bewehrung wird in jenen Bereichen angeordnet wo die hohen Beanspruchungen auftreten, während im restlichen Baukörper Stahlbewehrung verwendet wird.

Bei der Bemessung mit nichtmetallischen Bewehrungen sind Unterschiede zum Querschnittsdesign mit Stahlbewehrung zu beachten. Im Großteil der Fälle waren Gebrauchstauglichkeitsnachweise maßgebend für die Bestimmung der Querschnittsabmessungen währende die Tragsicherheit in der Regel nachgewiesen werden konnte. Dies lässt sich im Wesentlichen auf den geringen E-Modul der FRP-Bewehrungen zurückführen, wodurch einerseits größere Verformungen auftreten und andererseits auch größere Rissbreiten vorhanden sind, die die größeren zulässigen Rissbreiten aufgrund der Korrosionsbeständigkeit z.T. kompensieren. Darüber hinaus ist die Langzeitfestigkeit der FRP-Bewehrungen von Bedeutung, da speziell für Glas- und Basaltbewehrung die Spannung im Gebrauchszustand auf äußerst geringe Werte begrenzt werden muss. Hier ist darauf hinzuweisen, dass die Vorgaben der Hersteller aufgrund von fehlenden Erkenntnissen sehr konservativ gewählt sind und dass diesbezüglich mit weiterer Forschungstätigkeit noch effizientere Werte zu erwarten sind.

Bei der Bemessung mit den verschiedenen FRP-Bewehrungen sind weitere Unterschiede zu erkennen. Ein Vergleich von CFRP bewehrten mit GFRP- und BFRP bewehrten Bauteilen







zeigt, dass speziell Bauteile mit CFRP-Bewehrung aufgrund ihres hohen Energiebedarfs in der Herstellung sehr sensitiv im Querschnittsdesign sind und ein klar ausgeprägtes Optimum in Hinblick auf das Global Warming Potential (GWP) existiert. Eine Optimierung des Querschnittes hin zu einer minimalen Bewehrungsfläche ist demnach aus ökologischer Sicht anzustreben. Bei GFRP bewehrten Bauteilen überwiegt anteilsmäßig der Beton am GWP, weshalb hier umgekehrt eine Minimierung der Betonquerschnittsfläche bei verhältnismäßiger großer Bewehrungsfläche anzustreben ist. Hier ist zu nennen, dass die gewählten Rechteckquerschnitte hinsichtlich Bewehrung des Querschnitts hinsichtlich einer höheren statischen Nutzhöhe kann der Bewehrungsbedarf reduziert und auch die erforderliche Betonmenge deutlich reduziert werden. Bei Verwendung von optimierten Querschnitten (bei Brücken z.B. Plattenbalken etc.) u.a. in Kombination mit Vorspannung ist ein deutlicher Vorteil für die FRP bewehrten.

Generell ist bei Verwendung von FRP-Bewehrungen festzuhalten, dass weiteres Optimierungspotential bei der Wahl der Betonsorten und des Querschnittsdesigns besteht. Gut zu erkennen war dies in der Parameterstudie, wo in vielen Fällen die Betonspannungsnachweise maßgebend waren. Ein gezielt eingesetzter höherfester Beton kann diesbezüglich einen Vorteil mit sich bringen. Dies trifft speziell für CFRP-bewehrte Bauteile zu. Dieser Bewehrungstypus ist vergleichsweise teurer und energieintensiv in der Herstellung weshalb hier eine direkte Übertragung der derzeit vorherrschenden Designphilosophie aus dem Stahlbetonbau nicht zielführend erscheint. Vielmehr muss hier auf eine möglichst effizientes Design Acht gegeben werden, um das volle Potential dieser Bewehrung entfalten zu können.

Abschließend ist nochmal anzumerken, dass die Betrachtung in dieser Parameterstudie sich auf die Errichtungsphase beziehen. Eine ganzheitliche Betrachtung über den Lebenszyklus des Bauwerks kann davon abweichende Aussagen zu den Kosten und dem GWP hervorbringen. Nähere Informationen dazu sind im nachfolgenden Kapitel 6 zu finden.







5. ÖKOLOGISCHE ANALYSE

5.1. Theoretische Grundlagen & Normenstand

Einführend sind in Tabelle 9 ausgewählte Begriffe des Umweltmanagements gelistet, welche dem Verständnis der ökologischen Analyse aus AP5 dienlich sind.

Tabelle 9: Ausgewählte Begriffe des Umweltmanagements aus ÖNORM EN ISO 14050 [115]

	Begriff	Beschreibung								
Ē	Kennzahl	Indikation; quantitative oder qualitative Variable, die gemessen und beschrieben werden kann und einen Status eines Zustands oder ei- ner Auswirkung darstellen kann								
ullgemei	Validierung	Bestätigung durch Bereitstellung eines objektiven Nachweises, dass die Anforderungen für eine spezifische beabsichtigte Nutzung oder Anwendung erfüllt sind								
٩	Lebensdauer	Zeitspanne, über die ein in Benutzung befindliches Produkt die Leis- tungsanforderungen erfüllt oder übertrifft (von der Wiege bis zur Bahre)								
	Sensitivitätsanalyse	Systematisches Verfahren zur Einschätzung der Wirkungen der ge- troffenen Auswahl an Methoden und Daten auf die Ergebnisse einer Studie								
	Systemgrenze	Grenze anhand einer Reihe von Kriterien, die darstellen, welche Pro- zessmodule Teil des untersuchten Systems sind								
ierung	Ökobilanz (engl.: Life cy- cle assessment LCA)	Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potentiellen Umweltauswirkungen eines Produktsystems im Ver- lauf seines Lebensweges								
	Sachbilanzergebnis (engl.: Life cycle inven- tory LCI)	Ergebnis der Sachbilanz, das die Flüsse katalogisiert, die die System- grenze überschreiten und das den Ausgangspunkt für die Wirkungs- abschätzung darstellt								
	Wirkungsabschätzung (engl.: Life cycle impact assessment LCIA)	Bestandteil der Ökobilanz, der dem Beurteilen der Bedeutung von po- tentiellen Umweltauswirkungen eines Produktsystems im Laufe des Lebensweges dient								
oilanz	Prozessmodul	Kleinster in einer Sachbilanz berücksichtigter Bestandteil, für den In- put- und Outputdaten quantifiziert werden								
Ökot	Wirkungskategorie	Klasse, die wichtige Umweltthemen repräsentiert und der Sachbilan- zergebnisse zugeordnet werden können								
	Wirkungskategorie- Indikator	Quantifizierbare Darstellung der Wirkungskategorie								
	Gewichtungsfaktor	Faktor, der angewendet wird, um Sachbilanzergebnisse oder einen Wirkungskategorie-Indikator für den Lebensweg in eine gemeinsame Einheit umzuwandeln und somit eine Summierung ermöglicht								
	Charakterisierungsfaktor	Faktor, der aus einem Charakterisierungsmodell abgeleitet wurde, das für die Umwandlung eines zugeordneten Sachbilanzergebnisses in die gemeinsame Einheit des Wirkungskategorie-Indikators ange- wendet wird								
	Funktionelle Einheit	Quantifizierte Leistung eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit								
ration	Typ-III-Umweltprodukt- deklaration	Umweltproduktdeklaration, die quantitative umweltbezogene Daten auf der Grundlage festgelegter Parameter bereitstellt, und falls not- wendig ergänzende Umweltinformationen								
leklar	Deklarierte Einheit	Menge eines Produktes für die Verwendung als Bezugseinheit in ei- ner Typ-III-Umweltproduktdeklaration								
Umweltd	Produktkategorieregel PKR	Zusammenstellung spezifischer Regeln, Anforderungen und Leitli- nien, um Typ-III-Umweltproduktdeklarationen für eine oder mehrere Produktkategorien zu erstellen								







Die Ökobilanzierung stellt eine iterative Methode zur systematischen Analyse der Umweltwirkungen von Produktsystemen dar und umfasst grundsätzlich folgende Phasen:

- Festlegung von Ziel- und Untersuchungsrahmen
 - Definition funktionielle Einheit
 - Festlegung Systemgrenze und Datenqualitätsansprüche
- Sachbilanzierung (engl.: Life cycle inventory LCI)
- Wirkungsabschätzung (engl.: Life cycle impact assessment LCIA)
 - o Auswahl Wirkungskategorien, -indikatoren und Charakterisierungsmodelle
 - Klassifizierung: Zuordnung der Sachbilanzergebnisse
 - Charakterisierung: Berechnung der Wirkungsindikatoren
- Auswertung

In Tabelle 10 werden die oben genannten Begriffe mittels Beispielen veranschaulicht.

Tabelle 10: Begriffsbeispiele der Ökobilanzierung am Beispiel von 1 kg Polyacrylnitril-Faser (Hauptbestandteil der Carbonfaser), in Anlehnung an ÖNORM EN ISO 14044 [116]

Begriff	Beispiel
Funktionelle Einheit	1 kg Polyacrylnitril-Faser
Systemgrenze	Produktionsphase (cradle-to-gate)
Sachbilanzierungsergebnisse	bspw. 3,3 kg CH₄/kg Polyacrylnitril-Faser (CH₄…Methan)
Auswahl Wirkungskategorie	Klimawandel
Auswahl Charakterisierungs-	Intergovernmental Panel on Climate Change [117]
modell	
Auswahl Wirkungsindikator	Global Warming Potential (GWP) in kg CO ₂ -Äquivalenten
Charakterisierungsfaktor	GWP für den Methanausstoß in kg CO ₂ -Äq./kg CH ₄
Charakterisierung (Berech- nung Wirkungsindikator)	Sachbilanzergebnisse je funktioneller Einheit * Charakterisie- rungsfaktor = 13,3 CH ₄ /kg Polyacrylnitril-Faser * 37 kg CO ₂ -Äq./kg CH ₄ = 492,1 CO2-Äq./kg Polyacrylnitril-Faser

Die ÖNORM EN ISO 14040 [118] nennt die uneingeschränkte Transparenz als bedeutendes Leitprinzip einer Ökobilanz. Die Bedeutung einer eindeutigen Dokumentation von gewählten Berechnungsverfahren, Charakterisierungsmodellen und Wirkungsindikatoren ist weiters in ÖNORM EN ISO 14044 [116] hervorgehoben. Als möglicher Anwendungsbereich der Ökobilanzierung ist die Erstellung einer Umweltproduktdeklaration (engl.: Environmental product declaration EPD) genannt, welche in ÖNORM EN ISO 14025 [119] geregelt ist. Sogenannte Typ-III-Umweltproduktdeklarationen stellen quantifizierte umweltbezogene Informationen aus dem Lebensweg eines Produkts zur Verfügung, um damit Vergleiche zwischen Produkten gleicher Funktion zu ermöglichen. Die für das Bauwesen relevante Produktkategorie der Bauprodukte ist in ÖNORM EN 15804 [120] geregelt, welche die Vorgaben für die Erstellung von Umweltproduktdeklarationen von Bauprodukten bzw.







Bauprozesse liefert. Die ÖNORM EN 15804 [120] macht beispielsweise konkrete Angaben zu Charakterisierungsmodellen sowie -faktoren, welche für die Bestimmung der Umweltindikatoren zu verwenden sind. Die aktuelle ÖNORM EN 15804 [120] schreibt hierbei die Nutzung der Charakterisierungsfaktoren nach dem European Commission - Joint Research Center vor, welche online zum Download verfügbar sind [121]. Die in diesem Zusammenhang stehende European Platform on Life Cycle Assessment (EPLCA) [122] beabsichtigt mit ihrem Life Cycle Data Network (LCDN) die Bereitstellung einer global nutzbare Infrastruktur zur Veröffentlichung qualitätsgesicherter LCA-Datensätze unterschiedlicher Organisationen.

Die ÖNORM EN 15804 [120] unterteilt in Abhängigkeit von den berücksichtigten Lebenszyklusphasen mehrere Arten von Umweltproduktdeklarationen. Die Berücksichtigung der Herstellungsphase eines Bauprodukts, sprich der Module A1-A3 nach Abbildung 31, wird als "von der Wiege bis zum Werkstor" (engl.: cradle-to-gate) bezeichnet.

LEBENSZYKLUS EINES BAUWERKS nach ÖNORM EN 15804																	
/	41-A	3	A	1-A5][B1-B7 C1-C							C4				
HER	STELLU PHA SE	NGS-	E Pi	AU- IASE		NUTZUNG SPHA SE EN TSORGUNG PHASE					GUNGS \SE	-					
A1	A2	A3	A4	A5		B1	B2	В3	B4	B5	B6	B7	C	C	2	C3	C4
Rohstoffaufbereitung	Transport	Herstellung	Transport	Bau-/Einbauprozess		Rohstoffaufbereitung	Transport	Herstellung	Transport	Herstellung	Transport	Herstellung	Rückbau, Abriss	Transport		Abfallbehandlung	Deponierung

Abbildung 31: Darstellung von Lebenszyklusphasen bzw. Modulen für die Nachhaltigkeitsbewertung von Bauwerken, in Anlehnung an ÖNORM EN 15804 *[120]*

Die große Mehrheit der veröffentlichten EPDs ist auf die Herstellungsphase beschränkt. Die Betrachtung der Module A1-A3 ist zur Erstellung einer Umweltproduktdeklaration in jedem Fall verpflichtend, eine Ausweitung der Nachhaltigkeitsbewertung über die Herstellungsphase hinaus optional. Hierbei ist zu erwähnen, dass Module in der Bau-, Nutzungs- und Entsorgungsphase oftmals durch geringere Verfügbarkeiten von Umweltdaten und damit einhergehende Einbußen hinsichtlich Datenqualität geprägt sind. Aufgrund des wesentlich geringeren Gewichts von faserverstärkter Kunststoff-Bewehrung im Vergleich zu konventioneller Stahlbewehrung sind umweltrelevante Vorteile in den Transport- und Herstellungs-Modulen zu erwarten. Der oftmals korrosionsbeständige Charakter, bspw. von




ASFINAG

carbon- oder AR-glasfaserverstärkter Bewehrung, ermöglicht darüber hinaus eine Ausdehnung der Lebensdauer sowie eine Reduktion der Erhaltungskosten im Vergleich zu Bauteilen aus konventionellem Stahlbeton, was wiederum zu Vorteilen hinischtlich der Umweltauswirkung führt. Die Datenlage zur Entsorgungs- bzw. Recyclingphase von faserverstärkten Kunststoffen ist gering und bedarf weiterer Forschung, um eine valide Aussage hinsichtlich seiner Umweltrelevanz treffen zu können. Untersucht wird in diesem Zusammenhang vor allem die Trennung von Faser und Matrixmaterial, wobei die dafür notwendigen Prozesse wie bspw. die Pyrolyse. Eine Recycling-Strategie wird im Falle von Carbonfasern verfolgt, was aufgrund der hohen Umweltauswirkungen im Vergleich zu Glasund Basaltfasern nachvollziehbar ist (siehe AP6 Machbarkeitstudie Recycling). Bezüglich Datenqualität ist in der ÖNORM EN 15804 [120] auf Seite 33 folgendes festgehalten: "Datenlücken dürfen mit konservativen Daten von Durchschnittsdaten oder von generischen Daten gefüllt werden. Jede Annahme für eine solche Entscheidung muss dokumentiert werden". Laut DIN CEN/TR 15941 [123] sind generische Daten beispielsweise anlagenspezifische oder durchschnittliche Ersatzdaten für den Fall, dass keine für das Produktsystem spezifischen, sprich systemspezifischen, Daten verfügbar sind. Somit können Datenlücken überbrückt werden.

In diesem Kontext wird abschließend eine kürzlich vorgenommen Neuerung in der Standardisierung von Umweltproduktdeklarationen im Bauwesen hervorgehoben: Die ÖNORM EN 15804 wurde 2020 aktualisiert, wobei für das Versauerungspotential nun die Accumulated Exceedance (AE) anstelle des Acidifcation Potentials (AP) tritt. Es kommt zu einem Einheitenwechsel von kg SO₂-Äq. im Falle des AP zu mol H+-Äq. Aus diesem Grund findet sich in der Auswertung und Analyse der Umweltdaten im nachfolgenden Kapitel die Angabe beider Wirkungsindikatoren. Weitere Informationen zum AE können in [124] nachgelesen werden.

5.2. Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der ökologischen Analyse nichtmetallischer Bewehrung präsentiert und diskutiert. Tabelle 11 zeigt die finale Übersicht der extrahierten Umweltdaten im direkten Vergleich. Es wurde zwischen drei Faserarten: Carbonfasern (engl.: carbon fibre CF), Glasfasern (engl.: glass fibre GF) und Basaltfasern (engl.: basalt fibre BF), weiters fünf Matrixmaterialtypen: Vinylesterharz (engl.: vinyl ester resin VE), Epoxidharz (engl.: epoxy resin EP), Polyesterharz (engl.: polyester resin PR), Styrol-Butadien-Kautschuk (engl.: Styrene-Butadiene-Tubber SBR) und Acrylat (engl.: acrylate dispersion AD) sowie den endgültigen Bewehrungsprodukten, genauer carbonfaserverstärkten Kunststoffen (engl.:





carbon fibre-reinforced polymers CFRP), glasfaserverstärkten Kunststoffen (engl.: glass fibrereinforced polymers GFRP) und basaltfaserverstärkten Kunststoffen (engl.: basalt fibrereinforced polymers BFRP) unterschieden. Die Nachhaltigkeitsbewertung berücksichtigt die Herstellungsphase (Module A1-A3 nach Abbildung 31) der Bewehrungskomponenten und produkten.

Die konsultierten Datenquellen umfassen Sachbilanzergebnisse aus öffentlich zugänglichen Datenbanken, daran geknüpft eine eigenständige Berechnung von Wirkungsindkatoren nach Norm soweit es die Datenlage erlaubt, wie auch eine Extraktion von relevanten Wirkungsindikatoren aus öffentlich verfügbaren EPDs und wissenschaftlichen Publikationen. Weiters fand ein direkter Austausch mit Herstellern statt. Die im Zuge dieser Arbeit konsultierten Datenquellen werden in einem nachlaufenden Kapitel einzeln detailliert beleuchtet. Die zusammengefassten Ergebnisse sind in Tabelle 11 dargestellt. Im Vergleich beläuft sich das GWP von konventioneller Stahlbewehrung nach [109] auf 2,3 kg CO₂-Äq., das AP auf 6,3*10⁻³ kg SO₂-Äq. und des ADP fossil auf 24,1 MJ [125].

		GWP ¹²	AP ¹²	AE ¹²	ADP ¹² nicht fossil	ADP ¹² fossil	CED ¹² bzw. PERT ¹² +PENRT ¹²
		[kg CO₂-Äq.]	[kg SO₂-Äq.]	[mol H+-Äq.]	[kg Sb-Äq.]	[MJ]	[MJ]
-10	CF	26.4 ^{1,2}	3.2E-01 ^{1,2}	2.1E-01 ³	1.2E-05 ^{1,2}	404.0 ^{1,2}	454.0 ¹
ser	GF	1.3 ⁵	4.9E-03 ³	2.9E-03 ⁵	4.2E-07 ⁵	19.4 ⁴	24.5 ⁵
Ба	BF	1.0 ⁶	3.7E-03 ⁶	-	2.1E-02 ⁶	-	-
	EP	6.7 ³	2.1E-02 ⁷	5.1E-02 ³	9.9E-06 ³	142.9 ⁷	135.0 ³
Matrix ¹¹	VE	6.0 ³	-	3.5E-02 ³	1.0E-04 ³	101.0 ⁸	121.5 ³
	PR	3.8 ³	-	1.7E-02 ³	6.8E-05 ³	69.1 ⁸	87.8 ³
	AD	1.7 ⁹	8.0E-03 ⁹	-	(1.5E-02 ⁹)	-	36.6 ⁹
	SBR	1.2 ⁹	4.1E-03 ⁹	4.9E-03 ⁷	(1.7E-02 ⁹)	78.9 ⁷	38.1 ⁹
• ~	CFRP	21.5	2.5E-01	1.7E-01	1.1E-05	338.7	374.3
R R	GFRP	2.1	7.3E-03	1.0E-02	1.8E-06	37.9	41.1
	BFRP	1.6	5.4E-03	-	1.8E-02	-	-
0 0	CFRP	20.2	2.4E-01	-	(3.8E-03)	-	349.7
AD AD	GFRP	1.4	5.4E-03	-	(2.3E-03)	-	26.3
	BFRP	1.1	4.1E-03	-	(2.0E-02)	-	-

Tabelle 11: Übersicht der extrahierten Umweltdaten für Faser-, Matrixmaterialien und faserverstärkte Kunststoffe (Angabe der Datenquellen in den Fußnoten). Wirkungsindikatoren pro kg Produkt

¹[126], ²[109], ³[127], ⁴[122], ⁵[128], ⁶[129], ⁷[130], ⁸[131], ⁹[132]

¹⁰ BF: Basaltfaser; CF: Carbonfaser; GF: Glasfaser

¹¹ AD: Akrylatdispersion; EP: Epoxidharz; PR: Polyesterharz; SBR: Styrol-Butadien Kautschuk; VE: Vinylesterharz ¹² GWP: Global Warming Potential; AP: Acidification Potential; AE: Accumulated Exceedance; ADP: Abiotic Depletion Potential; PERT: Primärenergiebedarf erneuerbarer Ressourcen Total; PENRT: Primärenergiebedarf nicht erneuerbarer Ressourcen Total; CED: Cumulative Energy Demand

Die ecoinvent Datenbank wurde herangezogen, um die grundsätzliche Validität der extrahierten bzw. ermittelten Umweltdaten nach Tabelle 11 zu überprüfen. Die







Wirkungsindikatoren in Tabelle 11 umfassen das Global Warming Potential (GWP), das Acidification Potential (AP), die Accumulated Exceedance (AE), das Abiotic Depletion Potential (ADP) fossil und nicht fossil, den Primärenergiebedarf erneuerbarer (PERT) und nicht erneuerbarer (PENRT) Ressourcen sowie den Cumulative Energy Demand (CED). Hierbei sei zum besseren Verständnis der Wirkungsindikatoren im Allgemeinen der Unterschied zwischen PENRT, ADP fossil und CED kurz hervorgehoben: Das ADP fossil stellt das Potential für den Abbau fossiler Brennstoffe dar, während das PENRT den Ressourceneinsatz widerspiegelt und anhand des unteren Heizwerts der eingesetzten energiehaltigen Ressourcen (energetisch als auch stofflich) bestimmt wird. Unterschiede könnten sich aus der zusätzlichen Berücksichtigung nuklearer Energie im PENRT im Vergleich zum ADP fossil ergeben. Das CED berücksichtigt die gesamte Primärenergie, sowohl erneuerbar als auch nicht erneuerbar, sowohl stofflich als auch energetisch. In [133] ist beispielsweise erwähnt, dass das Konzept des CED mehrfach in Datenbanken verwendet wird, jedoch auf unterschiedliche Bezeichnungen dieses Begriffes zurückgegriffen wird. Die genannten Umweltparameter sind folglich aufgrund der genannten feinen Unterschiede nur mit Vorbehalt direkt miteinander vergleichbar. Weitere Informationen zum kumlierten Energieaufwand finden sich beispielsweise in der VDI Richtlinie 4600 [134].

Die Charakterisierungmodelle bzw. Bewertungsgrundlagen der Tabelle 11 umfassen den Environmental Footprint (EF) der European Platform on Life Cycle Assessment [121], weiters CML des Departments of Industrial Ecology der Universität Leiden [135], Charakterisierungsmodelle des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [117] sowie das International Life Cycle Data system (ILCD) der European Platform on Life Cycle Assessment [136]. Auch aufgrund der bereits erwähnten Neuerungen der ÖNORM EN 15804 2020 in kommt es zu dieser genannten Vielzahl an unterschiedlichen Charakterisierungsmodellen, da Datenquellen konsultiert wurden, die zeitlich sowohl vor als auch nach dieser Änderung liegen.

Nachfolgend werden die Umweltdaten der einzelnen Komponenten faserverstärkter Kunststoff-Bewehrung sowie jene der endgültigen Bewehrungsprodukte näher beleuchtet. Alle Details zu konsultierten Datenquellen finden sich in Kapitel 5.3.

Die extrahierten Umweltdaten der Carbonfasern aus der Literatur zeigen eine relativ große Schwankungsbreite zwischen maximalen und minimalen Werten, was in Zusammenhang mit einer unzureichenden Datenverfügbarkeit und -transparenz steht. Anhand der im Zuge des AP2 Charakterisierung identifizierten Carbonbewehrungsprodukte lässt sich ein Gewichtsanteil der Fasern von rund 70-80% und ein Gewichtsanteil des Matrixmaterials von







rund 20-30% schließen. In diesem Zusammenhang sei allerdings erwähnt, dass anteilsmäßige Daten hauptsächlich für Epoxidharz als Matrixmaterial vorlagen. Für die Ermittlung der Umweltdaten in Tabelle 11 wurde in weiterer Folge ein Gewichtsanteil der Fasern von 75% und ein Gewichtsanteil des Matrixmaterials von 25% angenommen. Aufgrund der hohen Umweltauswirkung der Herstellung von Carbonfasern hat der Anteil der Fasern am Gesamtprodukt für die Bewertung seiner Nachhaltigkeit hohe Relevanz.

Die aus den diversen Quellen extrahierten Umweltdaten von Glasfasern zeigen eine zufriedenstellende Vergleichbarkeit und im Vergleich zu den Carbonfasern weitgehend geringere Schwankungsbreite. Das GWP pendelt sich auf rund 1,3 kg CO₂-Äg. pro Kilogramm Glasfaser ein. Die Datengualität der Datensätze mit höherem GWP ist fragwürdig und teils lückenhaft dokumentiert (nähere Details siehe Kapitel 5.3). Es sei festgehalten, dass sich die extrahierten Wirkungsindikatoren auf keinen spezifischen Glasfasertyp beziehen. Eine Unterscheidung, bspw. in E-Glas und AR-Glas, liegt nicht vor. In der Literatur findet sich zumeist der Hinweis, dass E-Glas die signifikante Mehrheit in der Glasfaserproduktion darstellt, obwohl im Bauwesen typischerweise AR-Glas aufgrund des höheren Korrosioswiderstands zum Einsatz kommt. In mehreren Quellen ist angeführt, dass der Großteil der Umweltauswirkungen dem Produktionsschritt der Glasschmelze mit seinen charakteristisch hohen Temperaturen zuzuschreiben ist. Als Dichte von Glasfasern wird 2,5 g/cm³ zur Ermittlung der Wirkungsindikatoren angenommen. Im Falle von 1D-, 2D- und 3D-Bewehrungselementen lässt sich nach Erhebung im Rahmen des AP2 Charakterisierung aus den betrachteten Produkten ein Gewichtsanteil der Glasfasern von 85% und ein Gewichtsanteil des Harzes von 15% im Mittel schließen. Weiters ist keine Abhängigkeit des Fasergehalts vom Typ des Matrixmaterials erkennbar. Bei GFRP kann von der Dichte 2,1 g/cm³ ausgegangen werden, was sich aus der Betrachtung der Produkte für 1D-Bewehrung aus AP2 Charakterisierung schließen lässt. Zumeist wird Vinylester, Epoxidharz oder Styrol-Butadien-Kautschuk als Tränkungsmaterial für GFRP verwendet.

Aufgrund der mit den anderen beiden betrachteten Faserarten vergleichsweise niedrigen Umwelteinwirkungen von BFRP ist hierbei das eingesetzte Matrixmaterial zur Bewertung der Nachhaltigkeit ausschlaggebend. Im Falle der identifizierten 1D-Bewehrungselemente aus AP2 Charakterisierung lässt sich aus den betrachteten Produkten ein Gewichtsanteil der Fasern von 90% und ein Gewichtsanteil des Harzes von 10% im Mittel schließen. In diesem Zusammenhang sei allerdings erwähnt, dass die Datenverfügbarkeit für Basaltfasern im Vergleich zu beispielsweise Glasfasern weit geringer ist. Für 2D- und 3D-Elemente nach AP2





Charakterisierung liegen keine Daten von konkreten Bewehrungsprodukten vor. Die Dichte von Basaltfasern wurde für die Ermittlung der Umweltdaten zu 2,7 g/cm³ angenommen.

Ein normierter Vergleich des GWP der Fasermaterialien ist in Abbildung 32 dargestellt und zeigt, dass Carbonfasern die mit Abstand größte Umweltauswirkungen aufweisen.



Abbildung 32: Normierter Vergleich des GWP der Faser anhand der Umweltdaten nach Tabelle 11

Allgemein findet sich in der Literatur der Hinweis, dass die Umweltauswirkungen des Herstellungsprozesses nichtmetallischer Bewehrung aus der Faser und dem Matrixmaterial per se vernachlässigbar gering sind (z.B. Pultrudieren, Wirken, etc.). Diese wurden daher in der vorliegenden Nachhaltigkeitsbewertung nicht weiter berücksichtigt. Bezüglich der Umweltauswirkung der Verarbeitungsprozesse sei beispielsweise auf den Bericht von [137] verwiesen. Dieser zeigt, dass das GWP im Falle der Produktion eines FRP-Bewehrungsstabes mittels Pultrusion 0,57 kg CO₂-Äq./kg Produkt beträgt und somit insbesondere bei CFRP-Bewehrung nur von untergeordneter Relevanz ist. Ebenso erwähnt ist in diesem Bericht, dass die Umweltauswirkung des Leimungsmittels (engl.: sizing agent) und Initiators (engl.: initiators) vernachlässigbar ist.

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Matrixmaterialien sind nicht signifikant, dennoch ist eine Reihung beispielsweise anhand des GWP möglich, siehe Abbildung 33. Die größten Umweltauswirkungen weist Epoxidharz auf, gefolgt von Vinylesterharz, Polyesterharz, Acrylat und Styrol-Butadien-Kautschuk. Die Dichte der Tränkungsmaterialien wurde zur Bestimmung der Umweltdaten der FRP-Bewehrung zu 1,2 g/cm³ angenommen.



Abbildung 33: Normierter Vergleich des GWP der Matrixmaterialien anhand der Umweltdaten nach Tabelle 11

Abbildung 34 zeigt den normierten, massespezifischen Vergleich des GWP zwischen den einzelnen Bewehrungsmaterialien. Die geringste Umweltauswirkung weist die







Basaltbewehrung auf, dicht gefolgt von Glasfaserbewehrung, konventionellem Baustahl (BST) und korrosionsbeständiger Edelstahlbewehrung (ER). Das Schlusslicht in diesem Vergleich bildet die Carbonbewehrung, wobei diese ein bei weitem größeres Treibhauspotential aufweist. Abbildung 35 zeigt darüber hinaus noch den normierten, festigkeitsspezifischen Vergleich zwischen diesen Bewehrungsmaterialien. Die Reihung bleibt gleich wie in Abbildung 34, jedoch fallen die Unterschiede in der Umweltauswirkung zwischen den einzelnen Materialien deutlich geringer aus.



Abbildung 34: Normierter Vergleich des GWP pro kg Endmaterial anhand der Umweltdaten nach Tabelle 11



Abbildung 35: Normierter Vergleich des GWP pro Festigkeit N/mm² des Endmaterials anhand der Umweltdaten nach Tabelle 11

5.3. Beschreibung der konsultierten Datenquellen

Beim Vergleich von Umweltdaten unterschiedlicher Datenquellen ist zu berücksichtigen, dass eine gewisse Unschärfe mit einhergeht. Diese betrifft bspw. den Umstand, dass unterschiedliche Charakterisierungsmodelle und -faktoren zur Bestimmung der Wirkungsindikatoren herangezogen wurden oder auch Unterschiede in der regionalen und zeitlichen Betrachtung der Umweltdaten vorhanden sein können. Bestenfalls sind Angaben zu derartigen Rahmenbedingungen einer Ökobilanzierung in der konsultierten Literatur angeführt.

Allgemein FRP

[137] "LCA database of environmental impacts to inform material selection process", Hill Callum and Norton Andrew, 2018: Dieses inhaltlich sehr weitreichende und umfangreiche





Dokument, welches im Rahmen des Projekts DACOMAT (Damage Controlled Composite Materials) entstanden ist, enthält Informationen zu Umweldaten von FRP, wie bspw. Umweltauswirkungen aus Herstellungs- oder Verarbeitungsprozessen (Pultrusion, etc.) und Umweltdaten der Produktionsphase diverser Tränkungs- sowie Fasermaterialien. Als positiv hervorzuheben ist die umfangreiche und vollständige Referenzierung der Datenquellen.

Glasfasern

[138] *"Life Cycle Inventories of Building Products", Kellenberger Daniel et al., 2007:* Im Abschnitt XIII dieses Dokuments werden folgende Aussagen zu Glasfasern getroffen: Die Mehrheit in der Glasfaserproduktion ist E-Glas. Die Glasschmelze macht einen Anteil von rund drei Viertel der gesamten Energie bei einem Masseverlust von rund 20-45% aus. Als Basisbestandteil von Glasprodukten wird Quarzsand und Soda genannt. Als führende Produzenten von Glasfasern in der EU werden Ahlstrom, Bayer, Owens Corning, PPG Indsutries und Vetrotex angeführt.

1. [128] "Life cycle assessment of CFGF - Continuous Filament Glass Fibre Products", PwC – Sustainable Performance and Strategy, 2016: In diesem von PwC geschriebenen Bericht für die Organisation GlassFibreEurope wurde eine cradle-to-gate Lebenszyklusanalyse durchgeführt. Eingangs ist speziell die Bauindustrie als Anwendungsbereich für Glasfaserprodukte erwähnt. Zur Modellierung wurde die LCA-Software TEAM[™] von PwC herangezogen. In diesem Dokument ist nicht ersichtlich, um welchen Glasfasertyp es sich handelt. Es wurden die Daten von insgesamt sieben unabhängigen Produktionsstätten gesammelt und ausgewertet. Zusammengefasst zeigen die Ergebnisse, dass die Produktionsphase der Glasschmelze für einen Großteil des Energieverbrauchs verantwortlich ist. Nachgelagerte Produktionsschritte (downstream: Schneiden, Formen, etc.) sind nur von untergeordneter Relevanz.

2. [139] "Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass" – JRC reference report, Scalet Bianca Maria et al., 2013: Als Anwendungsfeld wird für das Produkt "continuous filament glass fibre" vor allem die Bauindustrie genannt. Es wird umfassend auf die Eckdaten und die Bedeutung dieses Produkts im Rahmen der weltweiten Glasproduktion eingegangen (Kapitel 1.5). Massebezogen stellt die Produktion von Glasfaserrovingen den kleinsten Sektor der gesamten Glasfaserproduktion dar. Die hauptsächlichen Umweltprobleme im Zusammenhang mit Glasfaserrovingen sind in Kapitel 1.5.4 angeführt. Als Hauptpunkt wird der sehr energieintensive Prozess der Glasschmelze mit seinen charakteristisch hohen Temperaturen genannt. Die Standardfaser mit rund 98% der







produzierten Glasfasern stellt E-Glas dar. Der Masseverlust in der Produktion der Glasfasern liegt bei 20-45%. Es wird in diesem Dokument ein Überblick der Sachbilanzergebnisse auf Seite 122 gegeben. Die Nachrechnung mittels dieser überblickshaften, unvollständigen LCI-Daten wird von den Autoren als wenig valide beurteilt und nur zu Vergleichszwecken durchgeführt.

3. [140] "Environmental impact of concrete structures reinforced with GFRP bars: A simplified study on columns", Al-Ayish Nadia et al., 2019: Dieser Konferenzbeitrag erschien im Zuge des fib Symposiums "CONCRETE Innovations in Materials, Design and Structures" 2019 in Krakau. In diesem Dokument ist eine Darstellung enthalten, welche das relative GWP unterschiedlicher Matrixmaterialien (Vinylester-, Epoxid- und Polyesterharz) mit Glasfasern vergleicht. Laut dieser Studie sind die drei Matrixmaterialien hinsichtlich ihres GWP gleichauf. Vinylesterharz, welches als gängigstes Matrixmaterial in Kombination mit Glasfasern angegeben ist, weist einen kleinen Vorteil von rund 15% auf. Weiters ist ein relativer Vergleich des GWP zwischen GFRP und Stahlbewehrung enthalten. Angegeben ist, dass die zur Ermittlung des GWP erforderlichen LCI-Daten der Datenbank ecoinvent entnommen wurden. Der Fasergehalt von GFRP liegt laut diesem Beitrag bei 65-85%.

4. [141] "Do fiber-reinforced polymer composites provide environmentally benign alternatives? A life-cycle-assessment-based study", Duflou et al., 2012: In diesem Dokument sind Umweltdaten der Produktionsphase von FRP gelistet, wobei die sorgfältige Angabe von solide wirkenden Quellen hervorzuheben ist. Weiters werden in diesem Dokument unterschiedliche Produkte aus Beton, Aluminium, Edelstahl, Stahl und Glasfasern sowie Carbonfasern verglichen, jedoch jeweils ohne auf Details einzugehen. Die Umweltdaten von Glasfasern wurden hieraus extrahiert.

5. [142] "Continuous filament glass fibre (direct rovings)" – Datensatz nach ELCD 3: Hierbei handelt es sich um einen LCI-Datensatz der ELCD 3-Datenbank (European reference Life Cycle Database) zu Glasfasern (Bezeichnung: direct rovings). Anzumerken ist, dass diese Datenbank seit 2018 nicht mehr fortgeführt wird und auf den Environmental Footprint (EF) umgestiegen wurde. Ausgewertet wurde der Datensatz mittels der LCA-Software Look@LCI [143], welche von seitens der European Platform on Life Cycle Assessment (EPLCA) online zum Download zur Verfügung gestellt wird.

6. [127] *Eco Report nach EuCIA Eco Impact Calculator "Glass Fibre Direct Roving":* Der EuCIA Eco Impact Calculator ist online frei nutzbar und dient der Berechnung der Umweltauswirkungen von Verbundwerkstoffen, wobei die Produktionsphase (cradle-to-gate)





berücksichtigt wird. Im online einsehbaren Hintergrundbericht des Eco Impact Calculators sind ecoinvent, ELCD und PlasticsEurope als Quellen der LCI-Daten angeführt. Als LCIA ist ILCD 2011 midpoint+ genannt. Es wird zwischen einem neueren und einem Standard-Datensatz der einzelnen Produkte unterschieden, wobei der Unterschied darin liegen dürfte, dass es sich um zwei unterschiedliche Versionen der Datenbank ecoinvent handelt. Die Unterschiede zwischen den beiden Datensätzen sind im Falle der Glasfasern (direct roving) gering.

7. [144] *"Les matériauxcomposites, moteursde la mobilitépropre?", Michaud V., 2016:* Diese online verfügbare Präsentation bezieht sich hauptsächlich auf die Automobilindustrie und gibt Umweltdaten von Glasfasern und anderen Materialien an.

Glasfaserverstärkter Kunststoff (Glass-fibre reinforced polymer GFRP)

8. [145] "Prozess-Datensatz: Kunststoffteil aus laminiertem Polyesterharz (GFRP, 30% Glasfaseranteil)", Ökobaudat, 2018: Als Anwendungsbereiche von glasfaserverstärktem Kunststoff werden der Brückenbau, Fassadenbau sowie Schachtabdeckungen und Kabelkanäle genannt. Es dürfte sich hierbei nicht um ein klassisches Bewehrungsprodukt für den Betonbau handeln, da der Faseranteil sehr gering zu 30% angegeben ist. Laut vorhergehender Recherche sollte dieser bei einem Bewehrungsprodukt eher bei 60-70% liegen.

9. [146] *"Environmental Product Declaration – GFRP Composite Poles from MİTAŞ Composites", The International EPD System, 2020:* Das Produkt dieser EPD enthält 25-40% Polyesterharz, 50-70% Glasfasern und 1-3% andere Chemikalien. Die EPD wurde im September 2020 veröffentlicht. Als Datengrundlage ist ecoinvent in Verbindung mit der Software SimaPro angegeben.

Basaltfasern

10. [129] "Life Cycle Assessment as a tool for resource optimisation of continuous basalt fibre production in Iceland", Azrague et al., 2016: Bei dieser Datei handelt es sich um eine Präsentation im Zuge der Konferenz "Engineering Conferences International". Einige wenige Wirkungsindikatoren der Produktionsphase des Produkts "continuous basalt fibres" sind in dieser Datei angegeben, wobei zwischen den Regionen Island und Russland sowohl auch zwischen der verwendeten Energiequelle unterschieden wird: "electricity+gas Russia", "electricity+gas Iceland" oder "electricity Iceland". Der Einsatz von Erdgas und Elektrizität in der Produktion der Basaltfasern ist in Hinblick auf die Umweltauswirkung als maßgebender





Faktor vermerkt (vor allem der Energieverbrauch des Ofens). In dieser Präsentation ist ebenfalls ein relativer Vergleich von Wirkungsindikatoren unterschiedlicher Faserarten enthalten.

11. [147] *"Schlussbericht zum Forschungsvorhaben C³", Grauer Otto, 2016:* Das GWP von Basaltfasern, wie in diesem Schlussbericht des Forschungsvorhabens C³ angegeben, ist im Vergleich zu anderen konsultierten Datenquellen eher hoch. Die in diesem Bericht verwendeten Daten stammen von der DBF (Deutsche Basalt Faser). Die Analyse der Ergebnisse hat ergeben, dass der Großteil der Umweltauswirkungen dem Energieverbrauch während der Produktion von Basaltfasern zuzuschreiben ist.

Basaltfaserverstärkter Kunststoff (Basalt-fibre reinforced polymer BFRP)

12. [129] "A mechanical and environmental assessment and comparison of basalt fibre reinforced polymer (BFRP) rebar and steel rebar in concrete beams", Inman et al., 2016: In diesem Paper wird BFRP- mit Stahlbewehrung verglichen. Die Wirkungsindikatoren pro funktioneller Einheit (genauer: Träger bspw. BFRP reinforced concrete 2000 x 200 x 200 mm) sind im Paper ersichtlich. Angemerkt ist, dass für die LCI-Daten auf ecoinvent zurückgegriffen wurde. Es ist weiters angeführt, dass den Großteil der embodied emissions im Falle von BFRP-Bewehrung dem Harz zuzuschreiben ist. Die Ergebnisse hängen wesentlich vom verwendeten Harzprodukt ab. Weiters ist erwähnt, dass das GWP von Epoxidharz, welches als gängiges Matrixmaterial im Falle von BFRP-Bewehrung genannt ist, etwas geringer als jenes von Polyesterharz sei.

Carbonfasern

13. [109] "Cradle-to-gate life cycle assessment of CFRP reinforcement for concrete structures: Calculation basis and exemplary application", Stoiber et al., 2021: Dieses Journal Paper wurde von der Arbeitsgruppe für Ressourceneffizienten Ingenieurbau der BOKU Wien veröffentlicht. Die Umweltdaten zu Carbonfasern basieren auf den Ergebnissen von [126] und werden detailliert in der Veröffentlichung beleuchtet. Ergänzend dazu sei die Webseite eines japanischen Chemieunternehmens [148] genannt, welche in einem veröffentlichten Bericht angibt, dass pro kg Carbonfaser 20 kg CO₂ emittiert werden. Dieser Wert liegt etwas unter jenem Wert von [126], welcher in der oben genannten Publikation referenziert ist.

14. [127] Eco Report nach EuCIA Eco Impact Calculator "Carbon fibre": Laut dem Hintergrundbericht des EuCIA Eco Impact Calculators dienten unterschiedliche Quellen







(RWTH Aachen, EPLCA, etc.) zur Bestimmung der Umweltdaten von Carbonfasern. Der Datensatz repräsentiert die Produktion von Carbonfasern in Europa. Ein Konvertierungsfaktor von Polyacrylnitril-Fasern (PAN-Fasern) zu Carbonfasern von 42% wurde verwendet. Es wird wiederum zwischen einem älteren und einem neueren Datensatz unterschieden: Der ältere Datensatz verwendet einen Konvertierungsfaktor von 53%. Laut einem persönlichen Austausch mit der RWTH Aachen (Tim Röding) im Jahre 2020 ist ein Konvertierungsfaktor von PAN-Faser zu Carbonfaser kleiner 50% realistisch.

11. [147] "Schlussbericht zum Forschungsvorhaben C³", Grauer Otto, 2016: Die Modellierung der Sachbilanzen von Carbonfasern in diesem Bericht ist detailliert beschrieben. Das Ergebnis des GWP liegt bei rund 11,5 kg CO₂-Äq., was einen relativ geringen Wert im Vergleich zu allen anderen Quellen darstellt. Das gleiche gilt auch für weitere Wirkungsindikatoren wie bspw. dem ADP fossil. Der Hauptanteil der Umweltbelastungen ist dem Ausgangsstoff Polyacrylnitril (PAN) zugeschrieben. Die Abstimmung der Umweltanalyse in diesem Dokument wurde mit SGL Carbon getroffen. Außerdem wurde die Ökobilanzierung für 1m² einer Carbon-Bewehrungsstruktur sowie 1m eines Carbon-Bewehrungsstabes durchgeführt. Die Ergebnisse sind auch im Falle dieser Bewehrungsprodukte um einiges geringer als in allen anderen konsultierten Datenquellen angegeben. Die Qualität bzw. Validität dieser Daten kann nicht beurteilt werden.

Tränkungsmaterialien (Vinylesterharz, Epoxidharz, Polyesterharz, Styrol-Butadien-Kautschuk und Acrylat)

15. [127] *Eco Report nach EuCIA Eco Impact Calculator "VE Resin (BPA epoxy based)":* Dieser Datensatz und automatisch generierte Bericht via EuCIA Eco Impact Calculator basiert auf dem Prozess "bisphenol A epoxy vinyl ester resin, global" von ecoinvent.

16. [131] *"Life cycle assessment of four generic unsaturated polyester (UP) resins and one vinyl ester (VE) resin", Rietveld et al., 2014:* Als deklarierte Einheit ist in diesem Bericht eine Tonne der beiden im Titel genannten Tränkungsmaterialien angegeben. Die Werte der Polyesterharze wurden gemittelt und mithilfe der Software SimaPro berechnet. Beim ADP fossil ist zu erwähnen, dass die Öleinheit zur Darstellung des Wirkungsindikators umgerechnet wurde, wobei von 42 MJ pro kg Erdöl ausgegangen wurde. Der Bericht wurde von Ernst & Young Accountants LLP für AVK – Industrie Faserverstärkter Kunststoffe erstellt.



17. [127] *Eco Report nach EuCIA Eco Impact Calculator "EP resin":* Dieser Datensatz und automatisch generierte Berich basiert auf dem Prozess "epoxy resin, liquid, european average production" von ecoinvent.

18. [130] *Datensatz nach PlasticsEurope "Liquid epoxy resin"*: Diese LCI-Daten sind als Ökoprofil auf der Webseite von PlasticsEurope frei zum Download verfügbar. Es sind zwei Auswertungen enthalten, wobei eine der älteren Version wie im Paper von [109] entspricht und die neuere Version auf der aktualisierten ÖNORM EN 15804 aus dem Jahr 2020 basiert. Minimale Unterschiede sind durch die Anwendung der geänderten Charakterisierungsfaktoren erkennbar.

19. [149] *"EPD Reactive resin based on epoxy resin, unfilled/solvent-free with low content of reactive diluent", IBU, 2021:* Laut Rückmeldung von FEICA (The Association of the European Adhesive & Sealant Industry) ist diese EPD am wahrscheinlichsten mit jenem Epoxidharz vergleichbar, welches als Matrixmaterial für nichtmetallische Bewehrung verwendet wird.

20. [127] *Eco Report nach EuCIA Eco Impact Calculator "Unsaturated polyester resin (average value)"*: Dieser Datensatz basiert auf einem gemittelten Wert der Prozesse "DCPD-based unsaturated polyester resin", "Isophthalic acid-based unsaturated polyester resin", "orthophthalic acid-based unsaturated polyester resin" und "pure maleic unsaturated polyester resin" von ecoinvent.

21. [150] *"Prozess-Datensatz: Kunststoffprofil SBR", Ökobaudat, 2016:* Der Wert dieses Datensatzes ist vergleichsweise etwas höher als für reines Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR), da in diesem Datensatz noch weitere Prozesse enthalten sind (bspw. plastic extrusion unspecific, usw.). Es ist in dieser Quelle erwähnt, dass die cradle-to-gate Phase berücksichtigt wurde und die länderspezifische Situation in Deutschland abgebildet ist. Die Umweltdaten wurden anhand der EN 15804 erstellt.

22. [132] *"EPDLA Life Cycle Inventory of Polymer Dispersions", PwC, 2015:* Für die Organisation European Polymer Dispersions and Latex Association (EPDLA) wurde von PwC eine Lebenszyklusanalyse für flüssige Dispersionen durchgeführt. Ein Industrie-Mittelwert von den behandelten Dispersionen in Westeuropa soll abgebildet werden, wobei 14 Unternehmen beteiligt sind. Die Produktionsphase wurde berücksichtigt. Die funktionelle Einheit ist 1kg der flüssigen Dispersion. Man findet einen Hinweis darauf, dass die Studie aus dem Jahr 2015 stammt. Es wurden Umweltdaten für Styrene-Butadien-Kautschuk und pures Acrylat extrahiert.







23. [130] Datensätze nach PlasticsEurope "Butadien" & "Styrene": Die LCI-Daten von Butadien und Styrene sind als Ökoprofil auf der Webseite von PlasticsEurope verfügbar. Ausgewertet wurden diese mittels der Look@LCI Software [143] von EPLCA. Laut Internetrecherche enthält SBR üblicherweise ein Viertel Styrol und drei Viertel Butadien. Entsprechend werden die Daten kumuliert. Die Daten von Styrol sind nicht akkumuliert vorhanden. Hier wurden die Charakterisierungsfaktoren von EN 15804: 2020 bzw. im Falle von ADP fossil die CML IA 4.8 verwendet. Datenqualität und -genauigkeit sind begrenzt. Zu beachten ist, dass bei einer eigenständigen Berechnung mit den LCI-Daten von PlasticsEurope einige Unschärfen enthalten sind, wie bspw. eine Vernachlässigung des Einflusses von Vereinigungsprozessen.



6. ÖKONOMISCHE ANALYSE

6.1. Allgemeines

Zur Bewertung des ökonomischen Potentials werden die Lebenszykluskosten (LZK) von verschieden großen Bauteilen in diesem Abschnitt analysiert. Folgende Bauteile werden herangezogen:

- Große Rahmenbrücke (15 m) (siehe 6.3)
- Winkelstützmauer (siehe 6.5)
- Bahnsteigkante (siehe 6.6)

Grundlage bilden die Bemessungen von Alternativvarianten mit nichtmetallischer Bewehrung, welche in Kap. 4 (AP4) für diese durchgeführt wurden.

6.2. Grundlagen der Lebenszykluskostenberechnung

Allgemeines

Nach ÖNORM EN 15804 [120] (Abbildung 31) werden verschiedene Phasen (Herstellungsphase, Bauphase, Betriebsphase, Entsorgungsphase) in einem Lebenszyklus eines Bauwerks berücksichtigt. In den anschließenden Untersuchungen, werden die Kosten in den Phasen A1-C4 berücksichtigt. Da die Bauphase (Errichtungsphase) als Initialphase betrachtet wird, sind Herstellungs- und Transportkosten (A1-A4) der einzelnen Baustoffe bereits implizit in den gegebenen Benchmarks (€/m²) berücksichtigt.

$$LZK = LZK_{E} + LZK_{B} + LZK_{A}$$

mit

LZK_E... Errichtungskosten LZK_B... Betriebskosten LZK_A... Abbruchkosten

Kosten für Sicherungsmaßnahmen, Umweltschutzmaßnahmen aus Behördenverfahren, Maßnahmen zur Verkehrsaufrechterhaltung während Instandhaltung und Abbruch (z.B. für darunter liegende Verkehrswege), sowie Staukosten sind in den angeführten Benchmarks und den durchgeführten Betrachtungen nicht berücksichtigt und bedürfen einer gesonderten Betrachtung.

Nachfolgend werden die für die Analysen notwendige Begriffe definiert und im Kontext der LZK erläutert.

(27)







Realwert

Der Realwert bezeichnet den wirklichen materiellen Wert eines Gutes aus heutiger Sicht (also ohne Berücksichtigung von Preisgleitung und Verzinsung). Um einen Vergleich von zu unterschiedlichen Zeitpunkten ermittelten Benchmarks zu ermöglichen, sind jedenfalls Anpassung zu berücksichtigen. Die Statistik Austria veröffentlicht hierfür monatlich den Baupreisindex (z.B. für den Straßenbau [151], Brückenbau [152]).

Valorisierter Wert

Im Rahmen der LZK-Berechnung ist auf Basis der Realwerte eine jährliche Valorisierung (Preisgleitung) zu berücksichtigen. Hierfür ist ein jährlich konstanter Prozentsatz z_v festzulegen. Um die Realwerte in valorisierte Werte (zukünftige Kosten) umzurechnen, wird folgende Formel verwendet:

$$LZK^{val} = \sum_{k=1}^{z} LZK(t)_{k}^{real} \cdot \left(1 + \frac{z_{V}}{100}\right)^{n}$$

mit

k... Laufindex über die rechnerischen Betrachtungsjahre
 m... Differenz zwischen dem jeweiligen rechnerischen Betrachtungsjahr und dem Referenzjahr des Kostenmodells
 Zinzentz zur Perückeichtigung der Preizgleitung

zv... Zinssatz zur Berücksichtigung der Preisgleitung

Barwert

Es sind Barwerte zu ermitteln, um die LZK zur Vergleichbarkeit rechnerisch auf denselben Bezugszeitpunkt zu referenzieren. Diese sind auf Basis der valorisierten Lebenszykluskosten nach Festlegung eines jährlich konstanten Diskontierungszinssatzes z_D festzulegen. Gemäß § 1000 ABGB ein Prozentsatz $z_D = 4,0$ % empfohlen. Dazu wird folgende Formel verwendet.

$$LZK^{bar} = \sum_{k=1}^{z} \frac{LZK(t)_{k}^{val}}{\left(1 + \frac{z_{D}}{100}\right)^{m}}$$

mit

k... Laufindex über die rechnerischen Betrachtungsjahre

(29)

m... Differenz zwischen dem jeweiligen rechnerischen Betrachtungsjahr und dem Referenzjahr des Kostenmodells

z_D... Diskontierungszinssatz

Ein niedriger Diskontierungssatz spricht generell für höheren Kapitaleinsatz am Beginn mit geringeren Unterhaltungskosten und ein hoher Diskontierungssatz im Umkehrschluss für eine geringere Investition mit höheren Folgekosten in der Zukunft.







Annuität

Die Investitionskosten bzw. die Summe aller Barwerte wird mit Hilfe des Annuitätsfaktors in gleichmäßige jährliche Zahlungen (= Annuitäten) umgerechnet. Auf diese Weise ist eine jahresbezogene Gegenüberstellung von einmaligen bzw. unregelmäßigen Investitionskosten und jährlichen Einnahmen bzw. Einsparungen und somit eine jährliche Ermittlung von Überschüssen möglich. Dies ermöglicht zudem den Vergleich zweier Investitionen mit unterschiedlicher Nutzungsdauer.

$$a = C_0 \cdot ANF_{n,i}$$
 und $ANF_{n,i} = \frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1}$

mit

a... Annuität in Geldeinheiten (in der für C verwendeten Währung) pro Periode C₀... Kapitalwert ANF_{u,i}... Annuitätenfaktor n... Nutzungsdauer i... Zinssatz

Restwert

Der Restwert kennzeichnet den Geldwert des Bauwerkes vor Ablauf der theoretischen Nutzungsdauer. Nach Ablauf der theoretischen Nutzungsdauer beträgt dieser Null. Die Bestimmung dieses Wertes wird dann erforderlich, wenn das Bauwerk nach einer bestimmten Nutzungsdauer an Dritte übergeben wird oder wenn innerhalb eines Betrachtungszeitraumes einer Lebenszykluskostenanalyse das Bauwerk seine Nutzungsdauer noch nicht erreicht hat und somit auf der positiven Seite berücksichtigt werden kann. Die Berechnung des Restwertes einer Brücke nach [153] setzt eine lineare Abschreibung der Errichtungskosten der Bauteile voraus und die Kosten werden gemäß dem Diskontierungsfaktor abgezinst.

$$RW_t^{bar} = C_0 \cdot \frac{n-t}{n} \cdot \frac{1}{\left(1+i\right)^t}$$

mit

RWt^{bar}... Barwert des Restwertes nach t verstrichenen Jahren

C_0... Kosten zum Zeitpunkt des eingesetzten Kapitals

- n... Nutzungsdauer
- t... verstrichene Nutzungsdauer
- i... Zinssatz

Verschiedene Teile haben unterschiedliche Nutzungsdauern und so sind diese nach Austausch der selbigen wieder als vollwertig anzusehen und der Restwert daher mit Bezug auf den Austauschzeitpunkt zu berechnen.

(31)





Analysezeitraum (Betrachtungszeitraum)

Der Analysezeitraum einer Lebenszykluskostenanalyse hat einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis. In [154] wird die Problematik der passenden Wahl des Analysezeitraum diskutiert und es werden folgende Anhaltspunkte gegeben.

- Der Analysezeitraum sollte mindestens der Lebensdauer eines Großteils der Komponenten entsprechen, mindestens aber der gesamten Lebensdauer der meisten austauschbaren Komponenten.
- Beim Vergleich von Alternativen, bei denen die Mehrzahl der Komponenten unterschiedliche Lebenszyklen aufweist, sollte der Analysezeit- raum lang genug sein, um Verzerrungen zu vermeiden, mindestens ein Zyklus der langlebigsten Komponenten.
- Ein Analysezeitraum wird die Unsicherheiten und Risiken bei der Projektprüfung erhöhen, wenn es darum geht, technologische Szenarien, wirtschaftliche Trends und soziale Wohlfahrtsprobleme über sehr lange Zeiträume zu prognostizieren.
- Die Definition eines Analysezeitraums, der für den Vergleich von Alternativen mit sehr unterschiedlicher Lebensdauer untersucht wird, sollte homogene und Konsenskriterien zur Schätzung der Restwerte berücksichtigen.

6.3. Methodik: Kostenkennwerte für den Einsatz von mit nichtmetallischer Bewehrung

Preise der nichtmetallischen Bewehrung

Wesentliches Ziel bei der Betrachtung der Lebenszykluskosten ist, ob die anfänglichen nach aktueller Preislage höheren Investitionskosten beim Einsatz von neuartigen Bewehrungstypen im Lebenszyklus kompensiert werden können und somit in einer aktuellen Betrachtung ein ökonomisches Potential besteht. In AP2 wurden von Herstellern in Europa auch die Preisen Ihrer Produkte angefragt (Abschnitt 2.6). Diese Daten, wurden um eine Literaturrecherche [155], [156] erweitert und einige ausgewählte Firmen, erneut angeschrieben. Die Ergebnisse dieser Recherche sind in Tabelle 12 zusammengefasst und werden im Folgenden für die Lebenszykluskosten angesetzt. Es ist hier fest zu halten dass es sich momentan noch um einen vergleichweise kleinen Mark handelt. Es ist zu erwarten dass die Preise bei höheren Absatzmengen noch sinken werden.







Bewehrungsart	Preis für Stäbe [€/kg]	Preis für Gewebe/Matten [€/kg]
Stahl	1,2	1,2
Carbon	100	40
Glas	8	20
Basalt	6	20
Edelstahl	6	6

 Tabelle 12: Preistabelle f
 ür verschiedene Bewehrungstypen (beigestellt)

Einheitskosten für Beton mit nichtmetallischer Bewehrung (Bewehrungsbeton)

In wirtschaftlichen Berechnungen werden typischerweise Kostenansätzen für einen Kubikmeter [€/m³] oder per Wandfläche [€/m²] verbautem Stahlbeton angegeben. Diese Einheitspreise beinhalteten daher sowohl Lohn- als auch Materialanteil für Schalung, Bewehrung und Beton, als auch das notwendige Gerät für Transport und Einbau. Je nach Bauteil können die Kostenanteile variieren (z.B: aufgrund der Menge der Bewehrung, oder dem Schalungsaufwand je m³). In einer kürzlich durchgeführten Analyse zur Wirtschaftlichkeit von Fertigteilen aus Carbonbeton [155] wurden die Kostenunterschiede mit einer Stahlbetonvariante auf Einzelkostenebene (Material, Transport und Einbau) analysiert. Bei Doppel-T Trägern aus Stahlbeton wurde in etwa doppelte Kosten für das Bauteil mit gleicher Funktionalität in Bezug auf die Tragfähigkeit ermittelt. Mit größtem Anteil schlugen sich hierbei die Bewehrungskosten nieder (13-fache Kosten gegenüber Stahlbewehrung), wobei dieser Kostenpunkt dadurch 63 % der Gesamtkosten der Carbonvariante ausmacht (vgl. mit nur 7% bei der Stahlbetonvariante). Zugleich konnten beim Transport und Einbau aufgrund des geringeren Gewichts durch geringerer Betonkubaturen wieder Kostenvorteile lukriert werden (Halbierung der Transportkosten, 0.8-fache Einbaukosten), womit die Summe dieser Kosten bei der Carbonvariante lediglich 10 % der Gesamtkosten ausmachten. Alle anderen Einzelkosten waren ähnlich zur Stahlbetonvariante, außer die Lohnkosten für das Bewehren (ca. 3-fache Kosten). Hier muss aber davon ausgegangen werden, dass bei ausreichender Einarbeitung mit dem neuen Bewehrungsmaterial im Fertigteilwerk ziemlich bald zumindest Kostenparität erreicht werden kann. Aufgrund des geringeren Gewichts, eventuell sogar Kostenvorteile in der Verarbeitung. Es ist festzuhalten dass es sich hierbei um ein spezifisches Beispiel handelt und die Kosten bzw. der Konstenateil von der Geometrie, Funktion, Bewehrungsgrad etc. abhängen, wie in den nachfolgenden Beispielen (Brücke, Winkelstützmauer, Bahnsteigkante) ersichtlich ist.

Für die anschließenden Analysen wird daher lediglich der Bewehrungspreis als veränderte Eingangsgröße angesetzt. All die anderen Arbeitsschritte werden zu denselben







Kostenansätzen angenommen. Zusätzliche Kostenvorteile z.B. aus geringeren Betonkubaturen, können so nur in der Massenermittlung der analysierten Bauteile berücksichtigt werden.

Die zusätzlichen Kosten der Bewehrung für einen m³ Bewehrungsbeton können auf Basis der Vergleichsberechnungen (selben Bauteilabmessungen) der jeweiligen Bauteile in AP4 wie folgt ermittelt werden. Es wird ein Verhältnis ($\delta_{Bew} = \delta_{NMB} / \delta_{BST}$) zwischen dem notwendigen Bewehrungsquerschnitt [cm²/m] von der nichtmetallischen Bewehrung (δ_{NMB}) und der Stahlbewehrung (δ_{BST}) an der maßgebenden Stelle bestimmt. Über diesen Verhältniswert wird unter der Berücksichtigung der Bewehrungsdichten auf die notwendige Bewehrungsmasse der nichtmetallischen Bewehrung geschlossen.

$$m_{\rm NMB} = m_{\rm BST} \cdot \frac{\rho_{\rm NMB}}{\rho_{\rm BST}} \cdot \delta_{\rm Bew}$$

mit

 $\begin{array}{l} m_{\text{NMB}} \dots \text{ Erforderliche Masse an nichtmetallischer Bewehrung je Bezugseinheit [kg/EH]} \\ m_{\text{BST}} \dots \text{ Erforderliche Masse an Bewehrungsstahl je Bezugseinheit [kg/EH]} \\ \rho_{\text{BST}} \dots \text{ Dichte des Bewehrungsstahls (7.85 g/cm³)} \\ \rho_{\text{NMB}} \dots \text{ Dichte der nichtmetallischen Bewehrung} \\ \delta_{\text{Bew}} \dots \text{Verhältnis zwischen dem notwendigen Bewehrungsquerschnitt von der nichtmetallischen Bewehrung und der Stahlbewehrung \\ \end{array}$

Über die Kosten nach Tabelle 12 können anschließend die Kostenänderung der Einheitspreise aufgrund des Einsatzes nichtmetallischer Bewehrung gegenüber der Stahlbetonvariante bestimmt werden.

$$\Delta EP = m_{_{NMB}} \cdot k_{_{NMB}} - m_{_{BST}} \cdot k_{_{BST}} \text{ und } EP' = EP + \Delta EP$$

mit

ΔEP… Kostenänderung der Einheitspreise aufgrund des Einsatzes nichtmetallischer Bewehrung [€/EH]

EP... Einheitspreis für Stahlbeton [€/EH]

EP'...Angepasster Einheitspreis für nichtmetallische Bewehrungsbeton [€/EH]

(33)

 $m_{\text{NMB}} \dots \text{ Erforderliche Masse an nichtmetallischer Bewehrung je Bezugseinheit [kg/EH]}$

 $m_{\text{BST}} \dots \text{ Erforderliche Masse an Bewehrungsstahl je Bezugseinheit [kg/EH]}$

 $k_{\text{BST}}...$ Kosten des Bewehrungsstahls [€/kg] nach Tabelle 12

k_{NMB}... Kosten der nichtmetallischen Bewehrung [€/kg] nach Tabelle 12







Abbruch und Entsorgung (siehe AP6)

Wie in AP6 gezeigt werden konnte, können Betonkonstruktionen mit nichtmetallischer Bewehrung mit ähnlichem Gerät zerkleinert werden (siehe auch Versuche für Carbonbeton in AP6). Für Basalt und Glasfaser besteht die Möglichkeit einer Wiederverwertung des ausreichend zerkleinerten Abbruchmaterials als Füllkörper im Damm- und Wegebau (Downcycling). Deshalb werden die Kostensätze äquivalent zu jenen von Beton angenommen. Diese direkte Wiederverwertung ist beim Einsatz von Carbonfasern nicht möglich, ebenso wenig wie eine Deponierung. Hier muss das getrennte Bewehrungsmaterial weiterbearbeitet werden und die Matrix von der Faser getrennt werden. Die Verfahren werden in Abschnitt 7.1.3 beschrieben, wobei noch keine flächendeckende Recyclingstrategie für Carbonabfälle aufgrund der geringen Menge existiert. Auch die energetische Verwertung ist denkbar [157]. Beide Verfahren führen mitunter zu Mehrkosten (Müllverbennung ~200 €/t) in der Entsorgung, welche in den unten angeführten exemplarischen Beispielen nicht berücksichtigt wurden.

6.4. Straßenbrücke in Rahmenbauweise 15 m

Grundlagen

Die Berechnung der Lebenszykluskosten erfolgt auf Basis der RVS 13.05.11 [91]. Hier werden sowohl Einheitspreise für die Kosten für die Neuerrichtung von Unterbau, Überbau und Ausrüstung, als auch die Erhaltungszyklen und deren Kosten für die Betriebsphase der einzelnen Bauteile gegeben. Außerdem werden Abbruchkosten angegeben. All diese Kosten werden um 15 % Gemeinkostenzuschlag und 10 % Verwaltungskosten erhöht. Kosten für Entsorgung (Abfallbehandlung C3 und Deponierung C4, Stichwort Altlastensanierungsgesetz ALSAG [158]) sind hier nicht berücksichtigt und werden deshalb für den Großraum Wien auf Basis von aktuellen Preisen [159] mit 28.00 €/t Betonabbruch (>80 mm oder stark armiert) und 34,80 €/t Asphaltbruch (<10 % Beton) sowie den Transport für €10,90/t veranschlagt. Vereinfachend wird dieser Satz für STB stattdessen bei allen Varianten angenommen. Für Carbonbewehrung müsste dieser Satz mitunter angepasst werden.

Für die LZK-Ermittlung wird eine theoretische Nutzungsdauer von 100 Jahren für Straßenbrücken in der zugrunde gelegten RVS angesetzt. Während der Betriebsphase werden bauliche Instandhaltungseingriffe angenommen. Bei den Straßenbrücken erfolgt dies nach 20, 40, 60 und 80 Jahren. Dabei wird davon ausgegangen, dass am Tragwerk und Unterbau periodische Instandhaltungsmaßnahmen unterschiedlichen Umfangs erforderlich sein werden, während bei Ausrüstungsteilen (z.B. Fahrbahnübergänge, Lager, Randbalken) Instandhaltungs-bzw. Erneuerungsmaßnahmen (nach 40 bzw. 80 Jahren) vorgesehen sind.





Zusätzlich wird in der RVS ein durchschnittlicher jährlicher Betrag für jährliche betriebliche Erhaltungskosten von 2 €/m² bzw. Prüfkosten (gem. RVS13.03.ff) von 2 €/m² angesetzt. Der Abbruch wird mit €110/m² angesetzt.

Die in der RVS gelisteten Einheitspreise verstehen sich bezogen auf eine Preisbasis von 2015 (2015 = 100) und werden entsprechend dem Baukostenindex Brückenbau [152] für das Jahr 2020 (Ø 2020 bezogen auf Ø 2015 = 108) angepasst.

Zum Zeitpunkt der Erstellung der RVS wurde ein Prozentsatz $z_V = 2,5$ % zur Berücksichtigung der Preisgleitung angenommen (auf Basis eines langfristigen Mittelwertes für den Baupreisindex des Brückenbaus). Der Diskontierungssatz von 4 % wird bei allen Varianten variiert.

Planungsgrundlage

Die beispielhafte Brücke mit einem geraden Tragwerk mit den Abmessungen (Spannweite I = 15 m und Breite 9 m, Brückenfläche nach RVS: 16*9 = 144 m²) wurde mithilfe der Rahmenbrückennormalie RVS 15.02.31 [160] bemessen, um relevante Bauteilabmessungen und Bewehrungsquerschnitte zu erhalten. Es erfolgte keine Ermüdungsberechnung, da hier noch keine äquivalenten Vergleichsberechnungen mit den anderen Bewehrungen angestellt werden können. Die Ergebnisse der Berechnung sind in folgender Abbildung 36 zusammengefasst.



Abbildung 36: Berechnungsergebnisse einer Rahmenbrücke in Stahlbetonbauweise gemäß RVS 15.02.31 [160]

Zusätzlich wurden noch Kubaturen für die Flügelmauern, ermittelt, wobei hier die Dicke entsprechend der Widerlagerwand gewählt wurde und eine Böschung von 2:3 angenommen. Die ermittelten Mengen auf Basis dieser Kalkulation inklusive der Ausrüstungsteile werden in Abbildung 37 und Abbildung 38 zusammengefasst.







E1 Inventar Errichtung							
Auswahl	Spezifizierung	Menge	Einheit	Alterung	Kommentar		
Unterbau							
	Pfeiler / Stützen (Beton einschließlich Bewehrung)	121.0	m³	Pfeiler, Widerlager, Flügel	(mit Taumittelangriff)		
	Flachgründung (einschließlich Erdbau)	229.7	m³	Gründung			
	Widerlager (Beton einschließlich Bewehrung, Füllbeton, Filterbeton)	168	m ³	Pfeiler, Widerlager, Flügel	(mit Taumittelangriff)		
	keine		0	Gründung			
	Böschungspflaster	48	m²	Gründung			
	keine		0	keine			
Überbau							
	keine		0	keine			
	STB Platten QS	121.0	m ³	Stahlbeton			
	keine		0	keine			
	keine		0	keine			
	keine		0	keine			
	keine		0	keine			
	keine		0	keine			
Ausrüstung							
	keine		0	keine			
	keine		0	keine			
	Belag Straße hochrangig (mittlere Belagsdicke 20 cm)	112	m²	Fahrbahnbelag Deck- und	Tragschicht Asphalt einscl		
	Abdichtung	144	m²	Abdichtung			
	Entwässerung (einschließlich Einläufe, Zuleitung, Gerüstung)	66	m	Kunststoff			
	Randbalken (Breite i.M. 1,25 m, einschließlich Oberflächenbehandlung,						
	Dübelleiste, Leerrohre, und Bewehrung)	40	m	Randbalken Freiland			
	Fahrzeugrückhaltesystem, Aufhaltestufe H3	40	m	Fahrzeugrückhaltesystem			
	Geländer (duplex, einschließlich Spritzschutz)	80	m	Edelstahl			
	keine		0	keine	v		

Abbildung 37: Massenermittlung für die Errichtung und zugrunde gelegte Alterungsmodelle für die Lebenszykluskostenanalyse

B1 Inventar Betrieb								
Auswahl	Spezifizierung	Menge	Einheit		Kommentar			
Unterbau								
	Pfeiler / Stützen (Beton einschließlich Bewehrung)	144	m²					
	Flachgründung (einschließlich Erdbau)		-					
	Widerlager (Beton einschließlich Bewehrung, Füllbeton, Filterbeton)	192	m²					
	keine		-					
	Böschungspflaster		-]				
	keine		-					
Überbau								
	keine		-					
	STB Platten QS	127.4	m²					
	keine		-					
	keine		-					
	keine		-	1				
	keine		-					
	keine		-					
Ausrüstung								
	keine	ahlmenge eingeb	-					
	keine	ahlmenge eingeb	-					
	Belag Straße hochrangig (mittlere Belagsdicke 20 cm)	112	m²					
	Abdichtung	144	m²	1				
	Entwässerung (einschließlich Einläufe, Zuleitung, Gerüstung)	66	m					
	Randbalken (Breite i.M. 1,25 m, einschließlich Oberflächenbehandlung,							
	Dübelleiste, Leerrohre, und Bewehrung)	40	m					
	Fahrzeugrückhaltesystem, Aufhaltestufe H3	40	m					
	Geländer (duplex, einschließlich Spritzschutz)	80	m					
	keine	ahlmenge eingeb	-					

Abbildung 38: Massenermittlung für die Betriebsphase für die Lebenszykluskostenanalyse

Errichtungskosten

Als Preise für die Stahlbetonvariante werden die über den BKI angepassten Einheitspreise gemäß RVS angesetzt. Für die nichtmetallischen Varianten werden für Pfeiler (im Beispiel die Widerlagerwand), Widerlager (im Beispiel die Flügelmauern) und dem Tragwerk als Plattenquerschnitt die Kosten gemäß den Formeln (33) und (32) angepasst. Aufgrund des unterschiedlichen Aufwands für Schalung, Betonage und Bewehrung sind für die Bauteile





jeweils unterschiedliche Preise anzusetzen. Für Pfeiler und Tragwerk wird eine notwendige Stahlbewehrungsgehalt von 90 kg/m³ sowie beim Flügel von 40 kg/m³ angenommen. Das eventuell vorhandene Potential einer Optimierung der Betonkubatur nach GWP oder Kosten – wie z.B. in AP4 ersichtlich - wird in diesen Berechnungen nicht berücksichtigt. Das hat folgende Gründe:

- Komplexität der Summe aller Nachweise (Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit, Geotechnik) nicht vollständig abgebildet
- vereinfachte Modellierung vom System, Vernachlässigung der Bettung
- Bessere Vergleichbarkeit der Varianten

Außerdem wurde das Potential einer Querschnittsoptimierung bei der Verwendung von nichtmetallischer Bewehrung nicht untersucht.

So wird bei allen Varianten von einer konstanten Platten- und Widerlagerwandstärke von 84 cm ausgegangen. Mit den zuvor genannten Überlegungen ergeben sich folgende Errichtungskosten für die unterschiedlichen Varianten.

	Stahl	Carbon (Textil)	Carbon (Stäbe)	Glas (Stäbe)	Basalt (Stäbe)	Stahl nichtros- tend
Dichte des Produkts (ggf, Stab+Matrix) [g/cm³]	7,85	1,70	1,50	2,10	2,10	7,85
Erf, Bewehrungsfläche in Bezug auf STB-Variante (max, Stelle AP4)	100 %	75,4 %	75,4 %	160,7 %	168,7 %	100 %
Notwendige Menge [kg/m³]	90	13,0	113,0	38,7	40,6	90
€/m³ - Bewehrungsbeton für Brücke (Tragwerk)	432 (100 %)	843 (195 %)	1621 (375 %)	634 (147 %)	568 (131%)	864 (200 %)
Neubaukosten der Brü- cke [€/m²]	2814 (100 %)	3943 (140 %)	6081 (216 %)	3368 (120 %)	3187 (113 %)	4001 (142 %)

Tabelle 13: Errichtungskosten der Brücke mit unterschiedlichen Bewehrungsvarianten.

Wie in Tabelle **13** ersichtlich ist, entstehen durch den Einsatz nichtmetallischer anfängliche Mehrkosten in unterschiedlicher Größenordnung. Folgende Aussagen lassen sich dazu treffen



- **Carbon:** Die Carbonbetonvariante ist in der Stabvariante in der Errichtung ungefähr doppelt so teuer wie die STB-Variante. Es wurde weiters eine hypothetische Variante mit dem Preis einer textilen Bewehrung durchgerechnet, unter der Annahme, dass der hohe Preis für die Stäbe von dem relativ neuen Material sich in naher Zukunft an den Textilpreis annähert. Auch hier würde man dennoch von 40 % Mehrkosten ausgehen müssen.
- **Glas/Basalt:** Der Einsatz von Glas und Basaltstäben resultiert in 13-20 % Mehrkosten in der Errichtung. Dieses könnte durch eine günstigere Erhaltung oder längeren Nutzungsdauer bereits kompensiert werden.
- Nichtrostender Stahl: Die Variante nichtrostender Stahl liefert 42 % Mehrkosten in der Errichtung. Es muss daher davon ausgegangen werden, dass bei einem flächendeckenden Einsatz, die Mehrkosten zu Beginn nicht kompensiert werden können.

Lebenszykluskosten

Es wird davon ausgegangen, dass im Gegensatz zur Stahlbetonvariante keinerlei Betoninstandsetzungen bei Flügel, Tragwerk und Widerlagermauer bei den nichtmetallischen Varianten mehr anfallen (= Maximalszenario). Die Nutzungsdauer wird identisch mit 100 Jahren angenommen. Verglichen wird der Barwert am Ende des Betrachtungszeitraums.

Tabelle 14: Lebenszykluskosten der Brücke mit unterschiedlichen Bewehrungsvarianten	mit dem Zins-
niveau laut RVS.	

	Stahl	Carbon (Textil)	Carbon (Stäbe)	Glas (Stäbe)	Basalt (Stäbe)	Stahl nichtros- tend
Barwert der Brücke	3991,7	4855,8	6993,9	4281	4101	4914
[€/m²]	(100 %)	(122 %)	(175 %)	(107 %)	(103 %)	(123%)





Abbildung 39: Lebenszykluskosten mit der Barwertmethode (Nutzungsdauer 100 Jahre, Preisgleitung 2.5 % und Diskontierungssatz 4 %)

Da das Einsparungspotential bei allen Varianten gleich angenommen wird, zeigt sich dasselbe Bild wie bei den Errichtungskosten in Tabelle **13**, wobei die Basalt- bzw. Glasvariante über den Lebenszyklus betrachtet schon ähnliche Größenordnungen wie die Stahlbetonvariante aufweisen. Die Höhe des Diskontierungszinssatz birgt bei so langfristigen Betrachtungen eine große Unsicherheit und wird daher zwischen 2 und 6 Prozent variiert. Die Ergebnisse werden in folgender Abbildung 40 normiert auf die Stahlbetonvariante dargestellt.



Abbildung 40: Kostenvergleich nach Barwertmethode für verschiedene Diskontierungszinssätze

Auch hier zeigt sich, dass bei einem geringfügig niedrigeren Zinsniveau bereits Kostenvorteile bei der Basalt- bzw. Glasfaserbewehrungsvariante ersichtlich sind. Bezugnehmend auf die





Kalkulationen in AP4, würde in beiden Fällen das Einsparpotential des Global Warming Potentials für eine Alternativvariante sprechen.

Szenario 1: Veränderung der Nutzungsdauer (+20 %)

Es wird angenommen, dass sich die technische Nutzungsdauer des Tragwerks und des Unterbaus beim Einsatz von nichtrostender Bewehrung auf 120 Jahre erhöht. Ein zusätzlicher Instandsetzungsintervall für Fahrbahn, Abdichtung, Rückhaltesystem und Randbalken entfällt, da die Nutzungsdauer dieser Bauteile von 40 Jahren genau erreicht wird. Es wird wiederum davon ausgegangen, dass keinerlei Betoninstandsetzungen bei Flügel, Tragwerk und Widerlagermauer bei den nichtmetallischen Varianten mehr anfallen.

Um den Vergleich der Lebenszykluskosten mit der Variante Stahlbeton (Nutzungsdauer 100 Jahre) zu ermöglichen, müssen die Kosten des Neubaus der Stahlbetonbrücke nach 100 Jahren berücksichtigt und der Restwert derselben Brücke nach weiteren 20 Jahren bestimmt werden.

Der Restwert der Stahlbetonbrücke wird mit folgenden Nutzungsdauern (Tabelle 15) und der Formel (31) ermittelt. Die Restwerte am Ende der Betrachtungsdauer werden wieder auf den heutigen Zeitpunkt mit Hilfe von Barwerten bezogen. Auch hier hat der Zinssatz einen großen Einfluss auf das Ergebnis

Bauteil	Nutzungsdauer [a]	Errichtungskosten [€/m²]
Unterbau	100	1765 (63 %)
Überbau	100	454 (16 %)
Ausrüstung	40	596 (21 %)
Summe	-	2814 (100 %)

Tabelle 15: Nutzungsdauer zur Ermittlung vom Restwert

Exemplarisch werden die Ergebnisse von der Glasfaservariante anhand Abbildung 41 erläutert, welche in ähnlicher Weise auch bei Basaltfaserbewehrung zutreffen.









Abbildung 41: Kostenvergleich einer Glasfaserbrücke (ND 120 Jahre) und einer Stahlbetonbrücke (ND 100 Jahre); Preisgleitung 2,5 %; Diskontierungszinssatz 4 %

Die strichlierte Linie kennzeichnet den um den Restwert der nach 100 Jahre neugebauten Stahlbetonbrücke verminderten Barwert aus heutiger Sicht. Im Betrachtungszeitraum von 120 Jahren kann somit gezeigt werden, dass der Einsatz von Glas- oder Basaltbewehrung unter dem heute zugrunde gelegten Zinsniveau und den eingangs erwähnten Randbedingungen sich auszahlen würde.

Auch hier wird wiederum das Zinsniveau variiert und eine zweite Variante im Kostenniveau Carbongewebe/nichtrostender Stahl untersucht.



Abbildung 42: Kostenvergleich nach Barwertmethode für verschiedene Diskontierungszinssätze und unterschiedliche Nutzungsdauern









Abbildung 43: Kostenvergleich nach Annuitätenmethode für verschiedene Diskontierungszinssätze und unterschiedliche Nutzungsdauern

Im Falle der Erhöhung der Nutzungsdauer um 20 % und einem verminderten Diskontierungssatz (3 %) kann gegenüber der Stahlbetonvariante auch bei der teureren Variante aus nichtrostendem Stahl bzw. bei der hypothetische Carbonvariante (Annahme des Preises der Textilen Bewehrung anstatt Stabpreis, gleiche Kosten für Entsorgung) ein Einsparungspotential bestehen (Abbildung *42*).

Bei der Annuitätenbetrachtung (Abbildung 43) kann zumindest von einer Kostenparität bei vermindertem Zinsniveau bei der Glas-/Basaltfaservariante ausgegangen werden.

6.5. Winkelstützmauer

Grundlagen

Die Berechnung der Lebenszykluskosten erfolgt auf Basis dem Asset Managment Handbuch Geankerte und nicht geankerte Stützbauwerke der Asfinag [161]. Hier werden Einheitspreise für die Kosten für die Erneuerung der Stützbauwerke und Anker, als auch die Erhaltungszyklen und deren Kosten für die Betriebsphase der einzelnen Bauteile gegeben.

Es wird angenommen, dass in den Kostensätzen für Erneuerung des Stützbauwerks bereits Abbruch und Entsorgung enthalten sind und diese 20 % der Erneuerungssumme ausmachen. Für Carbonbewehrung müsste dieser Satz angepasst werden. All diese Kosten werden um 15 % Gemeinkostenzuschlag und 10 % Verwaltungskosten erhöht.





Für die LZK-Ermittlung wird eine theoretische Nutzungsdauer von 70 Jahren auf Basis von [161] angesetzt. Während der Betriebsphase werden bauliche Instandhaltungseingriffe angenommen. Dies erfolgt nach 30 bzw. 50 Jahren. Unter Instandhaltungseingriffe werden folgende Punkte verstanden:

- Der Ersatz einzelner Bauteile (Erneuerung von Randbalken, Ausrüstung, Ersatz einzelne Anker)
- Betoninstandsetzungen

Zusätzlich wird ein durchschnittlicher jährlicher Betrag für jährliche betriebliche Erhaltungskosten von 2 €/m² bzw. Prüfkosten im Intervall von 12 Jahren von 3 €/m² angesetzt.

Die in dem Asset Management Handbuch gelisteten Einheitspreise verstehen sich bezogen auf eine Preisbasis von 2018 (2018 = 100) und werden entsprechend dem Baukostenindex Brückenbau für das Jahr 2020 (\emptyset 2020 bezogen auf \emptyset 2018 = 100) angepasst.

Es wird ebenfalls ein Prozentsatz $z_V = 2,5 \%$ zur Berücksichtigung der Preisgleitung angenommen (auf Basis eines langfristigen Mittelwertes für den Baupreisindex des Brückenbaus). Der Diskontierungssatz von 4 % wird bei allen Varianten variiert.

Planungsgrundlage

Eine vollwertige Bemessung einer 6,2 m-hohen Winkelstützmauer wurde in [162] durchgeführt (Abbildung 44). Dieses Beispiel wird herangezogen, um Bauteilmassen für Beton und Bewehrung je Laufmeter zu erhalten.



Abbildung 44: Beispiel zur Bemessung einer Winkelstützmauer nach [162]





Die Bewehrungsmasse konnte mit 290,7 kg/lfm ermittelt werden. Bezogen auf die 5 m³/lfm Betonkubatur ergibt dies einen Bewehrungsgehalt je Laufmeter (lfm) von 58,1 kg/m³.

Die anfallenden Einheitskosten einer Stützmauer wird typischerweise mit der Bezugseinheit €/m²-Wand kalkuliert, also nicht mit Kubikmeterpreisen. Deshalb werden Kennwerte für die gegebene Stützmauer über einen Faktor (Betonkubator/Ansichtsfläche) auf die Wandfläche bezogen. Der Faktor ergibt sich zu 5.0/6.2 ≈ 0.81 m (Abbildung 25), womit sich ein Bewehrungsgehalt von 46,9 kg/m²-Wand am Laufmeter ergibt.

Errichtungskosten

Als Preise für die Stahlbetonvariante werden die über den BKI angepassten Einheitspreise laut Asset Management Handbuch angesetzt zuzüglich den oben erwähnten Zusatzpositionen für Entsorgung, Prüfung/Kontrolle. Für die nichtmetallischen Varianten werden die Kosten der Widerlagerwand gemäß den Formeln (33) und (32) angepasst. Das eventuell vorhandene Potential einer Optimierung der Betonkubatur nach GWP oder Kosten – wie z.B. in AP4 ersichtlich - wird in diesen Berechnungen nicht berücksichtigt. Das hat folgende Gründe:

- Komplexität der Summe aller Nachweise (Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit, Geotechnik) nicht vollständig abgebildet
- vereinfachte Modellierung vom System (Kragarm)
- Bessere Vergleichbarkeit der Varianten

So wird bei allen Varianten von einer konstanten Betonkubatur ausgegangen. Mit diesen Überlegungen ergeben sich folgende Errichtungskosten für die unterschiedlichen Varianten.

	Stahl	Carbon (Textil)	Carbon (Stäbe)	Glas (Stäbe)	Basalt (Stäbe)	Stahl nichtros- tend
Dichte des Produkts (ggf. Stab+Matrix) [g/cm³]	7,85	1,50	1,50	2,10	2,10	7,85
Erf. Bewehrungsfläche in Bezug auf STB-Variante (max. Stelle AP4)	100 %	49,4 %	49,4 %	125,6 %	125,6 %	100 %
Notwendige Menge [kg/m³]	46,9	4,42	4,42	15,76	15,76	90
Erneuerung der Winkel- stützwand [€/m²]	600 (100 %)	720,7 (120 %)	986,2 (140 %)	669,8 (112 %)	638,3 (106 %)	825,1 (138 %)

Tabelle 16: Erneuerungskosten einer Winkelstützmauer mit unterschiedlichen Bewehrungsvarianten.

102

[NIMETBEW]







Wie in Tabelle **13** ersichtlich ist, entstehen durch den Einsatz nichtmetallischer Bewehrung anfängliche Mehrkosten in unterschiedlicher Größenordnung. Generell sind die Bandbreiten kleiner als beim Brückenbau. Folgende Aussagen lassen sich dazu treffen:

- **Carbon/nichtrostender Stahl:** Die Carbonbetonvariante ist in der Stabvariante ungefähr 40 % teurer in der Errichtung wie die STB-Variante. Es wurde weiters eine hypothetische Variante mit textiler Bewehrung durchgerechnet, unter der Annahme, dass der hohe Preis für die Stäbe von dem relativ neuen Material sich in naher Zukunft an den Preis der textilen Bewehrung annähert. Auch hier würde man dennoch von 20 % Mehrkosten ausgehen müssen.
- **Glas/Basalt:** Der Einsatz von Glas und Basaltstäben resultiert in 6-12 % Mehrkosten in der Errichtung. Dieses könnte mitunter durch eine günstigere Erhaltung oder längeren Nutzungsdauer bereits kompensiert werden.

Lebenszykluskosten

Es wird davon ausgegangen, dass im Gegensatz zur Stahlbetonvariante die Sanierungskosten bei den nichtmetallischen Varianten auf 30 % gesenkt werden können. Die Nutzungsdauer wird identisch mit 70 Jahren angenommen. Verglichen wird der Barwert am Ende des Betrachtungszeitraums.

Tabelle 17: Lebensz	zykluskosten der Winke	elstützmauer mit u	nterschiedlichen Be	ewehrungsvarianten
mit dem Zinsniveau	laut RVS.			

	Stahl	Carbon (Textil)	Carbon (Stäbe)	Glas (Stäbe)	Basalt (Stäbe)	Stahl nicht- rostend
Barwert der Stütz-	828,3	910,5	1200,0	855,0	820,6	1024,3
mauer [€/m²]	(100 %)	(110 %)	(145 %)	(103 %)	(99 %)	(124 %)









Abbildung 45: Lebenszykluskosten mit der Barwertmethode (Nutzungsdauer 70 Jahre, Preisgleitung 2.5 % und Diskontierungssatz 4 %)

Da das Einsparungspotential bei allen Varianten gleich angenommen wird, zeigt sich dasselbe Bild wie bei den Errichtungskosten in Tabelle 13, wobei die Basalt- bzw. Glasvariante über den Lebenszyklus betrachtet schon ähnliche Größenordnungen wie die Stahlbetonvariante aufweisen.

Die Höhe des Diskontierungszinssatz birgt bei so langfristigen Betrachtungen eine große Unsicherheit und wird daher zwischen 2 und 6 Prozent variiert. Die Ergebnisse werden in folgenden Abbildungen normiert auf die Stahlbetonvariante dargestellt.



Abbildung 46: Kostenvergleich nach Barwertmethode für verschiedene Diskontierungszinssätze

Die Variation der Zinssätze führt nur zu geringfügigen Änderungen beim Betrachtungszeitraum von 70 Jahren. Bezugnehmend auf die Kalkulationen in AP4, würde bei Kostenparität der Variante Glas- oder Basaltfaserbewehrung mit der Stahlbetonvariante das Einsparpotential des Global Warming Potentials für eine Alternativvariante sprechen.







Szenario 1: Veränderung der Nutzungsdauer (+20 %)

Es wird angenommen, dass sich die technische Nutzungsdauer der Winkelstützwand beim Einsatz von nichtrostender Bewehrung auf 85 Jahre erhöht. Die zweite Sanierung wird erst nach 60 Jahren (anstelle von 50) durchgeführt. Es wird wiederum davon ausgegangen, dass die Sanierungskosten bei den nichtmetallischen Varianten auf 30 % gesenkt werden können.

Um den Vergleich der Lebenszykluskosten mit der Variante Stahlbeton (Nutzungsdauer 70 Jahre) zu ermöglichen, müssen die Kosten der Neuerrichtung nach 70 Jahren berücksichtigt und der Restwert derselben Winkelstützmauer nach weiteren 15 Jahren bestimmt werden.

Der Restwert der Winkelstützmauer wird mit einer zugrunde gelegten Nutzungsdauer von 70 Jahren und der Formel (31) ermittelt. Die Restwerte am Ende der Betrachtungsdauer werden wieder auf den heutigen Zeitpunkt mit Hilfe von Barwerten bezogen. Auch hier hat der Zinssatz einen großen Einfluss auf das Ergebnis.

Exemplarisch werden die Ergebnisse von der Glasfaservariante anhand Abbildung 47 erläutert, welche in ähnlicher Weise auch bei Basaltfaserbewehrung zutreffen.



Abbildung 47: Kostenvergleich einer Variante mit Glasfaserbewehrung (ND 85 Jahre) und einer Betonstahl (ND 70 Jahre); Preisgleitung 2,5 %; Diskontierungszinssatz 4 %

Die strichlierte Linie kennzeichnet den um den Restwert der nach 70 Jahre neugebauten Winkelstützmauer verminderten Barwert aus heutiger Sicht. Im Betrachtungszeitraum von 85 Jahren kann somit gezeigt werden, dass der Einsatz von Glas- oder Basaltbewehrung unter dem heute zugrunde gelegten Zinsniveau sich auszahlen würde.







Auch hier wird wiederum das Zinsniveau variiert und eine zweite Variante im Kostenniveau Nichtrostender Stahl (preislich zwischen Carbonstäben und -geweben) untersucht.



Abbildung 48: Kostenvergleich nach Barwertmethode für verschiedene Diskontierungszinssätze und unterschiedliche Nutzungsdauern



Abbildung 49: Kostenvergleich nach Annuitätenmethode für verschiedene Diskontierungszinssätze und unterschiedliche Nutzungsdauern

Im Falle der Erhöhung der Nutzungsdauer um 20 % kann bei der Variante Basalt/Glas schon bei dem aktuellen Preisniveau von einem Einsparpotential ausgegangen werden (Abbildung 48). Selbiges gilt bei der Variante Stahl nichtrostend, sofern der Diskontierungssatz auf gleichem Niveau bleibt oder sinkt.







Bei der Annuitätenbetrachtung (Abbildung 49) kann zumindest von einer Kostenparität bei der Glas-/Basaltfaservariante bei verschiedernen Zinsniveaus ausgegangen werden.

6.6. Bahnsteigkante

Grundlagen

Die Grundlage für die Bestimmung von Lebenszykluskosten liefert eine im Jahr 2009 durchgeführte Studie [163], welche die Ansätze für die konventionellen Bauweise eines Bahnsteigs liefert.

Hier wurden für die Einheitskosten für die Erneuerung verschiedener Bahnsteigtopologien ermittelt. Die Kosten gliedern sich in: Allgemeines/Vorarbeiten, Bahnsteig/Bahnsteigkante; Entwässerung, Kanal und Unterbau/Gleiskörper. Auch Kosten für den Abtransport/Entsorgung sind berücksichtigt, wobei diese Werte im Falle von Carbon anzupassen sind. Im untersuchten Fall wird ein Mittelbahnsteig mit 160 Metern Länge und einer Breite von 6.07 m betrachtet.

Für die LZK-Ermittlung wird eine theoretische Nutzungsdauer von 40 Jahren auf Basis von [163] angesetzt. Während der Betriebsphase werden keine baulichen Instandhaltungseingriffe angenommen. Lediglich ein durchschnittlicher jährlicher Betrag für jährliche betriebliche Erhaltungskosten von 1.63 €/m² werden angesetzt.

Die in [163] gelisteten Einheitspreise verstehen sich bezogen auf eine Preisbasis von 2009 und werden entsprechend dem Baukostenindex Brückenbau für das Jahr 2020 (Durchschnittlich auf 114 %) angepasst. Die Preisgleitung wird vernachlässigt. Der Diskontierungssatz von 4 % wird bei allen Varianten variiert.

Planungsgrundlage

Die Bestimmung der Bewehrungsmenge und der Betonkubator erfolgt gemäß der Regelplanung ÖBB. Die Bewehrungsmasse kann demnach mit 19,6 kg/lfm ermittelt werden. Bezogen auf die 0,21 m³/lfm Betonkubatur ergibt dies einen Bewehrungsgehalt je Laufmeter (lfm) von 94,7 kg/m³.



Abbildung 50: Mittelbahnsteig mit konventioneller Bahnsteigkante UB5 nach ÖBB Regeplanung

Errichtungskosten

Als Preise für die Stahlbetonvariante werden die über den BKI angepassten Einheitspreise laut [163] angenommen. Für die nichtmetallischen Varianten werden die Kosten der Widerlagerwand gemäß den Formeln (33) und (32) angepasst. Das eventuell vorhandene Potential einer Optimierung der Betonkubatur nach GWP oder Kosten – wie z.B. in AP4 ersichtlich - wird in diesen Berechnungen nicht berücksichtigt. Das hat folgende Gründe:

- Komplexität der Summe aller Nachweise (Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit, Geotechnik, Zwang) nicht vollständig abgebildet
- vereinfachte Modellierung vom System (Kragarm)
- Bessere Vergleichbarkeit der Varianten

So wird bei allen Varianten von einer konstanten Betonkubatur ausgegangen. Mit diesen Überlegungen ergeben sich folgende Errichtungskosten für die unterschiedlichen Varianten.

	Stahl	Carbon (Textil)	Carbon (Stäbe)	Glas (Stäbe)	Basalt (Stäbe)	Stahl nichtros- tend
Dichte des Produkts (ggf. Stab+Matrix) [g/cm³]	7,85	1,50	1,50	2,10	2,10	7,85
Erf. Bewehrungsfläche in Bezug auf STB-Variante (max. Stelle AP4)	100%	32,0%	32,0%	100%	125,6%	84%

Tabelle 18: Erneuerungskosten	eines Mittelbahnsteiges mit unterschiedlichen	Bewehrungsvarianten.
- J	J	5




Notwendige Menge [kg/m³]	19,6	1,20	1,2	5,2	4,4	19,6
Erneuerung des Bahn-	528,4	536,4	560,1	534,4	529,3	559,4
steigs [€/m²]	(100%)	(102%)	(106%)	(101%)	(100%)	(106%)

Wie in Tabelle **13** ersichtlich ist, entstehen durch den Einsatz nichtmetallischer Bewehrung nur geringfügige anfängliche Mehrkosten. Die Fertigteilbahnsteigkante macht lediglich rund 12 % der Erneuerungskosten aus. Folgende Aussagen lassen sich dazu treffen:

- **Carbonstäbe/nichtrostender Stahl:** Die Carbonbetonvariante ist in der Stabvariante ungefähr 6 % teurer wie die Stb-Variante und im selben Bereich, wie eine Variante aus nichtrostendem Stahl. Es wäre vorstellbar, bei den erforderlichen Bewehrungsflächen mit textiler Bewehrung auszuführen. Die Kosten für die textile Bewehrung schlagen sich nur geringfügig auf die Gesamtkosten nieder.
- **Glas/Basalt:** Der Bahnsteig kann beim Einsatz von Glas- und Basaltstäben zu ähnlichen Kosten erneuert werden.

Lebenszyklus

Da während des planmäßigen Lebenszyklus von 40 Jahren keine größeren Instandsetzungsarbeiten anfallen, erfolgt der Kostenvergleich über die Annuitätenmethode (vgl. auch bei [163]). Es wird davon ausgegangen, dass die Nutzungsdauer beim Einsatz von nichtmetallischer Bewehrung erhöht werden kann.



Abbildung 51: Kostenvergleich nach Annuitätenmethode für verschiedene Diskontierungszinssätze und einer Erhöhung der Nutzungsdauer





Eine Erhöhung der Nutzungsdauer (+25 % bzw. +50 %) führt bei allen Varianten zu einer Verminderung der Annuitäten. Die Größenordnung ist abhängig vom Zinsniveau und liegt bei einem Zinssatz von 4 % bei der Carbonstabvariante zwischen -2 bis -7 % und bei der Basalt/Glas/Carbongewebevariante bei -6 bis -10 %. Bei fallendem Zinsniveau währen diese Werte entsprechend höher.

6.7. Abschließendes Fazit und Abgrenzung

In der vorliegenden Studie wurde das Potential des Einsatzes von nichtmetallischer Bewehrung analysiert. Dies geschieht auf Basis von der Ermittlung von Lebenszykluskosten von verschiedenen großen Bauteilen. Es wurden Szenarien untersucht, in welchen Instandsetzungsarbeiten am Beton durch die Verwendung von nichtmetallischer Bewehrung reduziert und eine Erhöhung der Nutzungsdauer durch die Korrosionsbeständigkeit ermöglicht wurde. Die Gültigkeit solcher Szenarien muss erst an Langzeitversuchen und realisierten Bauteilen verifiziert werden. Außerdem erfolgte keine Optimierung der Bauteile hinsichtlich der Betonkubatur, welche zu einer Verringerung der Errichtungskosten führen könnte. Weiters ist anzumerken dass nichtmetallische Bewehrung momentan nur in geringen Mengen produziert wird und dass von einer Preisreduktion von größeren Mengen auszugehen ist. Für die LZK Berechnungen wurden aktuelle Preise deutscher Hersteller als repräsentative Preise für den österreichischen Markt verwendet. Zudem kann zurzeit keine treffende Abschätzung der Kosten zum Recycling von Carbonbewehrung getroffen werden, welche gesondert zu untersuchen sind.

Folgende Schlüsse können gezogen werden:

- Bei großen Bauteilen, bei welchem die Betonarbeiten einen Großteil der Errichtungskosten ausmachen (z.B: Rahmenbrücke) ist aufgrund des hohen Kostenniveaus von nichtmetallischer nur im Falle einer Erhöhung der Nutzungsdauer bei gleichzeitig entfallenden Betoninstandsetzungskosten ein Kostenvorteil beim Einsatz von Glasfaser- oder Basaltfaserbewehrung zu erwarten.
- Bei mittelgroßen Bauteilen, bei welchen die Betonarbeiten neben z.B. Erdarbeiten einen geringeren Anteil der Errichtungskosten ausmachen (z.B. Winkelstützmauern) ist aufgrund geringere Betoninstandsetzung zumindest Kostenparität beim Einsatz von Glasfaser- oder Basaltfaserbewehrung zu erwarten. Eine Erhöhung der







Nutzungsdauer z.B. aufgrund von entfallenden schwer inspizierbaren Bewehrungslagen (Rückwand), könnte ebenso zu Kostenvorteilen führen.

 Bei kleinen Fertigteilen (z.B. Bahnsteigkante), deren Kosten eine untergeordnete Rolle in Bezug auf die Errichtungskosten des Bauwerks spielen, aber mitunter die Lebensdauer des Bauwerks bestimmen, kann ein Einsatz von nichtmetallischer Bewehrung (alle Varianten) empfohlen werden.





7. RECYCLING VON NICHTMETALLISCH BEWEHRTEN BAUTEILEN

7.1. Literaturstudie

Recycling ist eine Maßnahme zur stofflichen Verwertung oder Nutzung eines vorhandenen Abfalles nach der Stoffumwandlung. Es wird, wie aus Abbildung 52 ersichtlich, als Teil der Kreislaufwirtschaft angesehen. Die Abfallrahmenrichtlinie [164], die am 12.12.2008 in Kraft trat, soll durch die vermehrte Erfassung und Verwertung von Abfällen die Europäischen Union dem Ziel einer "Recycling-Gesellschaft" näherbringen. Das Gesetz schreibt eine Hierarchie zur Abfallbehandlung vor, wobei sich Recycling an dritter Stelle befindet. Durch den vermehrten Einsatz von nichtmetallischer Bewehrung im Bauwesen ist eine Untersuchung des Recyclingprozesses in diesem Zusammenhang unumgänglich.



Abbildung 52: Teilschritte der Kreislaufwirtschaft laut [165]

Der Begriff Recycling im Zusammenhang mit Baustoffen beinhaltet mehrere Tätigkeiten: (1) Sammlung verwertbarer Stoffe, (2) Vorbehandlung zur Wiederverwertung, (3) Stoffliche Aufbereitung, und (4) Verwendung der Sekundärrohstoffe für die Herstellung von einem neuen Produkt [166]. Im Zuge der Abbrucharbeiten anfallende Stoffe sollen im Rahmen des Recyclings mit gleichen Materialeigenschaften wiederverwertet werden. Besteht nicht die Möglichkeit einer schadenfreien Demontage so ist eine Verwertung auf stofflicher Ebene das Ziel. Entscheidend hierfür ist die Zerkleinerung der Baustoffe, die Aufbereitung des Materials und die anschließende sortenspezifische Trennung [167]. Werden die ursprünglichen Materialeigenschaften oder ist eine Verarbeitbarkeit der Grundstoffe nicht möglich, so handelt es sich um Downcycling. Im Gegensatz zu Downcycling steht das Upcycling, indem eine Aufwertung des Ausgangsstoffes erreicht wird [168].







Der Verlauf des Recyclingprozesses für Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung (unterschiedenen in BFRP, GFRP und CFRP) kann Abbildung 53 entnommen werden und gliedert sich in vier Prozessschritte: Abbruch, Sortierung, Aufbereitung und Wiederverwertung. Im Zuge der nachfolgenden Unterkapitel werden die einzelnen Prozessschritte genauer untersucht gefolgt von einer Zusammenfassung der rechtlichen Regelungen und Normen.



Abbildung 53: Schematische Darstellung des Recyclingprozesses für BFRP-, GFRP- und CFRP-bewehrte Betonbauteile. Kennzeichnung der zwei Recyclingszenarien wie auch der unterschiedlichen Prozessschritte für das Recycling von Betonbauteilen mit nichtmetallischer Bewehrung. Mögliche Verwertung der aufbereiteten Produkte.

7.1.1 Abbruch

Mehrere wissenschaftliche Arbeiten [157], [169]–[171], die sich mit dem Abbruch und Zerkleinerung von Betonbauteilen mit nichtmetallischer Bewehrung befassen zeigen, dass dieser Prozessschritt sich nur wenig von dem Abbruch von regulär bewehrten Betonbauteilen unter-







scheidet. Der Abbruch kann sogar als einfacher eingestuft werden, da sich die Bewehrungselemente viel leichter zerteilen lassen als Stahlbewehrung. Jegliche Abbruchmethoden für Stahlbetonbauwerke können somit auch für den Abbruch von nichtmetallisch bewehrten Bauteilen herangezogen werden. Verfahren für den selektiven Abbruch beinhalten Einschlagen, Stemmen, Pressschneiden und Sprengen. Im weiteren Aufbereitungsschritt des Abbruchs werden die aus dem selektiven Abbruch gewonnen Bruchstücke weiter zerkleinert und anschließend separiert. Hier kommen meist mechanische Systeme zur Anwendung, die durch Druck- oder Schlag-/Prallbeanspruchung den Beton zerkleinern. Die gängigsten Maschinen für die Zerkleinerung von Stahlbeton sind der Backen- und Prallbrecher [169].

Grundsätzlich wird Recycling von nichtmetallischer Bewehrung, wie aus Abbildung 53 ersichtlich, in zwei Szenarien unterteilt. In Szenario 1 wird das gebrochene Material aufbereitet und separiert wodurch die weitere Verwertung der nichtmetallischen Bewehrung und des Betons ermöglicht wird. In Szenario 2 kommt es zu einem Brechen des Materials ohne Separation wodurch ein heterogenes, nicht sortenreines Material gewonnen wird (Downcycling).

Aufgrund der niedrigen Herstellungskosten und der anorganischen Struktur wird Beton mit glas- oder basaltfaserverstärkten Kunststoffbewehrung derzeitig nur dem zweiten Recyclingszenario unterzogen, wodurch das Material nach dem Bruch für ein Downcycling zur Verfügung steht [172].

7.1.2 Sortierung

Eine sortenreine Sortierung gewährleistet die Trennung eines Abfallstromes nach Art und Beschaffenheit, um eine gezielte Nachbehandlung zu gewährleisten. Stahlbeton, zum Beispiel, wird unter Nutzung der physikalischen Eigenschaften getrennt. Die für die Zerkleinerung verwendeten Maschinen haben oft, zusätzlich für die Separierung von metallischer Bewehrung, Metallabscheider integriert [157]. Grundsätzlich kann bei der Sortierung in trockene und nasse Verfahren unterschieden werden, wobei das trockene Sortierverfahren für die Bauschuttaufbereitung im industriellen Maßstab dominiert, da die notwendige Herstellung eines Wasserkreislaufes für eine nasse Sortierung einen erheblichen Mehraufwand mit sich bringt [173].

In Bezug auf nichtmetallische Bewehrung gibt es derzeit hauptsächlich Forschungsergebnisse zu der Sortierung von Carbonbeton mit EP getränkten textilen Carbonbewehrung. Unbeschichtete Fasern können im Gegensatz zu beschichteten Faser nicht einfach von der Betonmatrix separiert werden. Bei EP getränkten Textilien ist eine Betonanhaftung von circa 17% nachweisbar, für SBR imprägnierte Fasern liegt die Betonanhaftung bei rund 40%. Des Weiteren zeigen SBR getränkte Fasern, die aus einer Betonmatrix entfernt wurden höhere Schäden der







Faserstruktur auf. Ebenfalls entscheidend für die Rückgewinnung von nichtmetallischer Bewehrung, in diesem Fall Textilbewehrung, ist der Rovingtiter (Rovingstärke bzw. Durchmesser). Bewehrungen mit großen Durchmessern werden in der Regel weniger beschädigt als Textilien mit einem niedrigem Titer. [170]

Im Zuge von Forschungsarbeiten der TU Dresden [157] wurden unterschiedliche Verfahren auf ihre Wirksamkeit der Sortierung von Material mit einer Korngruppe 0/56 untersucht (mit CFRP-textil bewerte Betonelemente). Verglichen wurden die Sortierungsergebnisse aus der Trennung mittels Wirbelstromsichtung, Schwimm-Sink-Sortierung, Nahfeldinfrarot-Sortierung und kamerabasierten Sortierung. Die kamerabasierte Sortierung überzeugte mit einer Ausbringquote von 97,7% der Carbonbewehrung bei einem Durchsatz von 6,3 t/h. Ein Leitfaden für die optimale Sortierung von Beton mit carbonfaserverstärkter Textilbewehrung wurde anschließend entwickelt.

Die Möglichkeit der Verwertung von Glas- und Basaltfaserbewehrung mittels dem ersten Recyclingszenario (Szenario mit Sortierung und Aufbereitung) ist anzudenken, derzeitig gibt es jedoch keine Forschung auf diesem Thema die eine Aussage über die Trennbarkeit des Materials erlauben.

7.1.3 Aufbereitung

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass faserverstärkte Kunststoffbewehrung als solche nach der Zerkleinerung des Bauteils, auf Grund der Beschädigung, nicht nochmal eingesetzt werden kann [174]. Rückgewonnene gitterförmige Carbonbewehrungselemente zeigen bei Belastungsversuchen eine um 30-40% geringere Biegezugfestigkeit als neuwertige Textilien [175], [176]. Gleiches konnte auch bei der Untersuchung von EP-beschichteten AR-Glas-Bewehrungen festgestellt werden (25 % der Festigkeit der Bewehrung in Ursprungsform) [175]. Aus diesem Grund ist eine Aufbereitung der rückgewonnen Bewehrungselemente notwendig.

Wird von der Aufbereitung von Fasern gesprochen so muss bei den vorhandenen Abfällen in trockene Abfälle (aus der Produktion kommend), Halberzeugnisse (bereits mit einer Matrix beschichtet, jedoch nicht ausgehärtet) und ausgehärteten faserverstärkten Kunstoffen unterschieden werden. Im Fall von rückgewonnen Bewehrungselementen handelt es sich um Letztere. Die Aufbereitungsmöglichkeiten für die jeweiligen Abfälle sind Abbildung 54 zu entnehmen und bestehen aus Zerkleinerung, Pyrolyse und Solvolyse. Eine Trennung von Faser und Matrix ist von äußerster Wichtigkeit für die Weiterverarbeitung des Materials.







Abbildung 54: Aufbereitung von faserverstärkten Kunststoffabfällen in Anlehnung an [177].

In Zuge der mechanischen Zerkleinerung wird das Material in z.B. einer Hammermühle weiter zerkleinert und anschließend in unterschiedliche Fraktionen geteilt. Dieses Verfahren wird vor allem für GFRP und im geringen Maße für CFRP verwendet, wobei es oft als Vorstufe für die Pyrolyse genutzt wird [178]. Fasern werden meist auf eine Länge von 0,2 - 0,5 mm zermahlen um ein Verknoten der Fasern zu verhindern.

Die Pyrolyse (Kettenfördererpyrolyse – Chain Conveyor Pyrolyse, Wirbelschichtpyrolyse – Fluidised Bed Pyrolyse, Mikrowellen unterstützte Pyrolyse – Microwaved Assisted Pyrolyse) bietet eine Umsetzung in großtechnischen Anlagen und ist das zurzeit am besten erforschte Aufbereitungsverfahren für faserverstärkte Kunststoffe. Das Verfahren nutzt die unterschiedlichen Temperaturbeständigkeiten von Fasern und Matrix um die Matrix von der Faser abzubrennen. Der Prozess an sich beeinflusst die mechanischen Eigenschaften der zurückgewonnenen Fasern stark. Aufgrund des fehlenden Standards, ist es oft nicht klar welche genauen Tränkungsmaterialien benutzt wurden was zu einer nicht vollständigen Pyrolyse oder beschädigten Fasern führen kann. Die Zugfestigkeit von Carbonfasern nimmt zwischen 4% und 85% ab, während die von Glasfasern zwischen 52% und 64% verringert wird. Nach der Verbrennung der Matrix liegen Öl, Gase und die festen Bestandteile (Fasern) vor. [177]–[179]

Im Gegensatz zur Pyrolyse nutzt die Solvolyse keine reine Hitze sondern ein erhitztes Lösungsmittel um die Matrix von der Faser zu trennen und bietet viele Möglichkeiten bezüglich Lösungsmittel (meist Wasser), Temperatur, Druck und Katalysatoren. In diesem Verfahren behalten die Carbonfasern 90% ihrer mechanischen Eigenschaften nach der Behandlung [178], [180].

Entsprechend der unterschiedlichen Aufbereitungsverfahren stellen verschiedene Unternehmen Möglichkeiten der Aufbereitung von faserverstärkten Kunststoffen, wie in Tabelle 19 dargestellt, bereit.







Firma	Sitz / Information	Verfahren
Mitsubishi Chemical Advanced Materials GmbH	Chemical DE - Trockene Faserreste, Prepeg-Verschnitte und End-of-Life Bauteile. Großer Teil aus Automobilindust- rie	
Carbon Cleanup GmbH	AUT - Mobile Aufbereitungsanlage für carbonfaserhal- tige Abfälle	-
ReBoat GmbH	DE - Recycling von Booten (GFRP)	3.1-3.3
neocomp	DE - Recycling von Windkraftanlagen	Zerkleinerung
Aericircular	BEL - Recycling von Flugzeugen, Einlagerung von Er- satzteilen	
Gen 2 Carbon	GBR - Recycling von bis zu 2000 Tonnen Carbon pro Jahr, eigenes Pyrolyseverfahren	
Extracthive	FRA - Recyclinganlage für Carbonfasern, 1t/d	Solvolyse
hocker Composites USA – Rückgewinnung von Fasern mit hohen Quali- tätsgrad (für Luftfahrtindustrie)		Pyrolyse
PHYre	USA - Rückgewinnung von Carbonfaser	Solvolyse
Vartega	USA – Recycling von Carbonfasern	Solvolyse

Tabelle 19: Anbieter von Aufbereitungsverfahren für faserverstärkte Kunststoffe [181]-[189]

7.1.4 Wiederverwertung

Die unterschiedlichen Wiederverwertungsmöglichkeiten können Abbildung 53 entnommen werden. Für Betonbauteile mit GFRP und BFRP Bewehrung kommt das bereits beschriebene Recyclingszenario 2 zur Anwendung. Das Material wird entweder auf die Deponie gebracht (Deponieklasse DK0, in Österreich ab 2026 nicht mehr möglich) oder soweit mechanisch zerkleinert, dass es als Füllmaterial für den Damm- und Wegebau eingesetzt werden kann (Downcycling) [172], [190]. Als momentan beste Variante der Wiederverwertung gilt die Verwendung von Glasfaserabfälle als Ersatzbrennstoff für die Zementherstellung [191]. Wie ebenfalls aus Abbildung 53 zu entnehmen ist, kann GFRP auch mittels Pyrolyse aufbereitet werden. Wegen den geringen Herstellungskosten von GFRP und dem großen Aufwand und Kosten der Aufbereitung mittels Pyrolyse kommt dieses Verfahren bis dato nicht zur Anwendung. Obwohl das Material im gemahlenen Zustand der Recyclingklasse RW1 entspricht (uneingeschränkter offener Einbau), ist trotz Bestreben der Hersteller, keine großmaßstäbliche Umsetzung als Baumaterial implementiert [192].

Wie bereits bei der Aufbereitung erklärt sind rückgewonnene faserverstärke Kunststoffbewehrungen nicht dazu geeignet sie direkt in neue Bauwerke zu verbauen. Die verwendeten Aufbereitungsverfahren erlauben eine Rückgewinnung von Fasern in unterschiedlichen Längen, siehe Abbildung 53 und Abbildung 54. Die in Tabelle 19 gelisteten Hersteller von recycelten Fasern bieten auch Produkte aus ihren Erzeugnissen an. Die Hauptendprodukte sind Vliese





aus kurzen Carbonfasern (20-80 mm), geschnittene Carbonfasern, Carbonmehl, Thermoplastpellets für den Spritzguss oder 3D-Druck mit der Anwendung in der Automobilindustrie, Luftfahrindustrie oder Sportindustrie (Tennisschläger) [181]–[189].

Im Rahmen von dem Forschungsprogramms C³ Carbon Concrete Composites [18], [147], [193] wurden aus den zurückgewonnenen Carbonfasern Garne (rGarne) hergestellt, die wiederum erneut zu Textilien gewebt wurden. Weitere Forschungsprojekte zeigten die Herstellung von Vliesen für die Bewehrung von Beton auf.

Werden weder Garne noch Textilien aus den recycelten Fasern produziert, so können die Fasern als Kurzfaser-Bewehrung unter den Frischbeton gemischt werden oder CFRP Produktionsabfälle als Zuschlagstoffe verwendet werden [194]. Die Anwendungsbereiche von recycelten Carbonfasern ist stark abhängig von der Faserlänge mit möglichen Nutzungen dargestellt in [176].

Außerhalb der Baubranche gibt es weitere Wiederverwertungsmöglichkeiten für die rückgewonnene Fasern wie zum Beispiel Organofolie (Autoindustrie), Spinnfasergarn, Füller für SMC (Sheet Mouldin Compounds) oder BMC (Bulk Moulding Compounds) [181], [195], [196].

7.1.5 Rechtliche Regelungen und Normen

Die ÖNORM EN 15347:20080201 [197] liefert ein Schema zur Charakterisierung von Kunststoffabfällen beschäftigt sich jedoch nicht mit der Charakterisierung von Kunststoff-Rezyklaten. Verfahren zur Festlegung von Liefereigenschaften von unterschiedlichen Kunststoff-Rezyklaten sind in separaten Normen (z.B. [198]–[200]) aufzufinden, eine eigene Norm für das Recycling von FRP-Produkten ist jedoch nicht vorhanden.

7.2. Versuche

Die Ergebnisse aus der Literaturrecherche zeigen eine gute Recyclingfähigkeit (Abbruch, Sortierung, Aufbereitung, Wiederverwertung) von Bauteilen mit CFRP-textilbewehrten Bauteilen auf. Um eine Aussage über die Recyclingfähigkeit von Betonbauteilen mit 1D Bewehrungselmenten tätigen zu können, wurden im Rahmen des AP6 Großversuche durchgeführt. Der Forschungsschwerpunkt lag dabei auf den Prozessschritten Abbruch und Sortierung, somit dem Aufschlussverhalten der Bewehrung.





ASFINAG

7.2.1 Versuchsträger

Insgesamt wurden 34 Träger, siehe Abbildung 55, Abbildung 56 und Tabelle 20, mit unterschiedlichen Querschnittsabmessungen (Rechteckquerschnitt und T-Querschnitt mit unterschiedlichen Stegbreiten), Betongüten (Hochfester Beton (High HPC) und UHPC), Bewehrungsdurchmessern (Ø8 und Ø6), wie auch der Oberflächenbehandlungsverfahren der Bewehrungsstäbe (umwickelt, besandet, gefräst), untersucht. Alle Träger waren zusätzlich zu der Längsbewehrung mit einer Textilbewehrung aus Carbon (GRID Q95/95-CCE 38) von solidian bewehrt, wobei die Textilien teils zusätzlich besandet waren.

Insgesamt wurden 18 Rechteckquerschnitt, siehe Abbildung 55 und Tabelle 20, mit einer Stegbreite von 30 mm und einer Länge von 2000 mm zerkleinert. Die Träger unterschieden sich in Betongüte und der Nachbehandlung der Längsbewehrung.



Abbildung 55: Rechteckquerschnitt und verwendete Längsbewehrungsstäbe (SOL: solidian umwickelt, S&P: S&P besandet, THY: thyssenkrupp gefräst)



Abbildung 56: T-Querschnitte B01 – B06 mit SOL Stabbewehrung mit Ø6 und Ø8





Von den Trägern mit T-Querschnitten, siehe Abbildung 56 und Tabelle 20, standen insgesamt 16 Träger mit einer Länge von 1500 mm für die Versuche zur Verfügung. Acht der untersuchten Träger wiesen eine Stegbreite von 80 mm auf und wurden mit einer zusätzlichen Korbbewehrung um die Längsbewehrung (Spaltzugbewehrung) hergestellt. Zusätzlich wurde ein Teil der Träger mit besandeten Textilien hergestellt (jeweils 2 mit einem 30 mm Steg (B03) und einem 80 mm Steg (B06)).

7.2.2 Versuchsdurchführung

Die Versuche zur mechanischen Zerkleinerung der 18 Rechteck- und 16 T-Träger mit CFRP Bewehrungsstäbe und CFRP Textilien, siehe Tabelle 20, fanden auf dem Recyclinghof der Firma Mayer & Co. in Kottingbrunn statt. Der Recyclinghof hatte bis zu dem Zeitpunkt der Versuche keine Erfahrungen mit der Zerkleinerung von CFRP-bewehrten Betonbaueilen. Es wurden die Maschinen verwendet, die auch für eine Zerkleinerung von normal stahlbewehrten Bauteilen verwendet werden. Dabei handelte es sich um einen Pulverisierer der Firma NPK (U-21 JRA) montiert an einem 24,4t Bagger (Doosan DX225LC-5), siehe Abbildung 57 und Abbildung 58, und einem mobilen Backenbrecher der Firma Sandvik (QJ341) mit einer Brechöffnung von 1200 mm x 750 mm, siehe Abbildung 58.



Abbildung 57: links: Pulverisierer (NPK U-21 JRA); mitte: Bruchmaterial nach dem Pulverisieren; rechts: ungebrochene Teile der Träger die nur mit dem Pulverisierer bearbeitet wurden.



Abbildung 58: links: Backenbrecher (Sandvik QJ341); mitte: der Pulverisierer wurde verwendet um ganze Träger in die Brechöffnung des Backenbrechers zu heben; rechts: 24,4t Bagger mit montiertem Pulverisierer und Förderer des Backenbrechers mit Bruchmaterial davor.







Die Vorgangsweise für die ersten Brechversuche (Versuch V1) basierten auf der Annahme, dass wie auch bei konventionellen Stahlbetonbauteilen eine Grobzerkleinerung der Träger notwendig sei, um im Folgeschritt kleinere Teile dem Backenbrecher zuführen zu können. Die Zerkleinerung der ersten acht Versuchsträger (Rechteckquerschnitte aus HPC und UHPC mit solidian Stabbewehrung) zeigte ein gutmütiges Brechverhalten. Der Pulverisierer war im Stande die Träger mühelos zu zerkleinern und den Beton von den CFRP-Stäben zu lösen. Das entstandene Bruchmaterial war bereits ausreichend zerkleinert und es war keine weitere Zerkleinerung mittels Backenbrecher von Nöten. Es wurde daraufhin entschieden die restlichen Träger entweder nur mit dem Pulverisierer oder nur mit dem Backenbrecher zu brechen, siehe Tabelle 20.

Träger	Querschnitt ¹	Länge [mm]	Beton	1D Be- wehrung ²	2D Bewehrung ³	Versuch / Zerklei- nerungsverfahren⁴
1-4	Rechteck	2000	HPC	Ø8 SOL	U-förmig	
5-8 Rechteck		2000	UHPC	Ø8 SOL	U-förmig	V1 Pulverisierer
9-11	Rechteck	2000	UHPC	Ø8 S&P	U-förmig	V2 Pulverisierer
12-14	Rechteck	2000	UHPC	Ø8 THY	U-förmig	V3 Pulverisierer
15-17	T-QS B01	1500	UHPC	Ø8 SOL	U-förmig	
18 T-QS B02 1		1500	UHPC	2Ø6 SOL	U-förmig	
19-22	Rechteck	2000	UHPC	Ø8 SOL	U-förmig	V5 Backenbrecher
23	T-QS B05	1500	UHPC	2Ø6 SOL	U-förmig + Korb	
24-25 T-QS B04 1		1500	UHPC	Ø8 SOL	U-förmig + Korb	
26-27	T-QS B03	1500	UHPC	Ø8 SOL	U-förmig SB	
28	T-QS B02	1500	UHPC	2Ø6 SOL	U-förmig	V7 Backenbrecher
29	T-QS B01	1500	UHPC	Ø8 SOL	U-förmig	
30-31	T-QS B06	1500	UHPC	Ø8 SOL	U-förmig SB + Korb	
32-33 T-QS B04 1		1500	UHPC	Ø8 SOL	U-förmig + Korb	V8 Backenbrecher
34	34 T-QS B05 1500 UHPC 2Ø6 SOL U-förmig + Korb		U-förmig + Korb			

Tabelle 20: Versuchsplan Zerkleinerungsversuche

¹ Querschnitte laut Abbildung 55 und Abbildung 56

² Bewehrung laut Abbildung 55, SOL: umwickelte Stäbe von solidian, S&P: besandete Stäbe von S&P, THY: gefräste Stäbe von thyssenkrupp

³ Bewehrung laut Abbildung 55 und Abbildung 56, Korb: zusätzlicher Korb um die Längsbewehrung, SB: sandbeschichtet

⁴ Unterscheidung in Abbruch mittels Pulverisierer oder Backenbrecher

Um eine klare Aussage zu der Auswirkung der unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen der Stäbe (umwickelt, besandet, gefräst) treffen zu können wurden die Träger mit Bewehrung







von S&P und THY in separaten Versuchen (V2 und V3) mittels Pulverisierer gebrochen. Des Weiteren wurde der Pulverisieren verwendet um einen Auswirkung des Stabdurchmesser feststellen zu können (Versuch V4). Der letzte Versuch mittels Pulverisierer (Versuch V6) galt der Untersuchung der Auswirkung einer stärkeren Elementdicke (Stegbreite 80 mm) auf das Zerkleinerungs- und Separationsverhalten des UHPCs und der Carbonstäbe. Wichtig zu erwähnen ist, dass die Zerkleinerungsqualität und -größe des Bruchmaterials stark von der Bearbeitungsdauer mittels Pulverisierer abhängig ist, und diese auf 1-3 Minuten pro Versuch beschränkt war. Anschließend wurde das Brechmaterial dokumentiert und einer händischen Probenahme unterzogen. Das Team sammelte alle auffindbaren Stabfragmente auf und entnahm 2-3 Schaufeln Betonbruchmaterial.

Das gutmütige Zerkleinerungsverhalten der Träger erlaubte eine Zuführung der Träger in den Backenbrecher ohne vorhergehende Grobzerkleinerung. Im Versuch V5 wurden die restlichen vier Rechtecksträger auf einmal gebrochen, gefolgt von den T-Querschnitten mit den dünnen Stegen (B01-B03) in Versuch V7, und den T-Querschnitten mit den dicken Stegen (B04-B05) in Versuch V8. Zu große Teile der Textilbewehrung und zu lange Stäbe, die sich unter den Brechbacken verfingen, wurden durch die seitliche Öffnung unterhalb der Brechbacken entfernt.

7.2.3 Ergebnisse

Bereits im Laufe der Versuchsdurchführung konnte ein gutes Brech- und Aufschlussverhalten der CFRP bewehrte Träger festgestellt werden. Die Auswertung des gesammelten Bruchmaterials wie auch eingesammelten zurückgewonnen Stäbe bestätigen diese Aussage. Unterschiedliche Parameter bestehend aus Betongüte (UHPC, HPC), Bewehrungsart (CFRP Stäbe mit unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen – umwickelt, besandet, gefräst), Durchmesser der Stäbe (Ø6, Ø8), Querschnittsabmessungen (unterschiedliche Breiten der Träger – 30 mm, 80 mm), verwendete Textile CFRP Bewehrung (regulär, besandet) wie auch verwendeten Brechverfahren (Pulverisierer, Backenbrecher) wurden untersucht.

Betongüte

Es konnte kein Unterschied im Brechverhalten zwischen den Trägern aus UHPC und HPC festgestellt werden. Sowohl Pulverisierer wie auch Betonbrecher konnten die Versuchskörper ohne jegliche Probleme zerkleinern. In Bezug auf den Aufschlussgrad der eingebetteten Stäbe konnte ebenfalls kein Unterschied festgestellt werden.





Bewehrungsart und Durchmesser

Das gutmütige Aufschlussverhalten der CFRP bewehrten Träger wird in Abbildung 59 und Abbildung 60 dargestellt und zeigt keine Unterschiede in Bezug auf die unterschiedliche Oberflächenbehandlungen der Stäbe auf. Alle Stäbe lösten sich gut vom Beton ab. Dies ist auch klar anhand der Negative der Stäbe in den entnommenen Betonproben erkennbar (siehe Abbildung 59 links).



Abbildung 59: Gute Separierungseigenschaften erkennbar durch die klar sichtbaren Negative der Stäbe. Negative und Stäbe von oben nach unten: umwickelter solidian Stab, besandeter S&P Stab, gefräster thysenkrupp Stab. Auf der linken Seite sind die dazugehörigen Beton-Negative zu sehen.



Abbildung 60: Längenverteilung der rückgewonnen und eingesammelten Stäbe







Querschnittsabmessungen von Träger und Bewehrung

Ein Unterschied des Ausschlussverhaltens in Bezug auf die Querschnittsabmessungen der Versuchsträger wie auch Durchmesser der Stäbe konnte nicht festgestellt werden.

Textile Bewehrung

Die Textile Bewehrung, insbesondere die zusätzlichen Bewehrungskörbe der T-Träger B04, B05 und B06, erschwerte die Rückgewinnung der CFRP Stäbe. Es konnte insbesondere eine Anhaftung der besandeten textilen Bewehrung, siehe Abbildung 63 im Vergleich zu Abbildung 61 und Abbildung 62 beobachtet werden. Bei den entnommenen Proben mit Betonanhaftungen handelte es sich hauptsäuchlich um Anhaftungen am Textil und nicht an den Stäben selbst.



Abbildung 61: Probestücke mit Betonanhaftungen bzw. noch anhaftenden Textilbewehrungsfragmenten



Abbildung 62: Nicht vollständig aufgeschlossene Reste eines CFRP Stabes mit zusätzlicher textiler Spaltzugbewehrung.





Abbildung 63: Nicht vollständig aufgeschlossene Reste eines CFRP Stabes mit zusätzlicher besandeter textiler Spaltzugbewehrung.

Verwendete Brechverfahren

Der Vergleich der Brechverfahren (Pulverisierer und Backenbrecher) kann auf mehreren Ebenen geführt werden: (1) Maschinenkapazität, (2) Bruchmaterialgröße und Brecheffizienz, (3) Lägenaufteilung der rückgewonnen Stäbe wie auch den (4) Zustand der rückgewonnen Stäbe.

Kommt es zu einem Abbruch von FRP-bewehrten Bauteilen auf der Baustelle so konnte gezeigt werden, dass ein Pulverisierer, montiert an einen Bagger, im Stande ist diese Abbrucharbeiten durchzuführen. Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass eine weitere Zerkleinerung von UHPC/HPC Trägern mit FRP-Bewehrung problemlos mittels Pulverisierer weitergeführt werden kann. Wird eine Zerkleinerung mittels Backenbrecher angedacht so können Träger mit Dicken von 80 mm ohne Vorzerkleinerung der Brechöffnung zugeführt werden.

In Bezug auf die Bruchmaterialgröße und die Brecheffizienz der Maschinen kann festgestellt werden, dass ein Zerkleinern mittels Backenbrecher von einer zeitlichen Betrachtung aus effizienter erscheint. Die Bruchmaterialgröße kann des Weiteren beim Backenbrecher besser eingestellt werden. Wie Abbildung 64 entommen werden kann, ist das durch den Pulverisierer hergestellt Bruchmaterial von der Größenverteilung viel heterogener als jenes vom Backenbrecher, siehe Abbildung 65. Nach einer Bearbeitungsdauer von bis zu 3 min blieben im Bruchmaterial in jedem Versuch unausgelöste Stäbe und größere Betonelemente übrig (hervorgehoben in rot in Abbildung 64).





ASFINAG



Abbildung 64: Bruchmaterial der Versuche V1, V2, V3, V4 und V6 durchgeführt mittels Pulverisierer. Bruchmaterial, das nicht vollständig aufgetrennt werden konnte (Stäbe und Beton haften noch aneinander) ist rot markiert.



Abbildung 65: Bruchmaterial von Versuche V5 durchgeführt mittels Backenbrecher.







Die Gegenüberstellung der rückgewonnen und eingesammelten Stäbe der Versuchskörper die mittels Pulverisierer zerkleinert wurden mit denen die mittels Backenbrecher bearbeitet wurden, dargestellt in Abbildung 66, zeigt einen deutlichen Unterschied hinsichtlich der rückgewonnenen Stablängen. Über 70% der rückgewonnen Stäbe nach dem Pulverisieren hatten eine Länge zwischen 110 mm und 400 mm, während die rückgewonnen Stäbe nach dem Backenbrechen einen größeren Anteil an längeren Stäbe aufwiesen (über 50% zwischen 310 mm und 600 mm). Beachtlich ist, dass mittels beider Verfahren Stäbe mit Längen über 1000 mm rückgewonnen werden konnten, siehe Abbildung 67.



Abbildung 66: Längenaufteilungen der rückgewonnen und eingesammelten Stäbe. Unterscheidung in Versuche mit Pulverisierer und Backenbrecher.





In Bezug auf die dokumentierten Beschädigungen an den Stäben wurden größere Schäden an den Stäben aus den Trägern, die mittels Pulverisierer zerkleinert wurden, festgestellt, siehe Abbildung 68 und Abbildung 69. Während die Stäbe durch den Backenbrecher bis auf einige Knicke fast unbeschadet vom Beton gelöst werden konnten, wurden die Stäbe durch den Pulverisierer zerquetsch, zerfranst, gebrochen und geknickt.



INFRA



Abbildung 68: Beschädigungen bei dem Brechen mittels Pulverisierer (Versuch V1)

and the second

Abbildung 69: Rückgewonnen Stäbe Versuch V7 mittels Backenbrecher







8. EMPFEHLUNGSLEITFADEN

8.1. Genereller Aufbau

Hauptziel bei der Ausarbeitung des Empfehlungsleitfadens war eine einfache Handhabung und dennoch eine grundlegende Entscheidungsbasis für die Frage, ob der Einsatz von FRP-Bewehrungen bei ausgewählten Projekten aus ökologischer und ökonomischer Sicht Sinn macht. Dazu wurde ein zweistufiges Verfahren ausgearbeitet, wobei die jeweiligen Stufen einen unterschiedlichen Detaillierungsgrad aufweisen. Bevor die Stufen zur Bestimmung des Einsatzpotentials beschrieben werden, ist im Empfehlungsleitfaden noch eine Begriffsbestimmung wie auch eine Präambel aufzufinden.

Stufe I beinhaltet Kriterien um eine schnelle Beurteilung der Sinnhaftigkeit der eingesetzten Bewehrungsart zu ermöglichen, wobei ein Hauptaugenmerk auf die vorrangigen Einsatzgebiete von nichtrostender Bewehrung gelegt wird. Unterschieden wird in Baustahl (BSt), Carbonfaserverstärkte Kunststoffbewehrung (CFRP), Glas- bzw. Basaltfaserverstärkte Kunststoffbewehrung (GFP/BFRP) und Edelstahlbewehrung (ER).

Stufe II des Empfehlungsleitfadens ermöglicht eine genauere Abschätzung der notwendigen Materialmassen (Beton/Bewehrung) für verschieden Bauteile. Durch Kombination der erforderlichen Materialmassen mit ökologischen und ökonomischen massebezogenen Kennwerten, können Rückschlüsse auf das ökologische und ökonomische Anwendungspotential gezogen werden.

8.2. Stufe 1 - Vereinfachtes Verfahren zur Abschätzung des Anwendungspotentials

Die Kriterien in Tabelle 21 werden in Dauerhaftigkeit/Instandhaltung, Materialeffizienz, Beanspruchung und Herstellung unterteilt. Es handelt sich um ein schnelle Abschätzung des Anwendungspotentials, wodurch festgestellt wird welche Art von Bewehrung für den zu bewertenden Bauteil potentiell in Frage kommt. Eine Beurteilung in Stufe I des gewünschten Bauteils und dessen Bewehrung erfolgt durch das Zusammenaddieren der positiven (+) und negativen (-) Bewertungen der angegebenen Kriterien. Nicht alle Kriterien haben für das zu beurteilende Bauteile Relevanz (z.B. elektromagnetisch belastetes Umfeld). Die nicht entsprechenden Kriterien sind nicht zu beachten und aus der Bewertung zu streichen. Eine zweifach negative Bewertung (- -) eines Kriteriums ist als Ausschlusskriterium anzusehen und kennzeichnet somit Einsatzgebiete, für die die gewählte Bewehrungsart nicht geeignet ist, sofern keine genaueren Nachweise erbracht werden. Es gibt auch die Möglichkeit einer neutralen Bewertung (~), die in die Berechnung nicht miteinbezogen wird. Das zusammenaddierte Ergebnis aus den







Bewertungen (+,-,~) von allen relevanten Kriterien gibt schlussendlich eine Aussage über das

Anwendungspotential.

Tabelle 21: Stufe I zur Abschätzung des Einsatzes von BST, CFRP, GFRP, BFRP und Edelstahl (ER) Bewehrung

		BST	CFRP	GFRP BFRP	ER
1	Dauerhaftigkeit/Instandhaltung		-		
1.1	Extrem ungünstige, korrosionsfördernde Umgebungsverhält- nisse (tausalzbeaufschlagte Bauteile, Stützwände, Meeresum- gebung, Parkdecks)	-	+	+	+
1.2	Spritzwasser gefährdet (Brückenpfeiler bei Überführungen, Tunnel)	-	+	+	+
1.3	Drückendes Wasser	-	+	+	+
1.4	Sonderkonstruktion (Anschlussbewehrung zwischen Ortbeton und Fertigteil, wärmegedämmte Übergänge, Bewehrung kreuzt Fugen, Balkonanschlüsse, rissbehaftete Bauteile)	-	+	+	+
1.5	Nicht inspizierbare Bewehrungslage	-	+	+	+
1.6	Mischbewehrung (mit Stahl) erwünscht	+	_ 1	+	+
2	Materialeffizienz				
2.1	Verwendung von Leichtbeton mit poröser Gefügestruktur	-	+	+	+
2.2	Abweichung der normativ angegebenen Betondeckung		+	+	+
2.3	Sehr geringe Betondeckung erwünscht		+ ²	+ ²	~ ³
2.4	Dünne und leichte Elemente angestrebt (Materialeffizienz)	-	+	+	~
2.5	Hoher Bewehrungsgrad (BST, Edelstahl) des Bauteils	-	+	~	-
2.6	Anschaffungskosten	+	-	~	-
3	Beanspruchung				
3.1	Feuerbelastung	+		/~4	+
3.2	Konstruktive Bewehrung	+	~	+	~
3.3	Elektromagnetisch belastetes Umfeld			+	
3.4	Druck Belastung, Momentenumlagerung bei Fließgelenk	+	~ ⁵	~	+
3.5	Große Spannweiten	+	- ⁶	6	+
4	Herstellung				
4.1	Fertigteil - Handhabung	~	+ 7	+ 7	~
4.2	Fertigteil - Transport	~	+	+	~
4.3	Ortbeton - Handhabung	~	+ 7	+ 7	~
4.4	Ortbeton - Einbau	+	-	-	+
4.5	Ortbeton - Biegung	+	_ 8	- ⁸	+
4.6	Temporäres Bauteil – Ökonomischer und Ökologischer As- pekt	+	-	~	~
4.7	Temporäres Bauteil - Abbruch	~	+	+	~
4.8	Kosten	+	-	+	-
1					

¹ Bimetallische Korrosion, kein direkter Kontakt zwischen BST und CFRP

² gilt vorrangig für Textilien

³ Mindestbetondeckung zur Übertragung von Verbundkräften

⁴ Basalt behält 90% der Festigkeit bei einer Feuerbelastung von 500°C über 2h [201]–[203]

⁵ Verhalten unter Druck ist nicht vorteilhaft, wenig Erfahrung in der Verwendung von Druckelementen [35]

⁶ Große Durchbiegung

⁷ Geringeres Gewicht der Bewehrungsstäbe

⁸ Biegung von Stäben auf der Baustelle nicht möglich



8.3. Stufe 2 - Genaueres Verfahren zur Abschätzung des Anwendungspotentials

8.3.1 Vorbemessungsdiagramme

Für den Empfehlungsleitfaden wurden Vorbemessungstabellen abgeleitet, auf Basis dessen die Dimensionierung von FRP-bewehrten Bauteilen erfolgen kann. Diese Bemessungstafeln ersetzen keine reguläre Statik. Die Nachweisführung ist angelehnt an EN 1992-1-1:02-15 [106]. Wo notwendig wurden Adaptionen durchgeführt die nachfolgend auch erläutert werden.

Die vorliegenden Bemessungstabellen sollen als Hilfestellung in einer Vordimensionierung von FRP-bewehrte Bauteile dienen, ersetzen aber keine Ausführungsstatik. In diesem Fall ist eine gesonderte Statik nach der derzeitigen Stand der Technik zu erstellen.

Biegung:

Bei Betonbauteilen, die mittels nichtmetallischer Bewehrung bewehrt sind, ist zu beachten, dass die Bewehrung keine Fließgrenze aufweist. So ist die bekannte Annahme eines Fließen der Bewehrung bei gleichzeitigem Erreichen der Betondruckfestigkeit nicht gerechtfertigt. Vielmehr sind in Abhängigkeit des Bewehrungsgrades zwei Fälle im Traglastzustand zu unterscheiden:

- Bruch der Bewehrung, die Betondruckfestigkeit ist noch nicht erreicht
- Versagen der Betondruckzone, die Bruchfestigkeit der Bewehrung ist nicht ausgeschöpft.

Der ausgeglichene Bewehrungsgrad beschreibt jenen Bewehrungsgrad wo ein Wechsel vom Faserversagen hin zum Betonversagen stattfindet.

Rempel et al. [204] geben mit gewissen Vereinfachungen geschlossene Lösungen für diese beiden Fälle an. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden daraus dimensionslose Bemessungstabellen abgeleitet, die eine Vordimensionierung der erforderlichen Biegebewehrung für verschieden Materialkombinationen zulässt. In Abbildung 70 ist die Spannungs-Dehnungslinie eines FRP-bewehrten Rechteckquerschnittes dargestellt. Als Verinfachung wurde auf der sicheren Seite liegend eine lineare Spannungs-Dehnungsbeziehung des Betons angenommen.









Abbildung 70: Biegetragfähigkeit unter Annahme eine linearen Spannungsverlaufes (Bild erstellt in Anlehnung an [204])

Die Druckzonenhöhe ergibt sich zu:

$$x = \xi \cdot d = \frac{\alpha_r \cdot A_r}{b} \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2b \cdot d}{\alpha_r \cdot A_t}} \right]$$
(34)

mit $\alpha_r = E_r/E_c$

Momentengleichgewicht ergibt für den Fall 1 (Versagen der Biegebewehrung):

$$M_R = F_t \cdot z = A_r \cdot f_{td} \cdot \left[d - \frac{\frac{\alpha_r \cdot A_r}{b} \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2b \cdot d}{\alpha_r \cdot A_r}} \right]}{3} \right]$$
(35)

Es ist zu überprüfen, ob folgende Bedingung eingehalten ist:

$$\sigma_c = \frac{F_t \cdot 2}{b \cdot x} \le x \tag{36}$$

Falls dies nicht der Fall ist, kommt es zu einem Betonversagen (Fall 2), das über folgende Beziehung bestimmt werden kann:

$$M_{R} = F_{c} \cdot z = f_{cd} \cdot b \cdot \left[\frac{\frac{\alpha_{r} \cdot A_{r}}{b} \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2b \cdot d}{\alpha_{r} \cdot A_{r}}} \right]}{2} \right] \cdot \left[d - \frac{\frac{\alpha_{r} \cdot A_{r}}{b} \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2b \cdot d}{\alpha_{r} \cdot A_{r}}} \right]}{3} \right]$$
(37)

Gleichung (35) und (37) lassen sich unter der Verwendung des geometrischen Bewehrungsgrades ρ = At / b·d folgendermaßen anschreiben







$$M_{R(Gl,2)} = \rho \cdot b \cdot d^2 \cdot f_{td} \cdot \left[1 - \frac{\alpha_r \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{\alpha_r \cdot \rho}} \right]}{3} \right]$$
(38)

$$M_{R(Gl.4)} = \rho \cdot b \cdot d^2 \cdot f_{cd} \cdot \left[1 - \frac{\alpha_r \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{\alpha_r \cdot \rho}} \right]}{3} \right]$$
(39)

Durch umformen ergibt sich der dimensionslose Momentenwiderstand:

$$\frac{M_{R(Gl,2)}}{b \cdot d^2 \cdot f_{td}} = \rho \cdot \left[1 - \frac{\alpha_r \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{\alpha_r \cdot \rho}} \right]}{3} \right]$$
(40)

$$\frac{M_{R(GL4)}}{b \cdot d^2 \cdot f_{td}} = \rho \cdot \frac{f_{cd}}{f_{td}} \cdot \left[1 - \frac{\alpha_r \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{\alpha_r \cdot \rho}} \right]}{3} \right]$$
(41)

Zu sehen ist, dass das Betonversagen bestimmt ist durch das Verhältnis der Zugfestigkeit der Bewehrung zur Druckfestigkeit des Betons. Dies spiegelt sich auch im ausgewogenen Bewehrungsgrad wieder. Durch einführen des Bewehrungsgrades in Gleichung (36) und umformen ergibt sich:

$$\frac{2}{\alpha_r \cdot \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{\alpha_r \cdot \rho}}\right]} \le \frac{f_{cd}}{f_{td}}$$
(42)

Gleichungen (40) und (41) lassen sich in Form von Bemessungsdiagrammen darstellen, siehe Abbildung 71. Einflussfaktoren sind das Verhältnis der Zugfestigkeit der Bewehrung zur Druckfestigkeit des Betons, sowie das Verhältnis des E-Moduls der Bewehrung zum E-Modul des Betons.

Beim Vergleich der Diagramme von Abbildung 71 lässt sich ein im gesamten Bereich des untersuchten Bewehrungsgrades nahezu konstante Abminderung von einem Querschnitt mit einem Verhältnis $\alpha_r = 6.1$ bis zu $\alpha_r = 1.5$ erkennen. Es wird daher vorgeschlagen Bemessungstabelle 4 (grüne Linien) heranzuziehen und bei Verwendung von Materialien mit einem unterschiedlichen Verhältnis von α_r die erhaltene Biegetragfähigkeit entsprechend den Werten in Abbildung 72 abzumindern.



ÖBB

ASFINAG



Abbildung 71: Biegetragfähigkeit eines Rechteckquerschnittes in Abhängigkeit des Bewehrungsgrades und der mechanischen Verhältnisse zwischen Bewehrung und Beton



Abbildung 72: Abminderung der Biegetragfähigkeit in Abhängigkeit des Verhältnisses Er/ Ec





Verformungen:

Für die Ableitung von Vordimensionierungstafeln wurden die Verformungen für verschiedene statische Systeme und Kombinationen an Bewehrungen und Beton (charakterisiert durch die Verhältnisse der E-Moduln und Festigkeiten) an Bauteilen mit aufsteigenden Bewehrungsgraden durchgeführt.

Die Verformungen wurden direkt nach dem in EN 1992-1-1 [106] definierten ζ -Verfahren durchgeführt. Dieses beschreibt das Verhalten zwischen einem ungerissenen und einem nicht vollständig gerissenen Betonquerschnitt mit folgender Beziehung:

$$\alpha = \zeta \cdot \alpha_{II} + (1 - \zeta)\alpha_I \tag{43}$$

Mit dem Verteilungsbeiwert ζ , der das Mitwirken des Betons zwischen den Rissen beschreibt:

$$\zeta = 1 - \beta \cdot \frac{\sigma_{tr}}{\sigma_t} \tag{44}$$

Für die Berechnung der Verformungen wird das Tragwerk in n Schnitte unterteilt und in jedem Schnitt die Krümmung berechnet. Durch integrieren der Krümmungen über die Länge lässt sich die Verformung entlang des Tragwerks berechnen.

Als primärer Variationsparameter dient der geometrische Bewehrungsgrad ρ . Mit diesem wird der Biegewiderstand (bei konstant gehaltener statischer Nutzhöhe d) nach Kapitel 4.2.1 berechnet und daraus die Designbelastung für das Tragwerk abgleitet. Mit einem gegebenen Verhältnis von Design zu quasi-ständiger Last kann in weiterer Folge die Durchbiegung w berechnet werden. Dies wir über eine Schleife solange iteriert, bis der Zielwert der max. erlaubten Durchbiegung w_{zul} erreicht wird. Mit der zugehörigen Länge kann ein zulässiges I/d Verhältnis abgeleitet werden.

Folgende Annahmen wurden für die nachfolgend abgebildeten Vorbemessungsdiagramme getroffen:

- Verhältnis quasiständiger Last zu Designlast 50% dies entspricht etwa einem Verhältnis der quasi-ständigen Last zur charakteristischen Last von 70%
- Langandauernde Belastung $\rightarrow \beta = 0.5$
- Kriechbeiwert $\varphi(t_{0,\infty}) = 2.5$
- W_{zul} = I/250

Die abgeleiteten Bemessungsdiagramme (Abbildung 73) sind nachfolgend für einen Einfeldträger unter Variation des Verhältnisses der E-Moduln und Festigkeiten der Bewehrung

135







und Beton dargestellt. Die Diagramme sind in Form von I/d Verhältnissen angegeben, aus denen für verschieden Tragwerkslängen die notwendige statische Nutzhöhe zur Begrenzung der Verformung ermittelt werden kann. Der leicht abgetreppte Verlauf ergibt sich aufgrund der limitierten Anzahl an Iterationsschritten und einer linearen Interpolation zwischen den diskret berechnten Punkten.



Abbildung 73: Zulässige I/d Verhältnisse für einen Einfeldträger mit unterschiedlichem Verhältnis der E-Moduln und Festigkeiten der Bewehrung und des Betons.

Selbiges kann für unterschiedliche statische System vorgenommen werden, wie nachfolgend für einen Kragarm dargestellt (Abbildung 74).









Abbildung 74: Zulässige I/d Verhältnisse für einen Kragarm mit unterschiedlichem Verhältnis der Emoduln und Festigkeiten der Bewehrung und des Betons.

Es ist augenscheinlich eine Proportionalität im I/d Verhältnis mit dem Verhältnis f_{td}/f_{cd} ersichtlich. Dies lässt sich als Abminderungsfaktor darstellen der konstant im gesamten Bereich des variierten Bewehrungsgrades ist.

Für das Verhältnis der E-Moduln lässt sich eine leicht zunehmende Abminderung mit zunehmendem Bewehrungsgrad erkennen. Um eine Vorbemessung auf der unsicheren Seite zu vermeiden wird der Abminderungsfaktor bei einem Bewehrungsgrad von $\rho = 1,5 \cdot 10^{-2}$ abgeleitet.



Abbildung 75: Zulässige I/d Verhältnisse für einen Kragarm mit unterschiedlichem Verhältnis der E-Moduln und Festigkeiten der Bewehrung und des Betons.

 $\times 10^{-2}$

1.5

0.6

0.5

1

 ρ [-]

1.5

 $imes 10^{-2}$

Auf Basis der gewonnen Erkenntnisse wird vorgeschlagen, die derzeitigen I/d Grenzwerte aus EN1992-1-1 [106] heranzuziehen und mit den entsprechenden Abminderungsfaktoren in Abhängigkeit der Verhältnisse der Festigkeit und E-Moduln der Bewehrung und des Betons zu multiplizieren, um auf die zulässigen I/d-Verhältnisse von FRP-bewehrten Bauteilen zu schließen.

Rissbreiten:

0_

Die Begrenzung der Rissbreiten erfolgt in Anlehnung an EN 1992-1-1 [106] über die Begrenzung der Bewehrungsdurchmesser. Die Rissbreite für den Einzelriss ergibt sich zu:

$$w_{cr} = \frac{\sigma_r \cdot \emptyset_r}{2 \cdot \tau_m} \cdot (1 - k_t) \cdot \frac{\sigma_r}{E_r}$$
(45)

Die Rissbreite beim abgeschlossenen Rissbild ergibt sich zu:

1

 ρ [-]

$$w_{cr} = \frac{f_{ct} \cdot \emptyset_r}{2 \cdot \tau_m \cdot \rho_{eff}} \cdot \left[\frac{\sigma_r}{E_s} - k_t \cdot \frac{f_{ct}}{\rho_{eff} \cdot E_r} \cdot (1 + \alpha_r \cdot \rho_{eff}) \right]$$
(46)

Durch umformen lassen sich beide Gleichungen in Abhängigkeit des Bewehrungsdurchmessers und der Rissbreite darstellen:

$$\frac{\emptyset_r}{w_{cr}} = \frac{2 \cdot \tau_m \cdot E_r \cdot f_{ct,eff}}{(1 - k_t) \cdot \sigma_r^2}$$
(47)

$$\frac{\emptyset_r}{W_{cr}} = \frac{2 \cdot \tau_m \cdot \rho_{r,eff} \cdot E_r}{\sigma_r - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{eff} \cdot E_r} \cdot (1 + \alpha_r \cdot \rho_{eff})}$$
(48)

[NIMETBEW]





Dies lässt sich in Form von den Diagrammen in Abbildung 76 darstellen. Mit den beiden Annahmen:

- T_b = 1.8 MPa (Wert für Stahlbewehrung nach EN 1992-1-1 [106])
- k_t = 0.4 (für langandauerende und wiederholte Belastung)

ergeben sich die Werte die auch in Tabellenform in EN 1992-1-1 [106] vorhanden sind. In Gleichung (47) und Gleichung (48) ist wieder eine Abhängigkeit der Rissbreite vom Verhältnis der E-Moduln erkennbar.



Abbildung 76: Zulässiger Bewehrungsdurchmesser in Abhängigkeit der Spannung in der Bewehrung

Die Diagramme in Abbildung 76 wurden unter verschiedenen Annahmen hergleitet, die nachfolgend angeführt sind. Weichen die tatsächlichen vorliegenden Materialien von diesen Annahmen ab sind Adaptionen notwendig.





- Die Diagramme wurden für eine Zugfestigkeit f_{ctm} = 2.9 MPa hergeleitet, für abweichende Zugfestigkeiten ist der Stabdurchmesser mit dem Verhältnis fctm / 2.9 anzupassen
- Die Diagramme wurden mit einer Verbundfestigkeit von τb = 1.8 MPa berechnet. Für abweichende Verbundfestigkeiten ist der Stabdurchmesser mit τ_b /1.8 anzupassen.

Der effektive Bewehrungsgrad ρ_{eff} beschreibt den Bewehrungsgrad bezogen auf den Wirkungsbereich der Bewehrung, um eine Sekundärrisbildung zu berücksichtigen. Die effektive Höhe der Zugzone h_{eff} ergibt sich für biegebeanspruchte Bauteile als Minimum der folgenden Bedinung:

$$h_{c,eff} = min\left[2,5 \cdot (h-d); \frac{h-x}{3}; \frac{h}{2}\right]$$
(49)

Da die Rissbreite vom E-Modul der Bewehrung abhängt ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen den Kurven in Abhängigkeit des E-Moduls der Bewehrung. Dies lässt sich gut in einem Plot (Abbildung 77) veranschaulichen:



Abbildung 77: Abminderung des zulässigen Durchmessers zur Rissbreitenbegrenzung in Abhängigkeit des E-Moduls der Bewehrung.

Dadurch vereinfacht sich die Nachweisführung zur Begrenzung der Rissbreite weiter, indem nur das vierte Diagramm in Abbildung 76 angegeben wird. Wenn der E-Modul der Bewehrung von dem im Diagramm verwendeten E-Modul abweicht, ist der zulässige Bewehrungsdurchmesser um das Verhältnis E_f / 200 000 (in MPa) zu adaptieren.





Spannungen:

Die Spannungen im Querschnitt lassen sich unter Annahme eines dreiecksförmigen Spannungsverlaufs im Beton, der unter Gebrauchslasten die Realität annähernd genau beschreibt, (siehe Abbildung 70) mit folgenden Formeln berechnen:

$$\xi = -\alpha_r \rho_l + \sqrt{(\alpha_r \rho_l)^2 + 2\alpha_r \rho_l} \tag{50}$$

$$\sigma_c = \frac{M_E}{bd^2 \frac{\xi}{2} \left(1 - \frac{\xi}{3}\right)} \tag{51}$$

$$\sigma_t = -\sigma_c \alpha_r \left(\frac{1}{\xi} - 1\right) \tag{52}$$

Dies lässt sich in Form von dimensionslosen Diagrammen darstellen. Auch hier ist wieder eine Abhängigkeit des Verhältnisses E_r / E_c erkennbar. Die Grenzwerte der Spannungsbegrenzung für die in Kapitel 4.3 in den durchgeführten Parameterstudien verwendeten Bewehrungsmaterialien sind in Tabelle 6 ersichtlich.



Abbildung 78: Spannungen im Beton in Abhängigkeit der Materialeigenschaften der Bewehrung und des Betons und der Geometrie des Querschnittes.

8.3.2 Ökologische Kennzahlen

Im Leitfaden wird eine Tabelle mit Umweltindikatoren pro kg FRP- bzw. Edelstahlbewehrung (ER) nach ÖNORM EN 15804 zu finden sein. Die Tabelle (hier Tabelle 22) beinhaltet die Werte für GWP – Global Warming Potential, AP – Acidification Potential, AE – Accumulated Exceedance, ADP – Abiotic Depletion Potential, für die Produktionsphase nach ÖNORM EN 15804 (A1-A3).





	GFRP	BFRP	CFRP	ER
GWP [kg CO ₂ -Äq.]	2.1	1.6	21.5	3.7
AP [kg SO ₂ -Äq.]	7.3E-03	5.4E-03	2.5E-01	1.8E-02
AE [mol H+-Äq.]	1.0E-02	-	1.7E-01	-
ADP nicht fossil [kg Sb-Äq.]	1.8E-06	1.8E-02	1.1E-05	5.4E-05
ADP fossil [MJ]	37.9	-	338.7	40.9

Tabelle 22: Ökologische Kennzahlen verschiedener Bewehrungsmaterialien pro kg Baustoff

8.3.3 Ökonomische Kennzahlen

Wie bereits für die ökologischen Kennzahlen wird der Leitfaden auch ökonomische Kennzahlen angeben. Wie bereits in den vorherigen Kapitels erörtert sind die Kosten verschiedener FRP-Produkte stark abhängig von den Materialien (Fasermaterial/ Tränkungsmaterial) und der Herstellungsmethode. Auf Basis einer Umfrage von mehreren Unternehmen, die FRP- Bewehrungen herstellen wird in Tabelle 23 eine Bandbreite für Kosten bei FRP-Bewehrungen angegeben. Es ist anzumerken, dass die Hersteller darüber hinaus betonen, dass die Kosten sehr projektspezifisch sind und z.B. größeren Abnahmemengen geringer ausfallen können.

Die in Tabelle 23 für Edelstahlbewehrungen angegebenen Preise stellen handelsübliche Preise für diese Art der Bewehrung dar.

Tabelle 23:	Ökonomische	Kennzahlen	verschiedener	Bewehrungsma	aterialien pro l	kg Baustoff
				9		0

	GFRP	BFRP	CFRP	ER
Stab [€/kg]	8	6	100	6
Textil [€/kg]	20	20	40	6

8.3.4 Beurteilung und Anwendungsbeispiele

Die Beurteilung des ökologischen und ökonomischen Anwendungspotentials verschiedener FRP-Bewehrungen im Betoninfrastrukturbau erfolgt durch Verknüpfung der erhaltenen Materialmassen aus den Vorbemessungsdiagrammen aus Kapitel 8.3.1 oder aus einer detaillierten Bemessung mit den entsprechenden ökologischen und ökonomischen Kennzahlen in Kapitel 8.3.2 und Kapitel 8.3.3.

Speziell bei carbonbewehrten Bauteilen ist auf ein optimales Design Acht zu geben, da in der Regel ein eng umgrenzter optimaler Bereich existiert in dem die Kosten als auch der ökologische Impact ein Minimum ist.

Im Empfehlungsleitfaden werden zur besseren Veranschaulichung die in Kapitel 4.3 untersuchten Bauteile als Beispielsammlung angeführt. Diese stellen aufgrund der gewählten







Rechteckquerschnitte eine konservative Annahme dar. Es werden verschiedene Systeme, Belastungen und Größenordnungen der Bauwerke die im Infrastrukturbau auftreten betrachtet.





9. ZUSAMMENFASSUNG

Das Forschungsprojekt konnte zeitgemäß abgeschlossen werden und alle gesetzten Ziele konnten plangemäß erreicht werden.

9.1. Ziel 1: Technische und wirtschaftliche Grundlagen für den Einsatz von nichtmetallischer Bewehrung in Österreich

Durch die Erhebung der am europäischen Markt eingeführten nichtmetallischen Bewehrungen konnte ein klares Bild der technischen Eigenschaften, deren Verfügbarkeit und Kosten erstellt werden. Diese Erkenntnisse dienten als Basis für alle weiteren Forschungsarbeiten. Es wurden nur Produkte in Betracht gezogen die für die Bewehrung von Beton im Neubau geeignet sind.

Eine Gliederung der Produkte von 20 Herstellern wurde präsentiert, bei der die Produkte nach Fasern (Carbon, Glas, Basalt), Matrix (Akrylatdispersion, SBR Styrol-Butatien-Kautschuk, Epoxidharz, Vinylesterharz), Bewehrungsart (1D – Stab oder Litze, 2D – Textil oder Matte, 3D) und Oberflächenbeschaffenheit (sandbeschichtet, umwickelt, profiliert, gefräst) kategorisiert sind. Die umfangreiche Literaturrecherche zu den Bestandteilen (Faser, Matrix) und deren Herstellung diente als Grundlage für die nachfolgende ökologische Analyse der Produkte. In Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften wurden die von den Unternehmen bereitgestellten Information zusammengestellt. Bei fehlenden Angaben wurden eigene experimentelle Daten oder Daten aus der Literatur verwendet. Die erhaltenen Informationen zu den Kosten lieferten eine breite Spanne: Stäbe $3,50 \notin/kg - 82,50 \notin/kg$ bzw. $0,08 \notin/m - 9,90 \notin/m$, 2D/3D 0,50 $\notin/m^2 - 46 \notin/m^2$. Die Hersteller gaben an, dass die Kosten von den folgenden Faktoren abhängen: (1) Faser (Carbon, Glas, Basalt), (2) Abmessung (Stabdurchmesser zwischen 2mm und 45mm), (3) Bewehrungsgehalt (Gewichtsanteil Faser zwischen 65% und 85%), (4) Herstellungsart und Nachbearbeitung (gestrickt, gewebt, gesteckt, sandbeschichtet, gefräst, umwickelt, Formbewehrung, usw.) und (5) Abnahmemenge.

Generell kann zusammengefasst werden, dass Stäbe und Textilien aus Carbon eine höhere Zugfestigkeit und einen höheren E-Modul, aber eine geringere Bruchdehnung im Vergleich zu Produkten aus Basalt und Glas aufweisen. Die Zugfestigkeit variiert mit dem Stabdurchmesser, während sich der E-Modul nicht nennenswert verändert. Des Weiteren kann die Spannungs-Dehnungs-Beziehung als linear elastisch bis zum Versagen beschrieben werden, eine Eigenschaft, die regulärer Betonstahl nicht aufweist. Ein großer Einfluss des verwendeten Tränkungsmaterials auf die Zugfestigkeit ist bei dem Vergleich der Eigenschaften der Textilien zu erkennen, wobei epoxidharzimprägnierte Textilien die höchste Zugfestigkeit aufweisen.




Ein noch nicht vollständig gelöste Thematik bei der Konstruktion und Bemessung mit nichtmetallischer Bewehrung betrifft die Dauerhaftigkeit im alkalischen Milieu des Betons. Während im normalen Stahlbeton das alkalische Milieu den Stahl vor Rost schützt, greift es bei FRP-Stäben teils die Faser und die Tränkung an. Viele der kontaktieren Hersteller geben eine Langzeitfestigkeit im Bereich von 60%-90% der Kurzzeitfestigkeit an. Umfassende Literaturrecherchen und der Austausch mit anderen Forschern zeigen eine höhere Langzeitfestigkeit auf. Die von den Herstellern angegebenen niedrigen Langzeitfestigkeiten sollten kritisch hinterfrag werden, um nicht sofort als Ausscheidungsgrund zu gelten.

9.2. Ziel 2: Bestimmung des Einsatzpotentials von nichtmetallischer Bewehrung für Infrastrukturbauwerke

Relevante Bauteile im Infrastrukturbau filtern und Schadensbilder identifizieren: Das Potential für den Einsatz von nichtmetallischer Bewehrung wurde gemeinsam mit den Infrastrukturbetreibern im Zuge des Knowledge-Hubs gemeinsam erarbeitet. Folgende Ziele werden verfolgt (a) Verbesserung der Dauerhaftigkeit, (b) Steigerung der Materialeffizienz und (c) Verbesserung der Wartungsprozesse. Im Hinblick auf eine mögliche Verbesserung der Dauerhaftigkeit wurden Konstruktionen mit Tausalzbelastung (z. B. Bahnsteigkanten), Spritzwasserbereiche (z. B. Stützen/Zwischenwände in Überführungen, Tunnelinnenschalen) und Bereiche mit Druckwasser (z. B. hinter Widerlagerwänden durch Folgeschäden durch undichte Straßenübergangsbauwerke, hinter Stützmauern) genannt. Eine Steigerung der Materialeffizienz kann bei massengefertigten dünne Elementen (z. B. Kabelkanäle, Kabelkanal-Abdeckplatten) oder bei hochbewehrten, für die Tragfähigkeit kritische Bauteile (z.B. Rahmenecken, Stützen) angestrebt werden. Für die Verbesserung der Wartungsprozesse hat nichtmetallische Bewehrung, vor allem bei kritischen Bewehrungslagen, die nicht inspiziert werden können und wesentlich zur Tragfähigkeit beitragen, Potential.

Materialgerechte Bemessung von Infrastrukturbauwerken: Bei der Bemessung mit nichtmetallischen Bewehrungen sind Unterschiede zum Querschnittsdesign mit Stahlbewehrung zu beachten. Im Großteil der Fälle waren Gebrauchstauglichkeitsnachweise maßgebend für die Bestimmung der Querschnittsabmessungen während die Tragsicherheit in der Regel ohne Probleme nachgewiesen werden konnte. Dies lässt sich im Wesentlichen auf den geringen E-Modul der FRP-Bewehrungen zurückführen, wodurch einerseits größere Verformungen auftreten und andererseits auch größere Rissbreiten vorhanden sind, die die größeren zulässigen Rissbreiten aufgrund der Korrosionsbeständigkeit z.T. kompensieren. Ein möglich Abhilfe dafür wäre eine Vorspannung der Bewehrung. Darüber hinaus ist die Langzeitfestigkeit der FRP-







Bewehrungen von Bedeutung, da speziell für Glas- und Basaltbewehrung aktuell die Spannung im Gebrauchszustand auf äußerst geringe Werte begrenzt werden muss.

Bei der jeweiligen Bemessung mit den verschiedenen FRP-Bewehrungen sind weitere Unterschiede zu erkennen. Ein Vergleich von CFRP bewehrten mit GFRP- und BFRP bewehrten Bauteilen zeigt, dass speziell Bauteile mit CFRP-Bewehrung aufgrund ihres hohen Energiebedarfs in der Herstellung sehr sensitiv im Querschnittsdesign sind und für rechteckquerschnitte ein klar ausgeprägtes Optimum in Hinblick auf das Global Warming Potential (GWP) existiert. Eine Optimierung des Querschnittes hin zu einer minimalen Bewehrungsfläche ist demnach aus ökologischer Sicht anzustreben. Bei GFRP bewehrten Bauteilen überwiegt hingegen anteilsmäßig der Beton am GWP, weshalb hier umgekehrt eine Minimierung der Betonquerschnittsfläche bei verhältnismäßiger großer Bewehrungsfläche anzustreben ist.

Generell ist hier festzuhalten, dass verglichen mit den untersuchten Rechteckquerschnitten für alle FRP-Bewehrungen weiteres Optimierungspotential bei der Wahl der Betonsorten und des Querschnittsdesigns besteht. Bei der Verwendung dieser Hochleistungswerkstoffe ist in der Regel auch ein höher leistungsfähigerer Beton vorteilhaft. Gut zu erkennen war dies in der Parameterstudie, bei der in vielen Fällen die Betonspannungsnachweise maßgebend waren. Dies trifft speziell für CFRP-bewehrte Bauteile zu. Dieser Bewehrungstypus ist sehr teuer und energieintensiv in der Herstellung weshalb hier eine direkte Übertragung der derzeit vorherrschenden Designphilosophie aus dem Stahlbetonbau nicht zielführend erscheint. Vielmehr muss hier auf eine möglichst effizientes Design Acht gegeben werden, um das volle Potential dieser Bewehrung entfalten zu können.

Parameterstudien zum Anwendungspotential: In einer umfangreichen Parameterstudie konnten verschieden bewehrte (stahl- bzw. nichtmetallisch bewehrt) Bauteilkategorien ökonomisch und ökologisch verglichen werden. Generell ist zum jetzigen Zeitpunkt davon auszugehen, dass nichtmetallisch-bewehrte Bauteile höhere Kosten bei der Errichtung verursachen. Auf der anderen Seite ist speziell für Glas- und Basaltbewehrte Bauteile ein geringerer ökologischer Einfluss zu erkennen. Die genannten Wirkungskategorien sind aber abhängig vom Bauteil und der jeweiligen Belastung.

So ist speziell bei kleineren, gering belasteteren und insbesondere filigranen Bauteilen mit einem erhöhten Einsatzpotential auszugehen, da die höheren Kosten im Vergleich zu einer stahlbewehrten Ausführung gering ausfallen während gleichzeitig das GWP signifikant reduziert werden kann. Dies kann unter anderem auf die geringere erforderliche Betondeckung zurückgeführt werden, die bei kleinen Bauteilabmessungen einen wesentlichen Einfluss auf







die Gesamtkosten und das GWP hat. Mit größer werden Bauteilabmessungen verringert sich das Einsatzpotential bei alleiniger Betrachtung der Kosten und des GWP bei Errichtung. Speziell für Bauteile, bei denen ein gewisser Bereich korrosionsgefährdet ist (z.B. Winkelstützmauer), kann eine hybride Bewehrung vorteilhaft sein. Die nichtmetallische Bewehrung wird in jenen Bereichen wo mit hoher mechanischer sowie auch chemischer Beanspruchungen zu rechnen ist eingesetzt, während im restlichen Baukörper Stahlbewehrung verwendet wird.

Zur ökonomischen Bewertung wurde ein Ansatz auf Basis von Lebenszykluskosten vorgestellt und es wurden Beispiele in verschiedener Größenordnung analysiert. Es zeigte sich vor allem ein ökonomisches Potential beim Einsatz von Bewehrung aus Glas- und Basaltfaser. Aufgrund der hohen Anschaffungskosten sowie der fehlende flächendeckende Recyclingkreislauf konnten für die untersuchten Varianten mit Carbonbewehrung keine ökonomischen Vorteile beobachtet werden. Besonders bei Bauteilen, welche nur einen Bruchteil der Kosten bei der Errichtung des Bauwerks ausmachen, aber aufgrund ihrer Dauerhaftigkeitseigenschaften kritisch für die Lebensdauer des Bauwerks sein können (z.B. Bahnsteigkante) ist ein erhöhtes Potential gegeben.

Die durchgeführte **ökologische Analyse** von nichtmetallischer Bewehrung basierte auf den Daten, die aus der Bearbeitung des ersten Ziels hervorgingen. Die Umweltdaten wurden für die einzelnen Komponenten der Faserverbundwerkstoffe (Faser und Matrix) sowie für das fertige Bewehrungsprodukt ausgewertet. Die höchsten Daten pro kg Baustoff zeigten CFRP Werkstoffe auf. Betrachtet man jedoch den normierten, massespezifischen und festigkeitsspezifischen Vergleich fallen die Unterschiede in der Umweltauswirkung zwischen den einzelnen Materialien deutlich geringer aus.

Die Literaturrecherche zur Recyclingfähigkeit von FRP-Bewehrungen zeigte Forschungstätigkeiten und einen kleinen Markt auf. Im Rahmen von FRP-Recycling wird in vier Prozessschritte unterteilt: Abbruch, Sortierung, Aufbereitung und Wiederverwertung. Die meisten Informationen wurden zum Recycling von nicht-baurelevanten CFRP Elementen wie auch dem Recycling von textiler Bewehrung aus CFRP gefunden. Die im Rahmen von dem Forschungsprojekt durchgeführten Großversuche lieferten weitere wichtige Erkenntnisse zum Abbruch und Sortierung von Trägern mit unterschiedlichen CFRP-Bewehrungsstäben.



9.3. Ziel 3: Empfehlungsleitfaden zur Projektierung für Infrastrukturbauwerke mit nichtmetallischer Bewehrung

Alle unternommenen Forschungsarbeiten wurden mit dem Ziel der Erstellung des Empfehlungsleitfadens für mögliche Anwendungsbereiche von nichtmetallischer Bewehrung ausgeführt.

Das Hauptaugenmerk des Leitfadens liegt in der Bestimmung des Einsatzpotenzials und sinnvoller Einsatzgebiete für nichtrostende Bewehrung (CFRP-, GFRP-, BFRP- und Edelstahlbewehrung). Diese Bestimmung ist derzeitig in zwei Stufen gegliedert: (1) Vereinfachtes Verfahren zur Abschätzung des Einsatzpotentials und (2) Genaueres Verfahren zur Abschätzung des Einsatzpotentials. Stufe I beinhaltet Kriterien, die eine rasche und einfache Beurteilung der Eignung der eingesetzten Bewehrungsart ermöglichen, wobei zwischen Dauerhaftigkeit/Instandhaltung, Materialeffizienz, Beanspruchung und Herstellung unterteilt wird und Ausschlusskriterien spezifiziert sind. Ist die Bewertung überwiegend positiv so ist der Einsatz als sinnvoll zu erachten und eine weitere Begutachtung in Stufe II empfohlen. Stufe II beinhaltet genauere Beurteilung wie auch ökologische und ökonomische Kennwerte. Die Bewertungen in Stufe I und Stufe II werden durch eine Zusammenfassung von Entwurf und Bemessung von Bauteilen und Tragwerken mit nichtmetallischer Bewehrung wie auch einer Sammlung an Beispielen ergänzt.

Im Laufe der Bearbeitung der APs wurden erste Schritte in Richtung Dissemination und Forschungsaustausches unternommen. Das Symposium (AP3) mit dem gewählten Format (World Cafe Methode/Breakoutsessions Online) wurde sehr positiv aufgenommen. Im Rahmen des fib Symposiums 2021 "Concrete Structures: New Trends for Eco-Efficiency and Performance" das von 14. bis 16. Juni online stattfand, wurde das Paper mit dem Titel "Potential fields of application for CFRP reinforcement in concrete infrastructure engineering: Material availability, application areas and static parametric study with consideration of the GWP" präsentiert. Ein weiteres Paper mit dem Titel "Application potential of textile reinforcement in concrete infrastructure" wurde im Rahmen des IABSE Congress Ghent 2021 im September präsentiert. Ein Review Paper über nichtmetallische Bewehrung im Betonbau mit dem Titel "A review on embedded fibre-reinforced polymer reinforcement in structural concrete in Europe" wurde in Construction and Building Material, Volume 307 (<u>https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124946</u>) publiziert. Es kann davon ausgegangen werden, dass weitere Paper im speziellen zu AP5 und AP6 folgen.







9.4. Erkenntnisse und Ausblick

Im Zuge des Forschungsprojektes konnten wesentliche Erkenntnisse gesammelt werden, die auf das **Anwendungspotential** von nichtmetallischer Bewehrung im Infrastrukturbau schließen lassen:

- Es ist eine breite Verfügbarkeit von nichtmetallischen Bewehrungen in unterschiedlichen Kombinationen an Faser- und Matrixmaterial vorhanden. Darüber hinaus gibt es unterschiedlichste Herstellungsmethoden, die die mechanischen Kennwerte des Endproduktes beeinflussen. Damit können den Anforderungen entsprechenden Produkte bestellt werden. Diese z.T. stark unterschiedlichen Produkteigenschaften der Hersteller sind aber auch als Herausforderung zu nennen, da eine entsprechende Vertrautheit mit nichtmetallischen derzeit noch gering ist.
- Prinzipiell ist bei der Verwendung von nichtmetallischen Bewehrungen mit höheren Errichtungskosten zu rechnen, die je nach Bewehrungsmaterial und Bauteil von wenigen Prozent bis zu einem Vielfachen der stahlbewehrten Variante betragen. Speziell carbonbewehrte Bauteile sind teuer und ressourcenintensiv in der Herstellung. Es ist demnach auf ein effizientes Design und eine optimale Ausnutzung der Bewehrung Acht zu geben, um die Kostenerhöhung in Grenzen zu halten. Eine Hybride Bewehrungsanordnung kann einen effizienten Mittelweg darstellen.
- Bei der Betrachtung des Lebenszyklus von einzelnen Infrastrukturbauwerken zeigte sich vor allem ein ökonomisches Potential beim Einsatz von Bewehrung aus Glas- und Basaltfaser. Die hohen Anschaffungskosten sowie der fehlende flächendeckende Recyclingkreislauf spricht zum heutigen Tage eher gegen den Einsatz von Carbonfasern auf Basis von ökonomischen Betrachtungen. Es werden diesbezüglich von den Autoren nähere Untersuchungen mit optimierten Querschnitten empfohlen um eine klare Aussage treffen zu können.
- FRP-bewehrte Betonbauteile weisen in vielen Fällen einen geringeres Treibhauspotential auf als eine stahlbewehrte Variante. Dies ist speziell für Glas- und Basaltbewehrungen der Fall. Durch Verwendung von an die Bewehrung angepasste Betonrezepturen ist Potential für eine weitere Senkung des GWP vorhanden.

Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen können folgende **Anwendungsbereiche** definiert werden:





- Kleine Bauteile mit geringen Belastungen wie z.B. Bahnsteigkanten oder Lärmschutzwände. In diesen Fällen hat die erforderliche Betondeckung einen erheblichen Einfluss auf die Gesamtmasse des Tragwerks. Bei Verwendung von nichtmetallischen Bewehrungen kann diese geringer ausfallen wodurch Bauteilmassen signifikant reduziert werden und darüber hinaus Montage- und Transportkosten geringer ausfallen. Für diese Bauteile bieten sich speziell Textilbewehrungen an, da diese einen geringen Bewehrungsdurchmesser bei gleichzeitig hohen mechanischen Kennwerten aufweisen. Dadurch ist ein besonders materialeffizientes Design möglich.
- Größere Bauteile mit korrosionsgefährdeten Bereichen wie z.B. Winkelstützmauern. Die Stahlbewehrung wird entweder ganz oder lokal in den gefährdeten Bereichen durch eine FRP-Bewehrung ersetzt wodurch über den Lebenszyklus betrachtet Kosten und Treibhauspotential reduziert wird. Speziell hybride Lösungen mit Stahl/Glas und Stahl/Basalt Bewehrungen bieten sich an, da dadurch auch die Kosten bei Errichtung geringgehalten werden können. Auf der anderen Seite kann das Treibhauspotential durch die Verwendung von FRP-Bewehrungen in vielen Fällen bereits in der Errichtung reduziert werden.
- Besonders bei Bauteilen, welche nur einen Bruchteil der Kosten bei der Errichtung des Bauwerks ausmachen, aber aufgrund ihrer Dauerhaftigkeitseigenschaften (z.B. Bahnsteigkante) kritisch für die Lebensdauer des Bauwerks sein können ist ein erhöhtes ökonomisches Potential gegeben. Ebenso bei Bauteilen, bei welchen durch Schäden bei nichtinspizierbaren Bewehrungslagen die Lebensdauer herabgesetzt werden kann (z.B. Rückwand der Stützmauer).

Damit lässt sich ein breites Anwendungspotential von nichtmetallischen Bewehrungen im Beton-Infrastrukturbau ableiten. **Weitere Arbeiten** sind notwendig um die Technologie in Österreich einzuführen und das Potential auch auszuschöpfen:

 Die Bemessung und das Design von Bauteilen mit nichtmetallischen Bewehrungen nach Regelwerken ist prinzipiell möglich. Internationale sowie auch nationale Regelwerke sind vorhanden, unterscheiden sich aber z.T. stark. Darüber hinaus sind im europäischen Raum die Regelungen im Vergleich zum nordamerikanischen Raum veraltet und spiegeln nicht immer den derzeitigen Wissensstand wieder. Es ist geplant in der neuen EC2 Generation auch einen informativen Anhang zu inkludieren der Bemessungsregeln für Bauteile mit nichtmetallischen Bewehrungen inkludiert. Dieser ist nach derzeitigem Wissenstand aber sehr konservativ und gestaltet und in einigen Passagen nicht direkt auf Textilbewehrungen übertragbar. Um die Akzeptanz von nichtmetallischen Bewehrungen in der Baubranche zu



erhöhen ist daher anzudenken auch im österreichischen Raum eine Richtlinie zur Bemessung von Bauteilen mit nichtmetallischen Bewehrungen zu erarbeiten.

- Carbonbewehrung weist prinzipiell die besten Materialeigenschaften auf, ist aber teuer und energieintensiv in der Herstellung. Eine direkte Übertragung der Bemessungsphilosophie aus dem Stahlbetonbau auf carbonbewehrte Bauteile würde unweigerlich zu ineffizienten Strukturen führen. Bauteile die mit Carbon bewehrt sind müssen demnach gesondert betrachtet werden und unterliegen einer eigenen Designphilosophie. Weiterführende Überlegungen und Untersuchungen in diese Richtung sind anzustreben. Ein flächendeckender Einsatz scheint aber aus bereits oben genannten Gründen aus derzeitiger Sicht nicht gegeben.
- Verschieden Beteiligte in der Baubranche, reichend von Bauherren bis Ingenieur*innen und Architekt*innen müssen mit nichtmetallischen Bewehrungen vertraut werden. Dazu besteht die Notwendigkeit erste Projekte in Österreich unter Anwendung dieses Bewehrungstypus umzusetzen. Mit den gesammelten Erfahrungen konnte das Einsatzpotential geschärft und ein klareres Bild z.B. zu den Aufwänden, der Funktionsweise und den Herstellungskosten gegeben werden. Dies erscheint insofern auch wichtig, um nicht den Anschluss an Nachbarländer zu verlieren, wo bereits umfangreich nichtmetallische Bewehrungen in der Praxis eingesetzt wird.







ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Darstellung eines Vorabzuges der untersuchten Bauteile bzw. Bauwerke9
Abbildung 2: Übersicht der Ziele und der zugehörigen Arbeitspakete
Abbildung 3: Verfügbare ein-, zwei- und dreidimensionale nichtmetallische Bewehrungen: Zusammensetzung gegliedert nach Faser und Matrix, Oberflächenbehandlung und Hersteller inkl. Herkunftsland mit Fokus auf Europa
Abbildung 4: 1D Bewehrung mit unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen. (a) CFRP Stab – gefräst – thyssenkrupp C4R, (b) CFRP Stab – umwickelt mit Carbon Roving – solidian REBAR CCE, (c) CFRP Stab – umwickelt mit einem flachen Carbonroving – solidian REBAR CCE, (d) GFRP Stab – umwickelt mit eingedrehten Basaltroving – soldian REBAR RBE, (e) GFRP Stab – sandbeschichtet – Galen Ltd ROCKBAR®, (f) BFRP Stab – sandbeschichtet – Galen Ltd ROCKBAR®, (g) BFRP Stab– umwickelt mit einem Faden – ReforceTech AS BasBars [™] , (h) BFRP Stab – umwickelt mit einem Faden – ReforceTech AS BasBars [™]
Abbildung 5: BFRP Bügel – sandbeschichtet – Galen Ltd ROCKBAR®
Abbildung 6: 2D und 3D Bewehrungselemente. (a) 2D CFRP Textil – gewirkt – Hitexbau GmbH HTC 10/15-40, (b) 2D CFRP Textil – gewirkt – solidian Q142/142- CCE-38, (c) 2D CFRP Textil – gewirkt – SIT Wilhelm Kneitz GmbH SITgrid0051P, (d) zwei verschiede 2D Matten aus 1D BFRP Stäben– verbunden mit Kupplungsstücken – Galen Ltd ROCKMESH®, (e) 2D GFRP textile – knitted – SIT Wilhelm Kneitz GmbH SITgrid200, (f) 3D GFRP/CFRP Textil – gewirkt – SIT Wilhelm Kneitz GmbH SITgrid031, (g) 3D GFRP Textil – gewirkt – SIT Wilhelm Kneitz GmbH SITgrid702, (h) 2D GFRP Textil/Matte – gewebt – Imperatyv LIGHTmesh®
Abbildung 7: Zugfestigkeit-E-Modul- Verhältnis der nichtmetallischen Bewehrungen der europäischen Hersteller
Abbildung 8: Vergleich des Verbundes in Abhängigkeit des Schlupfes von unterschiedlichen Bewehrungsarten mit unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen (basierend auf Werten aus der Literatur [62]–[64])
Abbildung 9: Beispiele für Referenzprojekte mit FRP-Bewehrung: (a) Fußgängerbrücke, Deutschland, bewehrt mit 2D-CFRP-Bewehrung (© soldian GmbH) (b) Schulprojekt in Oksenoya, Norwegen, bewehrt mit BFRP- Bewehrungsstäben (ReforceTech) (c) Conrad-Observatorium, Schweiz, bewehrt mit GFRP-Bewehrungsgittern aus Stäben (FiReP), die aufgrund der Notwendigkeit, magnetische Materialien zu vermeiden, verwendet wurden
Abbildung 10: Mehrstufiger Aufbau eines Knowledge-Hubs
Abbildung 11: Potentielle Einsatzfelder von nichtmetallischer Bewehrung im Infrastrukturbau
Abbildung 12: Einleitende Umfrage unter den Teilnehmern des Symposiums
Abbildung 13: Darstellung der Grenzkurve zur Erfüllung der Biegetragfähigkeit







Abbildung 14: Darstellung der Grenzkurve zur Erfüllung des Verformungsnachweises46
Abbildung 15: Darstellung der Grenzkurven zur Erfüllung der Spannungsnachweise47
Abbildung 16: Darstellung der Grenzkurve zur Erfüllung des Rissbreitennachweises48
Abbildung 17: Verknüpfung der Grenzkurven mit ökologischen und ökonomischen Kennzahlen49
Abbildung 18: Untersuchtes Rahmentragwerk: Längsschnitt (links) und Querschnitt (rechts)
Abbildung 19: Untersuchtes Rahmentragwerk: Einwirkungen in Lastkombination 1 (oben) und Lastkombination 2 (unten)53
Abbildung 20: Grenzkurven der Rahmenbrücke und Darstellung des damit verknüpften GWP und der Kosten für (a) betonstahlbewehrt, (b) CFRP-bewehrt, (c) GFRP bewehrt und (d) BFRP bewehrt54
Abbildung 21: Untersuchte Einfeldträgerbrücke: Längsschnitt (links) und Querschnitt (rechts)
Abbildung 22: Untersuchte Einfeldträgerbrücke: Einwirkungen in Lastkombination 1 (links) und Lastkombination 2 (rechts)56
Abbildung 23: Grenzkurven der Einfeldbrücke und Darstellung des damit verknüpften GWP und der Kosten für (a) betonstahlbewehrt, (b) CFRP-bewehrt, (c) GFRP bewehrt und (d) BFRP bewehrt57
Abbildung 24: Untersuchte Winkelstützmauer: Abmessungen (links) und Belastungen (rechts)
Abbildung 25: Grenzkurven der Winkelstützmauer und Darstellung des damit verknüpften GWP und der Kosten für (a) betonstahlbewehrt, (b) CFRP-bewehrt, (c) GFRP bewehrt und (d) BFRP bewehrt59
Abbildung 26: Untersuchte Bahnsteigkante: Abmessungen (links) und Belastungen (rechts)61
Abbildung 27: Grenzkurven der Bahnsteigkante und Darstellung des damit verknüpften GWP und der Kosten für (a) betonstahlbewehrt, (b) CFRP-bewehrt, (c) GFRP bewehrt und (d) BFRP bewehrt62
Abbildung 28: Untersuchtes Lärmschutzwand-Sockelelement: (a) Abmessungen und (b) Belastungen64
Abbildung 29: Grenzkurven des Sockelelements und Darstellung des damit verknüpften GWP und der Kosten für (a) betonstahlbewehrt, (b) CFRP-bewehrt, (c) GFRP bewehrt und (d) BFRP bewehrt65
Abbildung 30: Untersuchter Randbalken: Querschnitt It. Regelplanung (links) und vereinfachter Querschnitt (rechts)66
Abbildung 31: Darstellung von Lebenszyklusphasen bzw. Modulen für die Nachhaltigkeitsbewertung von Bauwerken, in Anlehnung an ÖNORM EN 15804 [120]

[NIMETBEW]







Abbildung 32: Normierter Vergleich des GWP der Faser anhand der Umweltdaten nach Tabelle 1177	7
Abbildung 33: Normierter Vergleich des GWP der Matrixmaterialien anhand der Umweltdaten nach Tabelle 1177	7
Abbildung 34: Normierter Vergleich des GWP pro kg Endmaterial anhand der Umweltdaten nach Tabelle 1178	3
Abbildung 35: Normierter Vergleich des GWP pro Festigkeit N/mm² des Endmaterials anhand der Umweltdaten nach Tabelle 1178	3
Abbildung 36: Berechnungsergebnisse einer Rahmenbrücke in Stahlbetonbauweise gemäß RVS 15.02.31 [160]93	3
Abbildung 37: Massenermittlung für die Errichtung und zugrunde gelegte Alterungsmodelle für die Lebenszykluskostenanalyse94	1
Abbildung 38: Massenermittlung für die Betriebsphase für die Lebenszykluskostenanalyse94	1
Abbildung 39: Lebenszykluskosten mit der Barwertmethode (Nutzungsdauer 100 Jahre, Preisgleitung 2.5 % und Diskontierungssatz 4 %)97	7
Abbildung 40: Kostenvergleich nach Barwertmethode für verschiedene Diskontierungszinssätze97	7
Abbildung 41: Kostenvergleich einer Glasfaserbrücke (ND 120 Jahre) und einer Stahlbetonbrücke (ND 100 Jahre); Preisgleitung 2,5 %; Diskontierungszinssatz 4 %)
Abbildung 42: Kostenvergleich nach Barwertmethode für verschiedene Diskontierungszinssätze und unterschiedliche Nutzungsdauern)
Abbildung 43: Kostenvergleich nach Annuitätenmethode für verschiedene Diskontierungszinssätze und unterschiedliche Nutzungsdauern)
Abbildung 44: Beispiel zur Bemessung einer Winkelstützmauer nach [162]101	i
Abbildung 45: Lebenszykluskosten mit der Barwertmethode (Nutzungsdauer 70 Jahre, Preisgleitung 2.5 % und Diskontierungssatz 4 %)104	1
Abbildung 46: Kostenvergleich nach Barwertmethode für verschiedene Diskontierungszinssätze	1
Abbildung 47: Kostenvergleich einer Variante mit Glasfaserbewehrung (ND 85 Jahre) und einer Betonstahl (ND 70 Jahre); Preisgleitung 2,5 %; Diskontierungszinssatz 4 %	5
Abbildung 48: Kostenvergleich nach Barwertmethode für verschiedene Diskontierungszinssätze und unterschiedliche Nutzungsdauern	3
Abbildung 49: Kostenvergleich nach Annuitätenmethode für verschiedene Diskontierungszinssätze und unterschiedliche Nutzungsdauern	3
Abbildung 50: Mittelbahnsteig mit konventioneller Bahnsteigkante UB5 nach ÖBB Regeplanung	3













Abbildung 70: Bi (Bild erstellt in A	iegetragfähigkeit unter Annahme eine linearen Spannungsverlaufes nlehnung an [204])	. 132
Abbildung 71: des Bewehrungs und Beton	Biegetragfähigkeit eines Rechteckquerschnittes in Abhängigkeit sgrades und der mechanischen Verhältnisse zwischen Bewehrung 134	
Abbildung 72: Verhältnisses Er	Abminderung der Biegetragfähigkeit in Abhängigkeit des / Ec	. 134
Abbildung 73: unterschiedliche des Betons.	Zulässige I/d Verhältnisse für einen Einfeldträger mit m Verhältnis der E-Moduln und Festigkeiten der Bewehrung und 136	
Abbildung 74: Verhältnis der E	Zulässige I/d Verhältnisse für einen Kragarm mit unterschiedlichem -moduln und Festigkeiten der Bewehrung und des Betons	. 137
Abbildung 75: Verhältnis der E	Zulässige I/d Verhältnisse für einen Kragarm mit unterschiedlichem -Moduln und Festigkeiten der Bewehrung und des Betons	. 138
Abbildung 76: Spannung in der	Zulässiger Bewehrungsdurchmesser in Abhängigkeit der Bewehrung	. 139
Abbildung 77: Rissbreitenbegre	Abminderung des zulässigen Durchmessers zur enzung in Abhängigkeit des E-Moduls der Bewehrung	. 140
Abbildung 78: der Bewehrung ı	Spannungen im Beton in Abhängigkeit der Materialeigenschaften und des Betons und der Geometrie des Querschnittes	. 141







TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Mechanischen Eigenschaften der unterschiedlichen Fasermaterialien [29]	16
Tabelle 2: Mechanischen Eigenschaften der unterschiedlichen Tränkungsmaterialien [42]–[46]	18
Tabelle 3: Übersicht der mechanischen Eigenschaften der Produkte der europäischen Hersteller mit Unterscheidung basierend auf Bewehrungsart, Dimensionierung, Faser und Tränkung	26
Tabelle 4: Exemplarische Benchmarkwerte für Betoninstandsetzung	36
Tabelle 5: Regelwerke zu Design und Bemessung von FRP-bewehrten Betonbauteilen, die im Zuge des Forschungsprojektes verglichen wurden	40
Tabelle 6: Kennwerte der in der Parameterstudie verwendeten Bewehrungen	50
Tabelle 7: Kennwerte der in der Parameterstudie verwendeten Betone	51
Tabelle 8: erforderliche Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreiten aus Zwang am Beispiel eines Randbalkens	67
Tabelle 9: Ausgewählte Begriffe des Umweltmanagements aus ÖNORM EN ISO 14050 [115]	70
Tabelle 10: Begriffsbeispiele der Ökobilanzierung am Beispiel von 1 kg Polyacrylnitril-Faser (Hauptbestandteil der Carbonfaser), in Anlehnung an ÖNORM EN ISO 14044 [116]	71
Tabelle 11: Übersicht der extrahierten Umweltdaten für Faser-, Matrixmaterialien und faserverstärkte Kunststoffe (Angabe der Datenquellen in den Fußnoten). Wirkungsindikatoren pro kg Produkt	74
Tabelle 12: Preistabelle für verschiedene Bewehrungstypen (beigestellt)	90
Tabelle 13: Errichtungskosten der Brücke mit unterschiedlichen Bewehrungsvarianten	95
Tabelle 14: Lebenszykluskosten der Brücke mit unterschiedlichen Bewehrungsvarianten mit dem Zinsniveau laut RVS	96
Tabelle 15: Nutzungsdauer zur Ermittlung vom Restwert	98
Tabelle 16: Erneuerungskosten einer Winkelstützmauer mit unterschiedlichen Bewehrungsvarianten	102
Tabelle 17: Lebenszykluskosten der Winkelstützmauer mit unterschiedlichen Bewehrungsvarianten mit dem Zinsniveau laut RVS	103
Tabelle 18: Erneuerungskosten eines Mittelbahnsteiges mit unterschiedlichen Bewehrungsvarianten.	108
Tabelle 19: Anbieter von Aufbereitungsverfahren für faserverstärkte Kunststoffe [181]–[189]	117
Tabelle 20: Versuchsplan Zerkleinerungsversuche	. 121







Tabelle 21: Stufe I zur Abschätzung des Einsatzes von BST, CFRP, GFRP, BFRP und Edelstahl (ER) Bewehrung	130
Tabelle 22: Ökologische Kennzahlen verschiedener Bewehrungsmaterialien pro kg Baustoff	142
Tabelle 23: Ökonomische Kennzahlen verschiedener Bewehrungsmaterialien pro kg Baustoff	142







LITERATURVERZEICHNIS

- P. Mark und P. Neugebauer, Erhalt unserer Bausubstanz: Zentrale Forschungsaufgabe mit modernen Methoden. Brill Schöningh, 2019. Zugegriffen: Dez. 15, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://brill.com/view/title/51749
- [2] M. Schlaich, B. Zwingmann, Y. Liu, und R. Goller, "Zugelemente aus CFK und ihre Verankerungen", *Bautechnik*, Bd. 89, Nr. 12, S. 841–850, Dez. 2012, doi: 10.1002/bate.201200057.
- [3] A. Stark, M. Classen, und J. Hegger, "Bond behaviour of CFRP tendons in UHPFRC", *Engineering Structures*, Bd. 178, S. 148–161, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.10.002.
- [4] A. Younes, A. Seidel, S. Rittner, C. Cherif, und R. Thyroff, "Innovative textile Bewehrungen für hochbelastbare Betonbauteile", *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 110, Nr. S1, S. 16–21, 2015, doi: 10.1002/best.201400101.
- [5] F. Knab, A. Weber, und J. Schweinfurth, "Sicherer Einsatz von Glasfaserbewehrung im Bauwesen: Hinweise und Anwendungsbeispiele f
 ür die Praxis", *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 110, Nr. 12, S. 822–831, Dez. 2015, doi: 10.1002/best.201500060.
- [6] M. Kirsten, C. Freudenberg, und C. Cherif, "Carbonfasern, der Werkstoff des 21. Jahrhunderts: Textile Ausgangsbasis für filigrane hochtragende Betonbauteile", *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 110, Nr. S1, S. 8–15, Jan. 2015, doi: 10.1002/best.201400105.
- [7] S. Hofmann, T. Proske, und C.-A. Graubner, "Verbundverhalten besandeter basaltfaserverstärkter Kunststoffbewehrung", *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 115, Nr. 7, S. 514–522, 2020, doi: 10.1002/best.201900076.
- [8] T. Helbig, K. Unterer, C. Kulas, S. Rempel, und J. Hegger, "Fuß- und Radwegbrücke aus Carbonbeton in Albstadt-Ebingen: Die weltweit erste ausschließlich carbonfaserbewehrte Betonbrücke", *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 111, Nr. 10, S. 676–685, Okt. 2016, doi: 10.1002/best.201600058.
- [9] S. Kueres, N. Will, und J. Hegger, "Flexural design of a modular footbridge system with pretensioned carbon fiber reinforced polymer reinforcement", *Structural Concrete*, Bd. 20, Nr. 6, S. 1858–1870, Dez. 2019, doi: 10.1002/suco.201900047.
- [10] C. Burgoyne, "Does FRP have an economic future?", gehalten auf der ACMBS MCAPC IV, Calgary, Alberta, 2004. Zugegriffen: Juli 31, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.semanticscholar.org/paper/ACMBS-MCAPC-IV-DOES-FRP-HAVE-AN-ECONOMIC-FU-TURE-Burgoyne/c6a46c418dcf6029505b6d775221354a0b6335ce
- [11] I. Balafas und C. J. Burgoyne, "Economic design of beams with FRP rebar or prestress", *Magazine of Concrete Research*, Bd. 64, Nr. 10, S. 885–898, Okt. 2012, doi: 10.1680/macr.11.00099.
- [12] N. Stoiber und B. Kromoser, "Grundlagen und Beispiele zur Nachhaltiskeitsbewertung von Carbonbetonbauteilen", gehalten auf der 11. carbon- und Textilbetontage, Dresden, Deutschland, Sep. 24, 2019.
- [13] C. J. Burgoyne, "Advanced Composites in Civil Engineering in Europe", null, Bd. 9, Nr. 4, S. 267–273, Nov. 1999, doi: 10.2749/101686699780481682.
- [14] L. R. Taerwe, "FRP Developments and Applications in Europe", in *Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, A. NANNI, Hrsg. Oxford: Elsevier, 1993, S. 99–114. doi: 10.1016/B978-0-444-89689-6.50009-4.







- [15] A. Nanni, "North American design guidelines for concrete reinforcement and strengthening using FRP: principles, applications and unresolved issues", *Construction and Building Materials*, Bd. 17, Nr. 6, S. 439–446, Sep. 2003, doi: 10.1016/S0950-0618(03)00042-4.
- [16] T. Ueda, "FRP for Construction in Japan and its Future", gehalten auf der ACECON 2005, Mumbai, India, 25.09 2005.
- [17] J. Hegger, M. Horstmann, S. Voss, und N. Will, "Textilbewehrter Beton: Tragverhalten, Bemessung und Anwendung", *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 102, Nr. 6, S. 362–370, Juni 2007, doi: 10.1002/best.200700552.
- [18] M. Lieboldt, M. Tietze, und F. Schladitz, "C³-Projekt Erfolgreiche Partnerschaft f
 ür Innovation im Bauwesen", *Bauingenieur*, Bd. 93, Nr. 7/8, S. 265–273, 2018.
- [19] M. Curbach und F. Jesse, "Eigenschaften und Anwendung von Textilbeton", Beton- und Stahlbetonbau, Bd. 104, Nr. 1, S. 9–16, Jan. 2009, doi: 10.1002/best.200800653.
- [20] D. Ehlig, F. Schladitz, M. Frenzel, und M. Curbach, "Textilbeton Ausgeführte Projekte im Überblick", *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 107, Nr. 11, S. 777–785, 2012, doi: 10.1002/best.201200034.
- [21] H. Burkhardt, A. Keller, und G. Schwegler, "Stahlbetonverbund-Bruecke mit CFK-Spannkabeln. Rad-/Gehwegbruecke ueber die Kleine Emme", *undefined*, 1999, Zugegriffen: Dez. 15, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.semanticscholar.org/paper/Stahlbetonverbund-Bruecke-mit-CFK-Spannkabeln.-die-Burkhardt-Keller/37cd18e653d59b0b9aba09d4f4451155d95dfb53
- [22] N. Grace, F. Navarre, R. Nacey, W. Bonus, und L. Collavino, "Design-Construction of Bridge Street Bridge - First CFRP Bridge in the United States", *PCI Journal*, Bd. 47, Nr. 5, 2002, doi: 10.15554/pcij.09012002.20.35.
- [23] ACI 440, "ACI 440.4R-04: Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons", American Concrete Institute (ACI), 2011.
- [24] CSA S806-12, "Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers", Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers, 2017.
- [25] Fédération Internationale du Béton (fib), "FRP reinforcement in RC structures", Lausanne, Switzerland, fib Bulletin 40, 2007.
- [26] H. E. Nystrom, S. E. Watkins, A. Nanni, und S. Murray, "Financial Viability of Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bridges", *Journal of Management in Engineering*, Bd. 19, Nr. 1, S. 2–8, Jan. 2003, doi: 10.1061/(ASCE)0742-597X(2003)19:1(2).
- [27] N. Williams Portal, K. Lundgren, H. Wallbaum, und K. Malaga, "Sustainable Potential of Textile-Reinforced Concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Bd. 27, Nr. 7, S. 04014207, Juli 2015, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001160.
- [28] F. Micelli und A. Nanni, "Durability of FRP rods for concrete structures", Construction and Building Materials, Bd. 18, Nr. 7, S. 491–503, Sep. 2004, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2004.04.012.
- [29] C. Freudenberg, "Textile Faserstoffe", in *Textile Werkstoffe für den Leichtbau: Techniken Ver-fahren Materialien Eigenschaften*, C. Cherif, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, S. 39–109. doi: 10.1007/978-3-642-17992-1_3.







- [30] J. Sim, C. Park, und D. Y. Moon, "Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures", *Composites Part B: Engineering*, Bd. 36, Nr. 6–7, S. 504–512, Jan. 2005, doi: 10.1016/j.compositesb.2005.02.002.
- [31] P. Purnell, N. R. Short, C. L. Page, und A. J. Majumdar, "Microstructural observations in new matrix glass fibre reinforced cement", *Cement and Concrete Research*, Bd. 30, Nr. 11, S. 1747– 1753, Nov. 2000, doi: 10.1016/S0008-8846(00)00407-5.
- [32] R. Sen, M. Shahawy, J. Rosas, und S. Sukumar, "Durability of Aramid Pretensioned Elements in a Marine Environment", *SJ*, Bd. 95, Nr. 5, 1998, doi: 10.14359/572.
- [33] P. Preinstorfer, Zur Spaltrissbildung von textilbewehrtem Beton. TU Wien Academic Press, 2020. doi: 10.34727/2020/ISBN.978-3-85448-034-1.
- [34] T. Büttner, J. Orlowsky, und M. Raupach, "Erhöhung der Dauerhaftigkeit textiler Beton-Bewehrungen durch Epoxidharztränkung", *Bautechnik*, Bd. 88, Nr. 5, S. 263–270, Mai 2011, doi: 10.1002/bate.201101460.
- [35] A. Nanni, A. De Luca, und H. J. Zadeh, *Reinforced Concrete with FRP Bars-Mechanics and Design*, 1. Aufl. USA: CRC Press, 2014.
- [36] J. Ramôa Correia, "9 Pultrusion of advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites", in Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications, J. Bai, Hrsg. Woodhead Publishing, 2013, S. 207–251. doi: 10.1533/9780857098641.2.207.
- [37] J. K. Fink, *Reactive Polymers: Fundamentals and Applications A Concise Guide to Industrial Polymers*. William Andrew, Elsevier, 2018. doi: 10.1016/C2017-0-01641-5.
- [38] D. Distler, *Wässrige Polymerdispersionen: Synthese, Eigenschaften, Anwendungen*, 1., Edition. Weinheim: Wiley-VCH, 1998.
- [39] M. Biron, A Practical Guide to Plastics Sustainability: Concept, Solutions, and Implementation. William Andrew, Elsevier, 2020.
- [40] C. Kulas, *Zum Tragverhalten getränkter textiler Bewehrungselemente für Betonbauteile*, 1. Aufl. Aachen: IMB, 2013.
- [41] S. B. Singh, S. Vummadisetti, und H. Chawla, "Influence of curing on the mechanical performance of FRP laminates", *Journal of Building Engineering*, Bd. 16, S. 1–19, März 2018, doi: 10.1016/j.jobe.2017.12.002.
- [42] M. Neitzel, P. Mitschang, und U. Breuer, *Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*, 2. edition. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014.
- [43] I. V. K. e.V. AVK, Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen, 4. Aufl. Springer Vieweg, 2013. doi: 10.1007/978-3-658-02755-1.
- [44] M. Idrees und R. Nazar, "Effect of SBR on Physical and Mechanical Properties of Concrete", Turkey, 2019.
- [45] P. Rajaee, F. Ashenai Ghasemi, M. Fasihi, und M. Saberian, "Effect of styrene-butadiene rubber and fumed silica nano-filler on the microstructure and mechanical properties of glass fiber reinforced unsaturated polyester resin", *Composites Part B: Engineering*, Bd. 173, S. 106803, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.05.014.
- [46] G. W. Ehrenstein, *Polymer-Werkstoffe: Struktur Eigenschaften Anwendung*, 3., Vollständig überarbeitete edition. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2011.





ASFINAG

- [47] ACI 440, "Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars", American Concrete Institute, ACI 440.1R-15, 2015.
- [48] T. F. Starr, *Pultrusion for engineers*. Cambridge, England: Woodhead Publishing, 2000.
- [49] V. M. Karbhari, *Use of Composite Materials in Civil Infrastructure in Japan*. Maryland: World Technology (WTEC) Division, 1998.
- [50] R. Böhm, M. Thieme, D. Wohlfahrt, D. S. Wolz, B. Richter, und H. Jäger, "Reinforcement Systems for Carbon Concrete Composites Based on Low-Cost Carbon Fibers", *Fibers*, Bd. 6, Nr. 3, S. 56, Aug. 2018, doi: 10.3390/fib6030056.
- [51] E. Shehata, R. Morphy, und S. Rizkalla, "Fibre reinforced polymer shear reinforcement for concrete members: behaviour and design guidelines", *Candian Journal of Civil Engineering*, Bd. Volume 27, Nr. Number 5, Okt. 2000, doi: https://doi.org/10.1139/100-004.
- [52] J. Hausding, E. Lorenz, R. Ortlepp, A. Lundahl, und C. Cherif, "Application of stitch-bonded multi-plies made by using the extended warp knitting process: reinforcements with symmetrical layer arrangement for concrete", *null*, Bd. 102, Nr. 8, S. 726–738, Aug. 2011, doi: 10.1080/00405000.2010.515729.
- [53] M. Egger und J. Feix, "Gestickte textile Bewehrungen für die Beton-Leichtbauweise", in *eiträge zur 5. DAfStb-Jahrestagung mit 58. Forschungskolloquium - Forschungskolloquium Band 1*, TU Kaiserslautern, 2017, S. 110–121.
- [54] A. Peled, A. Bentur, und D. Yankelevsky, "Woven fabric reinforcement of cement matrix", Advanced Cement Based Materials, Bd. 1, Nr. 5, S. 216–223, Juli 1994, doi: 10.1016/1065-7355(94)90027-2.
- [55] P. Betz, A. Schumann, S. Scheerer, und M. Curbach, "Carbon rebars in construction Part 5: Factors influencing bond behavior", *Beton- und Stahlbetonbau*, S. best.202100035, Juli 2021, doi: 10.1002/best.202100035.
- [56] R. K. and F. D. C. y B. Alvaro Ruiz Emparanza, "State-of-the-Practice of Global Manufacturing of FRP Rebar and Specifications", *ACI Symposium Publication*, Bd. 327, Jan. 2018.
- [57] F. Ceroni, E. Cosenza, M. Gaetano, und M. Pecce, "Durability issues of FRP rebars in reinforced concrete members", *Cement and Concrete Composites*, Bd. 28, Nr. 10, S. 857–868, Nov. 2006, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2006.07.004.
- [58] G. Wu, X. Wang, Z. Wu, Z. Dong, und Q. Xie, "Degradation of basalt FRP bars in alkaline environment", *Science and Engineering of Composite Materials*, Bd. 22, Nr. 6, Jan. 2015, doi: 10.1515/secm-2014-0040.
- [59] A. Spelter, S. Bergmann, J. Bielak, und J. Hegger, "Long-Term Durability of Carbon-Reinforced Concrete: An Overview and Experimental Investigations", *Applied Sciences*, Bd. 9, Nr. 8, S. 1651, Apr. 2019, doi: 10.3390/app9081651.
- [60] J. J. M. Ali F. Al-Khafaji and Antonio Nanni, "Assessment Study of Glass Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement Used in Two Concrete Bridges after More than 15 Years of Service", *ACI Materials Journal*, Bd. 117, Nr. 5, Jan. 2020, doi: 10.14359/51725980.
- [61] M. Tavakkolizadeh und H. Saadatmanesh, "Galvanic Corrosion of Carbon and Steel in Aggressive Environments", J. Compos. Constr., Bd. 5, Nr. 3, S. 200–210, Aug. 2001, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2001)5:3(200).







- [62] B. Kromoser, P. Preinstorfer, und J. Kollegger, "Building lightweight structures with carbonfiber-reinforced polymer-reinforced ultra-high-performance concrete: Research approach, construction materials, and conceptual design of three building components", *Structural Concrete*, Nov. 2018, doi: 10.1002/suco.201700225.
- [63] P. Preinstorfer, B. Kromoser, und J. Kollegger, "Kategorisierung des Verbundverhaltens von Textilbeton", *Bauingenieur*, Bd. 94, Nr. 11, S. 416–424, 2019.
- [64] A. Schumann, M. May, F. Schladitz, S. Scheerer, und M. Curbach, "Carbonstäbe im Bauwesen: Teil 2: Verbundverhalten – Verbundversuche an unterschiedlichen Carbonstäben", *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 115, Nr. 12, S. 962–971, Dez. 2020, doi: 10.1002/best.202000047.
- [65] S. Solyom und G. L. Balázs, "Bond of FRP bars with different surface characteristics", *Construction and Building Materials*, Bd. 264, S. 119839, Dez. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119839.
- [66] F. Suppanz und B. Kromoser, "Verbundverhalten subtraktiv bearbeiteter CFK-Stäbe in UHPC", *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 115, Nr. 7, S. 504–513, Juli 2020, doi: 10.1002/best.201900088.
- [67] A. Schumann, "Experimentelle Untersuchungen des Verbundverhaltens von Carbonstäben in Betonmatrices", Dissertation, TU Dresden, 2020.
- [68] M. Hammerl, N. Stoiber, J. Hämmerle, A. Shams, T. Bischoff, und B. Kromoser, "Verbundverhalten umwickelter CFK-Stäbe in Beton – Kurzzeituntersuchung der Verbundeigenschaften mittels Pull-out-Tests", *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 116, Nr. 12, S. 935–946, 2021, doi: 10.1002/best.202100079.
- [69] E. Nepomuceno, J. Sena-Cruz, L. Correia, und T. D'Antino, "Review on the bond behavior and durability of FRP bars to concrete", *Construction and Building Materials*, Bd. 287, S. 123042, Juni 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123042.
- [70] P. Preinstorfer und J. Kollegger, "New insights into the splitting failure of textile-reinforced concrete", *Composite Structures*, Bd. 243, S. 112203, Juli 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112203.
- [71] E. Lorenz, E. Schütze, F. Schladitz, und M. Curbach, "Textilbeton Grundlegende Untersuchungen im Überblick", *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 108, Nr. 10, S. 711–722, Okt. 2013, doi: 10.1002/best.201300041.
- [72] J. Bielak, A. Spelter, N. Will, und M. Claßen, "Verankerungsverhalten textiler Bewehrungen in dünnen Betonbauteilen", *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 113, Nr. 7, S. 515–524, Juli 2018, doi: 10.1002/best.201800013.
- [73] "abZ Carbon Concrete Composite e.V.", *C³ Carbon Concrete Composite*, 2021. https://www.bauen-neu-denken.de/abz/ (zugegriffen Dez. 13, 2021).
- [74] Benzecry Vanessa, Rossini Marco, Morales Carlos, Nolan Steven, und Nanni Antonio, "Design of Marine Dock Using Concrete Mixed with Seawater and FRP Bars", *Journal of Composites for Construction*, Bd. 25, Nr. 1, S. 05020006, Feb. 2021, doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001100.
- [75] E. Guades, T. Aravinthan, M. Islam, und A. Manalo, "A review on the driving performance of FRP composite piles", *Composite Structures*, Bd. 94, Nr. 6, S. 1932–1942, Mai 2012, doi: 10.1016/j.compstruct.2012.02.004.
- [76] Y. J. Kim, "State of the practice of FRP composites in highway bridges", *Engineering Structures*, Bd. 179, S. 1–8, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.10.067.







- [77] R. V. Balendran, T. M. Rana, T. Maqsood, und W. C. Tang, "Application of FRP bars as reinforcement in civil engineering structures", *Structural Survey*, Bd. 20, Nr. 2, S. 62–72, Mai 2002, doi: 10.1108/02630800210433837.
- [78] A. Manalo, B. Benmokrane, K.-T. Park, und D. Lutze, "Recent developments on FRP bars as internal reinforcement in concrete structures", *Concrete in Australia*, Bd. 40, Nr. 2, Art. Nr. 2, Juni 2014.
- [79] A. Asgharzadeh und M. Raupach, "Durability behavior of polymer impregnated carbon textiles in alkaline solution as CP anode", *Materials and Corrosion*, Bd. 70, Nr. 2, S. 345–356, Feb. 2019, doi: 10.1002/maco.201810098.
- [80] H. M. Mohamed, A. H. Ali, A. Hadhood, S. Mousa, W. Abdelazim, und B. Benmokrane, "Testing, design, and field implementation of GFRP RC soft-eyes for tunnel construction", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Bd. 106, S. 103626, Dez. 2020, doi: 10.1016/j.tust.2020.103626.
- [81] B. Kromoser und M. Ritt, "Optimierte Formen aus Textilbeton am Beispiel der Grillmöbel "Donauwelle ", *Bauingenieur*, Bd. 91, Nr. 2016, S. 425–433, 2016.
- [82] A. Scholzen, R. Chudoba, und J. Hegger, "Thin-walled shell structures made of textile-reinforced concrete: Part I: Structural design and construction", *Structural Concrete*, Bd. 16, Nr. 1, S. 106–114, März 2015, doi: 10.1002/suco.201300071.
- [83] E. Sharei, A. Scholzen, J. Hegger, und R. Chudoba, "Structural behavior of a lightweight, textile-reinforced concrete barrel vault shell", *Composite Structures*, Bd. 171, S. 505–514, Juli 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.03.069.
- [84] O. S. AlAjarmeh, A. C. Manalo, B. Benmokrane, K. Karunasena, W. Ferdous, und P. Mendis, "Hollow concrete columns: Review of structural behavior and new designs using GFRP reinforcement", *Engineering Structures*, Bd. 203, S. 109829, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.109829.
- [85] U. Al-Fakher *u. a.*, "Shear behaviour of hollow precast concrete-composite structures", *Mater Struct*, Bd. 54, Nr. 2, S. 84, Apr. 2021, doi: 10.1617/s11527-021-01618-9.
- [86] F. AL-mahmoud, A. Castel, R. François, und C. Tourneur, "Effect of surface pre-conditioning on bond of carbon fibre reinforced polymer rods to concrete", *Cement and Concrete Composites*, Bd. 29, Nr. 9, S. 677–689, Okt. 2007, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2007.04.010.
- [87] A. Sharda *u. a.*, "Axial compression behaviour of all-composite modular wall system", *Composite Structures*, Bd. 268, S. 113986, Juli 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.113986.
- [88] M. Hammerl und B. Kromoser, "Prestressing of carbon fiber reinforced concrete", Proceedings of HiPerMat 2020: 5th International Symposium on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials, S. 17–18, 2020, doi: 10.17170/kobra-202002271026.
- [89] R. Sonnenschein, K. Gajdosova, und I. Holly, "FRP Composites and their Using in the Construction of Bridges", *Procedia Engineering*, Bd. 161, S. 477–482, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.665.
- [90] W. Ferdous *u. a.*, "Static behaviour of glass fibre reinforced novel composite sleepers for mainline railway track", *Engineering Structures*, Bd. 229, S. 111627, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.111627.
- [91] Österreichische Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr. 2017, S. 64.







- [92] D. Yilmaz und U. Angst, "Korrosionsbedingte Kosten an Ingenieurbauwerken im Schweizer Straßennetz", *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 115, Nr. 6, S. 448–458, Juni 2020, doi: 10.1002/best.202000004.
- [93] Inc. CC Technologies, Hrsg., "Corrosion Cost and Preventive Strategies in the United States", Nr. FHWA-RD-01-156, März 2002, [Online]. Verfügbar unter: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/39217
- [94] L. C. Hollaway, "The evolution of and the way forward for advanced polymer composites in the civil infrastructure", *Construction and Building Materials*, Bd. 17, Nr. 6–7, S. 365–378, Sep. 2003, doi: 10.1016/S0950-0618(03)00038-2.
- [95] J. Bielak, S. Bergmann, und J. Hegger, "Querkrafttragfähigkeit von Carbonbeton-Plattenbrücken mit C-förmiger Querkraftbewehrung: Theoretische und experimentelle Untersuchungen für zwei Straßenbrücken in Gaggenau", *Beton- und Stahlbetonbau*, März 2019, doi: 10.1002/best.201900001.
- [96] A. Schumann, H. Michler, F. Schladitz, und M. Curbach, "Parking slabs made of carbon reinforced concrete", *Structural Concrete*, Bd. 19, Nr. 3, S. 647–655, Juni 2018, doi: 10.1002/suco.201700147.
- [97] CNR-DT 203/2006, "Guide for the Design and Construction Concrete Structures Reinforcedwith Fiber-Reinforced Polymer Bars", CNR – Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, Rome, Italy, 2007.
- [98] JSCE, "Recommendation for design and construction for concrete structures using continuous fiber reinforcing material", Japan Society of Civil Engineers, Research Committee on Continuus Fiber Reinforcinig Materials, 1997.
- [99] Institution of Structural Engineers (Great Britain), Interim Guidance on the Design of Reinforced Concrete Structures Using Fibre Composite Reinforcement. London: SETO Limited, 2004. Zugegriffen: Feb. 24, 2021. [Online]. Verfügbar unter: http://ezproxy.canterbury.ac.nz/login?url=https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpIGDRCSU5/viewerType:toc/root_slug:interimguidance-design?kpromoter=federation
- [100] AASHTO, AASHTO LRFD Bridge Design Guide Specifications for GFRP-Reinforced Concrete. 2018. Zugegriffen: Feb. 22, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://trid.trb.org/view/1583855
- [101] International Organization for Standardization, "ISO 10406-1:2015 Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete — Test methods — Part 1: FRP bars and grids", Geneva, 2015. Zugegriffen: Feb. 24, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/06/36/63657.html
- [102] R. K. and F. D. C. y B. Alvaro Ruiz Emparanza, "State-of-the-Practice of Global Manufacturing of FRP Rebar and Specifications", *ACI Symposium Publication*, Bd. 327, Jan. 2018.
- [103] A. Weber, "Coming European Standard for R/C Design EC2-Integration of FRP rebars", gehalten auf der SMAR 2015-Third Conference on Smart Monitoring Assessment and Rehabilitation of Civil Structures, Antalya, Sep. 2015.
- [104] O. Steinbock, T. Bösche, und A. Schumann, "Carbonbeton Eine neue Verstärkungsmethode für Massivbrücken: Teil 2: Carbonbeton im Brückenbau und Informationen zur Zustimmung im Einzelfall für das Pilotprojekt "Brücken über die Nidda im Zuge der BAB A 648", *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 116, Nr. 2, S. 109–117, Feb. 2021, doi: 10.1002/best.202000106.







- [105] "CSA S6:19 Canadian Highway Bridge Design Code", Canadian Standards Association, 2019.
- [106] "EN 1992–1–1: Design of concrete structures Part 1-1: General rules and rules for buildings", Austrian Standards Institute, Wien, 2015.
- [107] S. Rempel, "Zur Zuverlässigkeit der Bemessung von biegebeanspruchten Betonbauteilen mit textiler Bewehrung", Dissertation, RWTH Aachen, 2018.
- [108] M. Barisic, "Untersuchungen zum Einsatz von nichtmetallischen Bewehrungen im Infrastrukturbau", TU Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen, Wien, Diplomarbeit, 2022.
- [109] N. Stoiber, M. Hammerl, und B. Kromoser, "Cradle-to-gate life cycle assessment of CFRP reinforcement for concrete structures: Calculation basis and exemplary application", *J Clean Prod*, Bd. 280, S. 124300, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124300.
- [110] B. Kromoser, "Ressourceneffizientes Bauen mit Betonfertigteilen Material Struktur Herstellung", in *Beton Kalender 2021: Fertigteile Integrale Bauwerke*, 1. Aufl., Wiley, 2021. doi: 10.1002/9783433610206.
- [111] Österreichische Forschungsgemeinschaft Straße und Verkehr (FSV), "RVS 15-02-31: Rahmenbrückennormalie", Wien, Dez. 2019.
- [112] "EN 1991-2: Einwirkungen auf Tragwerke Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken", Austrian Standards Institute, Wien, Okt. 2021.
- [113] "ÖNORM EN 1990: Grundlagen der Tragwerksplanung", Austrian Standards Institute, Wien, März 2013.
- [114] "ÖNORM B 1991-1-1: Einwirkungen auf Tragwerke Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen -Wichten, Eigengewicht, Nutzlasten im Hochbau", Austrian Standards Institute, Wien, Jan. 2020.
- [115] ÖNORM EN ISO 14050, Umweltmanagement Begriffe. Austrian Standards Institute, 2021.
- [116] ÖNORM EN ISO 14044, Umweltmanagement Ökobilanz Anforderungen und Anleitungen. Austrian Standards Institute, 2021.
- [117] "IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change". https://www.ipcc.ch/ (zugegriffen Apr. 13, 2021).
- [118] ÖNORM EN ISO 14040, Umweltmanagement Ökobilanz Grundsätze und Rahmenbedingungen. Austrian Standards Institute, 2021.
- [119] ÖNORM EN ISO 14025, Umweltkennzeichnungen und -deklarationen Typ III Umweltdeklarationen - Grundsätze und Verfahren. Austrian Standards Institute, 2010.
- [120] ÖNORM EN 15804, Nachhaltigkeit von Bauwerken Umweltproduktdeklarationen Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte. Austrian Standards Institute, 2020.
- [121] Euopean Platform on Life Cycle Assessment, "EN 15804 reference package", 2021. https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/EN15804.xhtml
- [122] European Comission, "European reference Life Cycle Database", 2012. https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/ (zugegriffen Feb. 18, 2020).
- [123] DIN CEN/TR 15941 (DIN SPEC 18941), Nachhaltigkeit von Bauwerken Umweltproduktdeklarationen - Methoden f
 ür Auswahl und Verwendung von generischen Daten. DIN Deutsches Institut f
 ür Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, 2010.





- [124] M. Posch, J. Seppälä, J.-P. Hettelingh, M. Johansson, M. Margni, und O. Jolliet, "The role of atmospheric dispersion models and ecosystem sensitivity in the determination of characterisation factors for acidifying and eutrophying emissions in LCIA", *Int J Life Cycle Assess*, Bd. 13, Nr. 6, S. 477–486, Sep. 2008, doi: 10.1007/s11367-008-0025-9.
- [125] World Steel Association, "Life Cycle Inventory (LCI) Request Form", 2019. https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/life-cycle-thinking/lca-lciform.html (zugegriffen März 25, 2020).
- [126] Hohmann, A., "Life cycle assessment of manufacturing processes for CFRP structures to identify optimization potentials - Systematic methodology for estimating the environmental impact of manufacturing process chains", Technical University of Munich, 2018.
- [127] European Composites Industry Association EuCIA, "ECO IMPACT CALCULATOR for composites", 2021. https://ecocalculator.eucia.eu
- [128] PwC Sustainable Performance and Strategy, "LCA report CFGF products 2016 PWC". 2016. [Online]. Verfügbar unter: https://www.glassfibreeurope.eu/wp-content/uploads/GFE-2012-02-LCA-report.pdf
- [129] K. Azrague und M. R. Inman, "Life Cycle Assessment as a tool for resource optimisation of continuous basalt fibre production in Iceland", S. 17.
- [130] Boustead, I., "Eco-profiles of the European Plastics Industry Liquid Epoxy Resin", 2005. https://www.plasticseurope.org/de/resources/eco-profiles
- [131] E. Rietveld, S. Hegger, und L. van Rossum, "AVK -- Industrie Vereinigung Faserverstaerkte Kunststoffen", S. 21, 2014.
- [132] PwC, "EPDLA Life Cycle Assessment Summary Report", 2015. [Online]. Verfügbar unter: https://specialty-chemicals.eu/wp-content/uploads/2017/07/4_EPDLA-Life-Cycle-Assessment-LCA-Summary-Report.pdf
- [133] R. Frischknecht, F. Wyss, S. B. Knöpfel, T. Lützkendorf, und M. Balouktsi, "Cumulative energy demand in LCA: the energy harvested approach", *Int J Life Cycle Assess*, S. 13, 2015.
- [134] Verein Deutscher Ingenieure e.V., "VDI-Richtlinie Kumulierter Energieaufwand (KEA)". 2012.
- [135] CML Department of Industrial Ecology, "CML-IA Characterisation Factors", 2016. https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisationfactors (zugegriffen März 29, 2020).
- [136] "ILCD International Life Cycle Data system". https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ilcd.html (zugegriffen Apr. 13, 2021).
- [137] C. Hill und A. Norton, "LCA database of environmental impacts to inform material selection process", S. 33, 2018.
- [138] D. Kellenberger, H.-J. Althaus, T. Künninger, und M. Lehmann, "Life Cycle Inventories of Building Products - ecoinvent report No. 7", S. 914, 2007.
- [139] L. Delgado Sancho, A. Q. Sissa, B. M. Scalet, S. Roudier, M. Garcia Muñoz, und Institute for Prospective Technological Studies, *Best available techniques (BAT) reference document for the manufacture of glass industrial emissions Directive 2010/75/EU: integrated pollution prevention and control.* Luxembourg: Publications Office, 2013. [Online]. Verfügbar unter: https://books.google.at/books?id=EwKjDwAAQBAJ&pg=PT2001&lpg=PT2001&dq=gfrp+gw





p&source=bl&ots=0TiSw1MMIB&sig=ACfU3U1tJ4FEm-QUbNkT9TpceK7Ksm3idNg&hl=de&sa=X&ved=2ahUKEwi-mOHMv8vkAhWJZ-FAKHW7jAycQ6AEwAHoECAUQAQ#v=onepage&q=gfrp%20gwp&f=false

- [140] N. Al-Ayish, K. Malaga, M. Hadi, M. N. Sheikh, K. Gudmundsson, und R. Karoumi, "Environmental impact of concrete structures reinforced with GFRP bars: A simplified study on columns", gehalten auf der CONCRETE Innovations in Materials, Design and Structures, 2019.
- [141] J. R. Duflou, Y. Deng, K. Van Acker, und W. Dewulf, "Do fiber-reinforced polymer composites provide environmentally benign alternatives? A life-cycle-assessment-based study", *MRS Bull.*, Bd. 37, Nr. 4, S. 374–382, Apr. 2012, doi: 10.1557/mrs.2012.33.
- [142] JRC- European Commission, "Continuous filament glass fibre (direct rovings); The main enduse of CFGF products is the reinforcement of thermosetting and thermoplastic resins.; at plant (Location: RER) - Datasets". https://data.europa.eu/euodp/en/data/dataset/jrc-eplca-64e40a9d-87ff-4aa4-b35f-66662a522224 (zugegriffen Apr. 15, 2021).
- [143] L. Zampori, S. Fazio, und E. Diaconu, "User's instructions for 'Look@LCI' software European Commission", 2018. https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/user-s-instructions-looklcisoftware (zugegriffen Apr. 15, 2021).
- [144] V. Michaud, "Les matériaux composites, moteurs de la mobilité propre?", S. 38, 2016.
- [145] Ökobaudat, "Prozess-Datensatz: Kunststoffteil aus laminiertem Polyesterharz (GFK, 30% Glasfaseranteil) (de)", 2018. https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?lang=de&uuid=a051b8eb-5e03-486a-b9c3-bfc9d19234de (zugegriffen Apr. 15, 2021).
- [146] The International EPD System, "Environmental Product Declaration: GFRP composite poles EPD from MİTAŞ Composites". 2020.
- [147] O. Grauer, "Abschlussbericht Forschungsvorhaben C³", SKZ Das Kunststoff-Zentrum, Würzburg, Deutschland, 2016.
- [148] TORAYCA® | TORAY, "Carbon Fiber and Global Environment | TORAYCA® | TORAY". https://www.torayca.com/en/aboutus/abo_003.html (zugegriffen Apr. 15, 2021).
- [149] Institut Bauen und Umwelt e.V., "Environmental Product Declaration Reactive reins based on epoxy resin, unfilled/solventfree with low content of reactive diluent". 2015. Zugegriffen: Apr. 15, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.feica.eu/our-priorities/edps
- [150] Ökobaudat, "Prozess-Datensatz: Kunststoffprofil SBR (de)", 2016. https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?lang=de&uuid=1b69b3a2-3164-436ba934-ed7d926f5f53&version=20.17.009 (zugegriffen Apr. 15, 2021).
- [151] "Baukostenindex für den Straßenbau". STATISTIK AUSTRIA, Dez. 15, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.statistik.at/web_de/statistiken/wirtschaft/preise/baukostenindex/023120.html
- [152] "Baukostenindex für den Brückenbau". STATISTIK AUSTRIA, Dez. 15, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.statistik.at/web_de/statistiken/wirtschaft/preise/baukostenindex/023120.html
- [153] A. Jurecka und H. G. Jodl, "Berechnungsmodell f
 ür die Lebenszykluskosten von Br
 ücken", gehalten auf der 4. PM-Bau Symposium, 2009.







- [154] A. Strauss, G. Lener, J. Schmid, J. Matos, und J. R. Casas, "Lebenszyklus-und Qualitaetsspezifikationen fuer Ingenieurbauwerke", 2018.
- [155] J. Otto und R. Adam, "Carbonbeton und Stahlbeton im wirtschaftlichen Vergleich", Bauingenieur, Bd. 94, Nr. 6, 2019.
- [156] "Schöck Preisliste 2020". Schöck Bauteile GmbH, Okt. 2019.
- [157] J. Kortman, Verfahrenstechnische Untersuchungen zur Recyclingfähigkeit von Carbonbeton. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2020. Zugegriffen: Dez. 10, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.morawa.at/detail/ISBN-9783658301248/Kortmann-Jan/Verfahrenstechnische-Untersuchungen-zur-Recyclingf%C3%A4higkeit-von-Carbonbeton
- [158] "Alsag Merkblatt-2017". WKO Wirtschaftskammer Österreich Gschätsstelle Bau, Nov. 2017.
- [159] "Rohrdorfer Preisliste 2022 Umwelttechnik / Sand & Kies". Rohrdorfer, Jan. 01, 2022.
- [160] Österreichische Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr. 2019, S. 66.
- [161] ASFINAG Bau Management GmbH, Abteilung Asset Management, Hrsg., "Asset Management Handbuch Geankerte und nicht geankerte Stützbauwerke". Asfinag, März 17, 2021.
- [162] J. Suda, R. Hofmann, A. Strauss, und R. Wendner, "Bemessung eines Stützbauwerks nach Eurocode Teil 1: Ständige Bemessungssituation", *Bautechnik*, Bd. 86, Nr. 12, S. 782–793, Dez. 2009, doi: 10.1002/bate.200910077.
- [163] P. Veit und S. Marschnig, "LCC Bahnsteige Systementscheid", ÖBB Österreichische Bundesbahnen, 2009.
- [164] Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien Abfallrahmenrichtlinie. 2008. Zugegriffen: Dez. 10, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmu.de/GE117
- [165] M. Huber-Humer und M. Hrad, "Vorlesungsskript: Abfallwirschaft und Abfallentsorgung", Universität für Bodenkultur, Wien, 2021.
- [166] F. Henning, Handbuch Leichtbau. Methoden, Werkstoffe, Fertigung. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Hanser, 2020.
- [167] M. Schröder, A. Pocha, und Deutscher Abbruchverband, Hrsg., Abbrucharbeiten: Grundlagen, Planung, Durchführung, 3., Aktualisierte und erw. Aufl. Köln: R. Müller, 2015.
- [168] World Health Organization, "Determination of airborne fibre number concentrations : a recommended method, by phase-contrast optical microscopy (membrane filter method)", World Health Organization, 1997. Zugegriffen: Dez. 10, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://apps.who.int/iris/handle/10665/41904
- [169] V. Horstmann, "Vergleichende Untersuchungen zur mechanischen Aufbereitung von Carbonbeton". Masterarbeit. Bauhausuniversität Weimar, 2018.
- [170] M. Kimm, N. Gerstein, P. Schmitz, M. Simons, und T. Gries, "On the separation and recycling behaviour of textile reinforced concrete: an experimental study", *Mater Struct*, Bd. 51, Nr. 5, S. 122, Sep. 2018, doi: 10.1617/s11527-018-1249-1.
- [171] "Publikationen Carbon Concrete Composite e.V.", C³ Carbon Concrete Composite. https://www.bauen-neu-denken.de/publikationen-2/ (zugegriffen Dez. 13, 2021).







- [172] C. Neunzig, "Greencrete Nachhaltigkeitsaspekte bei der Produktion und Anwendung von dünnwandigen Fassaden aus Textilbeton", gehalten auf der 55. Aachener Baustofftag, Aachen, 2019.
- [173] K. Weimann, "Untersuchungen zur Nassaufbereitung von Betonbrechsand unter Verwendung der Setzmaschinentechnik", Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), 2009. Zugegriffen: Dez. 13, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://opus4.kobv.de/opus4-bam/frontdoor/index/index/docId/107
- [174] Glowanaia, M, "Innovative Coating Technology for Textile Reinforcements of Concrete Applications.", *Key Engineering Materials*, Nr. 466, S. 167–73, 2011.
- [175] Koch, A., "Recycling von Carbonbeton: Vorstellung der aktuellen Vorarbeiten.", gehalten auf der Tudalit 7. Anwendertagung, Dresden, Sep. 2015.
- [176] M. Kimm, N. Gerstein, P. Schmitz, M. Simons, und T. Gries, "On the separation and recycling behaviour of textile reinforced concrete: an experimental study", *Mater Struct*, Bd. 51, Nr. 5, S. 122, Okt. 2018, doi: 10.1617/s11527-018-1249-1.
- [177] M. Hofmann und B. Gulich, "Verarbeitung von rezyklierten Carbonfasern für die Herstellung von Verbundbauteilen", *Lightweight Design*, Nr. 6(2):20-23, 2013, doi: 10.1365/s35725-013-0161-4.
- [178] M. Limburg und P. Quicker, "Entsorgung von Carbonfasern", Energie aus Abfall, Bd. 13, S. 11, 2016.
- [179] J. L. Thomason, U. Nagel, L. Yang, und E. Sáez, "Regenerating the strength of thermally recycled glass fibres using hot sodium hydroxide", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Bd. 87, S. 220–227, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.compositesa.2016.05.003.
- [180] J. R. Hyde, E. Lester, S. Kingman, S. Pickering, und K. H. Wong, "Supercritical propanol, a possible route to composite carbon fibre recovery: A viability study", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Bd. 37, Nr. 11, S. 2171–2175, Nov. 2006, doi: 10.1016/j.compositesa.2005.12.006.
- [181] "Unsere Partner", WIR! recyceln Fasern. https://www.wir-recyceln-fasern.de/partner/ (zugegriffen Dez. 13, 2021).
- [182] "DBU Innovatives Carbonfaser-Recycling | Beispielhafte Projekte & Schwerpunkte". https://www.dbu.de/123artikel36938_2430.html (zugegriffen Dez. 13, 2021).
- [183] "carbon fiber recycling". https://www.carbon-cleanup.com/ (zugegriffen Dez. 13, 2021).
- [184] "ReBoat | maritime Recycling", ReBoat | maritime Recycling. https://re-boat.de/ (zugegriffen Dez. 13, 2021).
- [185] "Aerocircular®", Aerocircular. http://aerocircular.green/ (zugegriffen Dez. 13, 2021).
- [186] "Gen 2 Carbon", Gen 2 Carbon. https://www.gen2carbon.com/ (zugegriffen Dez. 13, 2021).
- [187] "Phyre Recycling | Extracthive", *Phyre Recycling*. https://www.phyre-recycling.com (zugegrif-fen Dez. 13, 2021).
- [188] "Carbon Fiber Recycling | Fiber Composites | Shocker Composities | KS", *Shocker Composites, LLC*. https://www.shockercomposites.com/ (zugegriffen Dez. 13, 2021).
- [189] "Vartega", Vartega. https://www.vartega.com (zugegriffen Dez. 13, 2021).





- [190] Rieder Sales GmbH, "EPD-RSE-20180069-IAD1-DE Glaserfaserbeton concrete Skin and öko Skin". 2018. Zugegriffen: Dez. 13, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.rieder.cc/wpcontent/uploads/2017/07/EPD_RSE_2012111_D.pdf
- [191] W. & S. nv, :: "Publications :: EuCIA ":, *EuCIA*. https://eucia.eu/publications/ (zugegriffen Dez. 13, 2021).
- [192] S. Thiel, E. Thome-Koziensky, D. G. Senk, H. Wotruba, H. Antrekowitsch, und R. Pomberger, Hrsg., *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle*, Bd. 7. 2020.
- [193] "C3-V1.5: Abbruch, Rückbau und Recycling von C³-Bauteilen", *TU Dresden*. https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb/forschung/Forschungsfelder/TRC-C3/C3-vorhaben/C3-V1.5?set_language=de (zugegriffen Dez. 02, 2020).
- [194] H. Rodin, M. Rangelov, S. Nassiri, und K. Englund, "Enhancing Mechanical Properties of Pervious Concrete Using Carbon Fiber Composite Reinforcement", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Bd. 30, Nr. 3, S. 04018012, März 2018, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002207.
- [195] D. Meiners und B. Eversmann, "Recycling von Carbonfasern", S. 9.
- [196] K. Wolf und A. Merkel, "Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem AZ: 29910 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt", S. 68, 2014.
- [197] "ÖNORM EN 15347:20080201 Kunststoffe Kunststoff-Rezyklate Charakterisierung von Kunststoffabfällen". 2008. Zugegriffen: Dez. 14, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.en-standard.eu/din-en-15347-plastics-recycled-plastics-characterisation-of-plasticswastes/
- [198] "ÖNORM EN 15344:20210715 Kunstoffe Kunststoff-Rezyklate Charakterisierung von Polyethylen(PE)-Rezyklaten". 2021. Zugegriffen: Dez. 14, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://shop.austrian-standards.at/action/de/public/details/702855/OENORM_EN_15344_2021_07_15
- [199] "ÖNORM EN 15342:20080201 Kunststoffe Kunststoff-Rezyklate Charakterisierung von Polystyrol(PS)-Rezyklaten". 2008. Zugegriffen: Dez. 14, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://shop.austrian-standards.at/action/de/public/details/287727/OENORM_EN_15342_2008_02_01;jsessionid=99DACCF5E900A138154F057AE0022C20
- [200] "ÖNORM EN 15345:20051201 Kunststoffe Kunststoff-Rezyklate Charakterisierung von Polypropylen(PP)-Rezyklaten". 2005. Zugegriffen: Dez. 14, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bdb.at/Service/NormenDetail?id=300806
- [201] H. Alkhraisha, H. Mhanna, N. Tello, und F. Abed, "Serviceability and Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Basalt Fiber-Reinforced Polymer (BFRP) Bars Exposed to Harsh Conditions", *Polymers*, Bd. 12, Nr. 9, Art. Nr. 9, Sep. 2020, doi: 10.3390/polym12092110.
- [202] K. Protchenko und E. Szmigiera, "Post-Fire Characteristics of Concrete Beams Reinforced with Hybrid FRP Bars", *Materials*, Bd. 13, Nr. 5, Art. Nr. 5, Jan. 2020, doi: 10.3390/ma13051248.
- [203] A. Hassan, F. Khairallah, H. Elsayed, A. Salman, und H. Mamdouh, "Behaviour of concrete beams reinforced using basalt and steel bars under fire exposure", *Engineering Structures*, Bd. 238, S. 112251, Juli 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.112251.





[204] S. Rempel, M. Ricker, und J. Hegger, "Biegebemessungsmodell mit einer geschlossenen und iterativen Lösung für Textilbetonbauteile", *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 115, Nr. 3, S. 218– 230, 2020, doi: 10.1002/best.201900086.



Fragebogen Knowledge Hub (Ein Fragebogen je Organisation bis 28.09.)

Einleitung

Für eine zielgerichtete Bearbeitung des Projektes will das Projektkonsortium folgende Themen betreffend des österreichischen Infrastrukturnetzes mit den Auftraggebern vorab abklären:

- Definition von Dauerhaftigkeitsproblemen, die durch Bewehrungskorrosion hervorgerufen werden.
- Identifizierung der wesentlichen Schadensbilder und dem monetären Instandsetzungsaufwand aufgrund von Bewehrungskorrosion.
- Bestimmung der wesentlichen Anforderungen an relevante Bauteile hinsichtlich der mechanischen Beanspruchung, der Umwelteinflüsse, der Lebensdauer etc.
- Definition von Bauteilen, bei welchen aus Sicht der Fragebogen-ausfüllenden Organisation durch den Einsatz von FRP-Bewehrung ein ökonomisches und ökologisches Einsparungspotential über den gesamten Lebenszyklus zu erwarten ist.

Da der Betreiber sein Netz am besten kennt, ist dieser Austausch essentiell für eine praxisnahe und zielorientierte Projektgestaltung. Die Ergebnisse dieses Fragebogens werden in einem moderierten Workshop (05.10., 9:00 bis 12:00 Uhr) gemeinsam besprochen. Der Fragebogen sollte bis spätestens 28.09. übermittelt werden.

Ausfüllende Organisation:



Themenblock 1: Dauerhaftigkeitsprobleme, Schadensbilder und Lebenszyklus

Ziel: Zur Bestimmung des Potentials von nichtmetallischer Bewehrung im Infrastruktur-Betonbau ist vor allem eine Kenntnis der Schäden, als auch der finanziellen Auswirkungen notwendig.

1.1 Welche bekannten Dauerhaftigkeitsprobleme können direkt oder indirekt der Bewehrungskorrosion zugeordnet werden? (Detailierungsgrad Bauteilebene)

1.2 Welche bekannten Dauerhaftigkeitsprobleme (neben der Probleme aufgrund von Bewehrungskorrosion) stellen aktuell die größten Herausforderungen für die Infrastrukturbetreiber dar? Welche verursachen die höchsten Kosten? (Detailierungsgrad Bauteilebene)



1.3 Werden auf Bei der Planung berück	treiberebene bereit ksichtigt?	s Lebenszyklusbetra	achtungen/-kosten als	Grundlage bei
⊖ Ja	⊖öfter	🔵 zum Teil) eher selten	ONein
Gründe für die ebei	n gegebene Antwort	:		
 1.4 Welchen Anteil haben die Kosten der Instandsetzungsmaßnahmen in der Lebenszyklusbetrachtung? Wie erfolgt die Bewertung im Unternehmen? Können hier Daten zur Verfügung gestellt werden und wenn vorhanden anteilig Daten aufgrund von Bewehrungskorrosion? 				



1.5 Welchen Einfluss spielen Dauerhaftigkeitsprobleme in der Bewertung des Netzzustandes? Wie erfolgt die Bewertung im Unternehmen und welche Probleme haben größere Auswirkung auf die Bewertung?

Können hier Daten zur Verfügung gestellt werden und wenn vorhanden anteilig Daten aufgrund von Bewehrungskorrosion?



Themenblock 2: Anforderungen an Bauwerke

Ziel: Zur Erstellung eines Empfehlungsleitfaden ist es notwendig, alle zu erfüllenden Aspekte beim Projektentwurf abzudecken. Diese sollen hier für (1) Kleine Fertigteile z.B. Randbalken, (2) Ankerwände, (3) Statisch konstruktive Bauteile z.B. Lärmschutzwand, (4) Brücken, (4.1) Straßenbrücken, (4.2) Eisenbahnbrücken, (4.3) Rad und Fußgängerbrücken identifiziert werden.

2.1 Welche Umweltanforderungen sind unternehmensintern für Erneuerungs- und Neubauprojekte definiert? Richtlinien, Planungshandbücher, Normen, etc.

2.2 Welche mechanischen Anforderungen sind im Unternehmen für Erneuerungs- und Neubauprojekte definiert? Richtlinien, Planungshandbücher, Normen, etc.



2.3 Welche Anforderungen an die technische und wirtschaftliche Lebensdauer von Bauwerken gilt es derzeit für Erneuerungs- und Neubauprojekte zu erfüllen?

2.4 Gibt es unternehmensinterne Anforderungen an den Rückbau von Bauwerken? Richtlinien, Planungshandbücher, Normen, etc.



2.5 Gibt es unternehmensspezifische Anforderungen zum Recycling von Baustoffen? Richtlinien, Planungshandbücher, Normen, etc.



Themenblock 3: Ziele und Erfahrungen

Ziel: Zur Bearbeitung des Projekts sollen inhaltliche Schwerpunkte gesetzt werden, welche im Einklang mit der Vision des Infrastrukturbetreibers sind.

3.1 Welche Betonbauteile wären aus der Sicht des Infrastrukturbetreibers besonders geeignet für den Einsatz von nichtmetallischer Bewehrung?

3.2 Gewichtung der Themen Ökologie / Ökonomie bei der Planung zum jetzigen Zeitpunkt? (Bewertung: 6 am wichtigsten)

Ökologie:	<u></u> 1	<u> </u>	○ 3	<u> </u>	○5	06
Ökonomie:	<u> </u>	<u> </u>	<u> </u>	<u> </u>	○ 5	06

Gründe für die eben gegebene Antwort:
-



3.3 Gewichtu (Bewertung:	ing der Theme 6 am wichtigst	n Ökologie / Ö ten)	konomie bei d	ler Ausschreibi	ung als zukünf	tiges Ziel?	
Ökologie:	<u> </u>	<u> </u>	<u> </u>	<u> </u>	◯ 5	<u> </u>	
Ökonomie:	<u></u> 1	<u> </u>	<u> </u>	<u> </u>	○ 5	○ 6	
Gründe für die eben gegebene Antwort:							
3.4 Gibt es ar Aufgabenste	ndere laufende llung in diesen	e/abgeschlosse n Projekt relev	ene Forschungs ant wären?	sprojekte, weld	che hinsichtlic	h der	

Empfehlungsleitfaden zur Anwendung von nichtmetallischer Bewehrung im Infrastruktur-Betonbau



1. Auflage: Jänner 2022

Universität für Bodenkultur Wien Institut für Konstruktiven Ingenieurbau Peter-Jordan-Straße 82

1190 Wien

Technische Universität Wien Institut für Tragkonstruktionen / Betonbau Karlsplatz 13/E212-2 1040 Wien





Präambel

Zu beachten ist, dass nichtrostende Bewehrung z.B. in Form von nichtmetallischer Bewehrung (CFRP, GFRP, BFRP) oder in Form von nichtrostendem Stahl (ER) nicht als Ersatz für BSt präsentiert werden soll. Ziel ist Bereiche aufzuzeigen in denen nichtrostende Bewehrung besondere Vorteile aufweist. Durch eine Erhebung der am europäischen Markt verfügbaren nichtmetallischen Bewehrungen konnte ein klares Bild der technischen Eigenschaften, deren Verfügbarkeit und Kosten erstellt werden. Es wurden nur Produkte berücksichtigt, die für die Bewehrung von Beton im Neubau geeignet sind. Das Potential für den Einsatz von nichtmetallischer Bewehrung wurde gemeinsam mit den Infrastrukturbetreibern ÖBB und Asfinag erarbeitet. Hohes Potential besteht insbesondere: (a) bei Bauteilen mit hohen Dauerhaftigkeitsanforderungen, (b) bei schlanken Bauteilen (hohe Anforderungen an die Materialeffizienz) und (c) bei Bauteilen mit hohem Wartungsaufwand bzw. schwierigem Wartungsumfeld.

Die unten angeführten Kriterien beziehen sich auf den derzeitigen Stand (31.12.2021) der verfügbaren Zulassungen, Standardisierungen und Erfahrungen der Bauindustrie und Ziviltechniker*innen. Mit der Weiterentwicklung, dem vermehrten Einsatz und der Einbindung der neuartigen Bewehrungen in die Richtlinien und Codes kann es zu einer Änderung der Bewertung kommen.

1 Begriffsbestimmungen und Nomenklatur

- A_{c,eff} Wirkungsfläche der Bewehrung
- A_{ct} Fläche der Betonzugzone im ungerissenen Querschnitt ADP Abiotisches Ressourcenerschöpfungspotential
- Englisch: Abiotic depletion potential
- AE Versauerungspotential Englisch: Accumulated Exeedance
- Af Querschnittsfläche FRP-Bewehrung
- AP Versauerungspotenzial Englisch: Acidification Potential
- AR Alkaliresistent
- Asfinag Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft
- BFRP Basaltfaserverstärkte Kunststoffbewehrung BSt Betonstahl
- c Betondeckung
- C_c Abminderungsfaktor der Zugfestigkeit einer FRP Bewehrung zufolge Dauerstand
- C_E derungsfaktor Festigkeit FRP Bewewehrung zufolge Umwelteinfluss
- CFRP Carbonfaserverstärkte Kunststoffbewehrung
- c_{min,b} Mindestbewehrung zufolge Verbundkriterium
- CT Abminderungsfaktor Festigkeit FRP Bewewehrung zufolge Temperatur
- d statische Nutzhöhe
- Ecm mittlerer E-Modul
- EPD Umwelt-Produktdeklaration Englisch: Enviromental product declaration
- Er E-Modul der Bewehrung
- ER Edehlstahlbewehrung
- f_{ck} charakteristische Zylinderdruckfestigkeit
- f_{ctm} *mittlere Betonzugfestigkeit*
- f_{ftd} Designfestigkeit FRP Bewehrung
- fftk,100 charakteristische Langzeitfestigkeit (100 Jahre) FRP Bewehehrung
- GFRP Glasfaserverstärkte Kunststoffbewehrung

- GWP Treibhauspotenzial Englisch:Global warming potential
- h *Bauteilhöhe*
- h_{c,eff} Höhe des Wirkungsbereiches der Bewehrung für Rissbreitenberechnung
- k Beiwert zur Berücksichtigung von nichtlinear verteilten Betonzugspannungen, die zum Abbau von Zwang führen
- k₁ Beiwert zur Begrenzung der Betonspannungen unter charakteristischer Kombination
- k₂ Beiwert zur Begrenzung der Betonspannungen unter charakteristischer Kombination
- kc Beiwert zur Berücksichtigung des Einflusses der Spannungsverteilung innerhalb des Querschnitts vor der Erstrissbildung sowie der Änderung des inneren Hebelarmes
- kt Faktor zur Berücksichtigung der Dauer der Lasteinwirkung
- L Bauteillänge
- M_E Einwirkendes Moment
- M_R Widerstandsmoment Bewehrung
- ÖBB Österreichische Bundesbahnen
- Ør Durchmesser Bewehrung
- w_{zul} zulässige Durchbiegung
- x Betondruckzonenhöhe
- α_r Verhältnis E-Modul Bewehrung zu E-modul Beton
- γ_M Materialsicherheitsbeiwert
- . ξ Bezogene Druckzonenhöhe
- ρ Dichte
- , ρ_{eff} effektiver Bewehrungsgrad für Rissbreitenberechnung
- ρ₁ Längsbewehrungsgrad
- τ_b Verbundfestigkeit
- ϕ_{∞} Kriechbeiwert zum Zeitpunkt t_{∞}
- $\sigma_{\rm c}$ Druckspannung im Beton
- σ_r Zugspannung in der Bewehrung



2 Bestimmung des Einsatzpotenzials

2.1 Anwendung des Leitfadens

Tabelle 1 beinhaltet Kriterien, die eine rasche und einfache Beurteilung der Eignung der eingesetzten Bewehrungsart zu ermöglichen (Stufe I), wobei ein Hauptaugenmerk auf die sinnvollen Einsatzgebiete von nichtrostender Bewehrung gelegt wird. Unterschieden wird in Betonstahl (BSt), Carbonfaserverstärkte Kunststoffbewehrung (CFRP), Glas- bzw. Basaltfaserverstärkte Kunststoffbewehrung (GFRP/BFRP) und Edelstahlbewehrung (ER). Weiters wird in diesem Leitfaden eine präzisere Bewertung im Rahmen einer Stufe II vorgestellt.

Ist die Bewertung in Stufe I überwiegend positiv so ist der Einsatz der bewerteten Bewehrung als sinnvoll zu erachten. Gibt Stufe I keine klare Empfehlung zur Anwendung einer Bewehrungsart oder ist die Bewertung überwiegend negativ jedoch der Einsatz von der gewählten Bewehrung dennoch erwünscht, wird eine Bewertung in Stufe II empfohlen. Stufe II beinhaltet genauere Beurteilung für unterschiedliche statische Systeme wie auch ökologische und ökonomische Kennwerte.

2.2 Vereinfachtes Verfahren zur Abschätzung des Einsatzpotentials – Stufe I

Die Kriterien in Tabelle 1 werden basierend auf den zuvor definierten Zielen in Dauerhaftigkeit/Instandhaltung, Materialeffizienz, Beanspruchung und Herstellung unterteilt. Es handelt sich um eine schnelle Abschätzung des Anwendungspotentials. Es wird festgestellt welche Art von Bewehrung für das Bauteil in Frage kommt. Eine Beurteilung in Stufe I des gewünschten Bauteils und dessen Bewehrung erfolgt durch das Zusammenaddieren der positiven (+) und negativen (–) Bewertungen der angegebenen Kriterien. Nicht alle Kriterien haben für das zu beurteilende Bauteile Relevanz (z.B. elektromagnetisch belastetes Umfeld). Die nicht entsprechenden Kriterien sind nicht zu beachten und aus der Bewertung zu streichen. Eine zweifach negative Bewertung (- -) eines Kriteriums ist als Ausschlusskriterium anzusehen und kennzeichnet somit Einsatzgebiete, für die die gewählte Bewehrungsart nicht geeignet ist, sofern keine genaueren Nachweise erbracht werden. Es gibt auch die Möglichkeit einer neutralen Bewertung (~), die in die Berechnung nicht miteinbezogen wird. Das zusammenaddierte Ergebnis aus den Bewertungen (+, -, ~) von allen relevanten Kriterien gibt schlussendlich eine Aussage über das Anwendungspotential.



Tabelle 1: Stufe	I der Bewertung des	Einsatzes von BST,	CFRP, GFRP,	BFRP und ER Bewehrung

		BST	CFRP	GFRP BFRP	ER
1	Dauerhaftigkeit/Instandhaltung				
1.1	Extrem ungünstige, korrosionsfördernde Umgebungsverhält- nisse (tausalzbeanspruchte Bauteile, Stützwände, Meeresum- gebung, Parkdecks)	-	+	+	+
1.2	Spritzwasser gefährdet (Brückenpfeiler bei Überführungen, Tunnel)	-	+	+	+
1.3	Drückendes Wasser	-	+	+	+
1.4	Sonderkonstruktion (Anschlussbewehrung zwischen Ortbeton und Fertigteil, wärmegedämmte Übergänge, Bewehrung kreuzt Fugen, Balkonanschlüsse, rissbehaftete Bauteile)	-	+	+	+
1.5	Nicht inspizierbare Bewehrungslage	-	+	+	+
1.6	Mischbewehrung (mit Stahl) erwünscht	+	- ¹	+	+
2	Materialeffizienz				
2.1	Verwendung von Leichtbeton mit poröser Gefügestruktur	-	+	+	+
2.2	Abweichung von der normativ angegebenen Betondeckung		+	+	+
2.3	Sehr geringe Betondeckung erwünscht		+ 2	+ ²	~ ³
2.4	Dünne und leichte Elemente angestrebt (Materialeffizienz)	-	+	+	~
2.5	Hoher Bewehrungsgrad (BST, Edelstahl) des Bauteils	-	+	~	-
2.6	Anschaffungskosten	+	-	~	-
3	Beanspruchung				
3.1	Feuerbelastung	+		/~ ⁴	+
3.2	Konstruktive Bewehrung	+	~	+	~
3.3	Elektromagnetisch belastetes Umfeld			+	
3.4	Druck Belastung, Momentenumlagerung bei Fließgelenk	+	~ 5	~	+
3.5	Große Spannweiten	+	_ 6	6	+
4	Herstellung				
4.1	Fertigteil - Handhabung	~	+ 7	+ 7	~
4.2	Fertigteil - Transport	~	+	+	~
4.3	Ortbeton - Handhabung	~	+ 7	+ 7	~
4.4	Ortbeton - Einbau	+	-	-	+
4.5	Ortbeton - Biegung	+	- ⁸	- 8	+
4.6	Temporäres Bauteil – Ökonomischer und Ökologischer Aspekt	+	-	~	~
4.7	Temporäres Bauteil - Abbruch	~	+	+	~
4.8	Kosten	+	-	+	-

¹ Bimetallische Korrosion, kein direkter Kontakt zwischen BST und CFRP

² gilt vorrangig für Textilien

³ Mindestbetondeckung zur Übertragung von Verbundkräften
⁴ Basalt behält 90% der Festigkeit bei einer Feuerbelastung von 500°C über 2h [201]–[203]
⁵ Verhalten unter Druck ist nicht vorteilhaft, wenig Erfahrung in der Verwendung von Druckelementen [35]

⁶ Große Durchbiegung
 ⁷ Geringeres Gewicht der Bewehrungsstäbe

⁸ Biegung von Stäben auf der Baustelle nicht möglich



2.3 Genaueres Verfahren zur Abschätzung des Einsatzpotentials – Stufe II

Stufe II des Empfehlungsleitfadens ermöglicht eine genauere Abschätzung der notwendigen Materialmassen (Beton/Bewehrung) für FRP-bewehrte Bauteile. Durch die anschließende Kombination der erforderlichen Materialmassen mit ökologischen und ökonomischen massebezogenen Kennwerten, können Rückschlüsse auf das ökologische und ökonomische Anwendungspotential gezogen werden.

Stufe II beinhaltet Vorbemessungsdiagramme und -tabellen, die mit dem Ziel einer möglichst einfachen aber dennoch umfänglichen Anwendbarkeit erstellt wurden. Diese sollen als Hilfestellung in einer Vordimensionierung FRP-bewehrte Bauteile dienen, ersetzen aber keine Ausführungsstatik. In diesem Fall ist eine gesonderte Statik nach derzeitigem Stand der Technik zu erstellen.

Im Falle von ER-bewehrung ist die EN1992-1-1 anzuwenden. Lediglich die erforderliche Betondeckung für die Dauerhaftigkeit in Abs 4.4 entfällt. Eine Mindestbetondeckung zur Erfüllung des Verbundkriteriums ist aber weiterhin notwendig.

2.3.1 Entwurf und Bemessung von Bauteilen und Tragwerken mit nichtmetallischer Bewehrung

In der Bemessung und dem Design von FRP-bewehrten Bauteilen kann auf Erfahrungen aus verschiedenen Ländern zurückgegriffen werden. Vor allem in Nordamerika ist der Einsatz von FRP-Bewehrungen weit verbreitet. In den letzten Jahrzehnten wurden einige Regelwerke veröffentlicht, die sich im Detaillierungsgrad und der Aktualität unterscheiden. Am anerkanntesten sind ACI 440 sowie CSA S806-12.

Dokumentenname	Land	Erscheinungsjahr (letztgültige Fassung)
JSCE 1997	Japan	1997
ACI 440.1R-15	USA	2015
AASHTO 2018	USA	2018
CSA S806-12	Kanada	2017
CSA S6:19	Kanada	2019
CNR 2007	Italien	2007

Tabelle 2: Regelwerke zu Design und Bemessung von FRP-bewehrten Betonbauteilen

Um eine breite Akzeptanz des Empfehlungsleitfadens zu erreichen, wurden die Vordimensionierungstabellen in Kap. 2.3.4 prinzipiell auf Basis der Bemessungsvorschriften der EN1992-1-1 erarbeitet. Wenn notwendig wurden aber Adaptionen der Bemessungsvorschriften auf Basis des ACI 440.1R-15 vorgenommen (z.B. bei der Einführung der Abminderungsfaktoren zufolge Umwelt, Temperatur und Dauerstand).

2.3.2 Materialien

Typische Materialkennwerte verschiedener FRP-Bewehrungen sind in Tabelle 3 zu sehen. Die charakteristische Langzeitfestigkeit f_{ftk,100} der Bewehrung ergibt sich mit den Abminderungsfaktoren zufolge Temperatur C_T und Umwelteinfluss C_E in Tabelle 3 zu:

$$f_{ftk,100} = C_T \cdot C_E \cdot f_{ftk} \tag{1}$$

Die Designfestigkeit f_{ftd} ergibt sich mit dem Materialsicherheitsbeiwert γ_M zu

$$f_{ftd} = \frac{f_{ftk,100}}{\gamma_M} \tag{2}$$



(3)

Zusätzlich muss für FRP-bewehrte Bauteile die Bewehrungsspannung auf einen Beiwert für Dauerstand C_c begrenzt werden, um einen Kriechbruch zu vermeiden. Die Kennwerte in Tabelle 3 wurden auf Basis internationaler Regelwerke abgeleitet. Liegen genauere Herstellerangaben vor, sind diese den Werten aus Tabelle 3 vorzuziehen.

Eigenschaft	Einheit	Stahl Stab	CFRP Stab	CFRP Textil	GFRP Stab	BFRP Stab
Er	N/mm²	200 000	162 000	230 000	59 500	59 000
f ftk	N/mm²	550	2100	3000	1100	1300
Ст	-	1,00	0,80	0,80	0,80	0,80
CE	-	1,00	0,90	0,90	0,70	0,70
Cc	-	1,00	0,55	0,55	0,35	0,35
Υм	-	1,15	1,50	1,50	1,50	1,50
f ftd	N/mm²	478,3	1008,0	1440,0	410,7	485,3
ρ	kg/m³	7850	1500	1770	2130	2100

Tabelle 3: Materialkennwerte verschiedener FRP-Bewehrungen

2.3.3 Betondeckung

Die erforderliche Betondeckung bei Betonbauteilen ergibt sich einerseits aus einem Verbundkriterium und andererseits aus einem Dauerhaftigkeitskriterium. Da FRP-bewehrte und edelstahlbewehrte Bauteile in Relation zu Betonstahlbewehrung sehr korrosionsbeständig sind, kann die Mindestbetondeckung zur Erfüllung der Dauerhaftigkeitskriterien aus EN 1992-1-1 entfallen. Stattdessen ist nur das Verbundkriterium heranzuziehen. Die erforderliche Betondeckung aus dem Verbundkriterium kann in Abhängigkeit des Stabdurchmesser nach GI. *(3)* ermittelt werden

$$c_{min,b} \ge 2,0 \cdot \emptyset_r$$

2.3.4 Bemessungstabellen zur Querschnittsdimensionierung

Die nachfolgenden Tabellen geben mögliche Kombinationen von Bewehrungsmenge zu Bauteilhöhe, unter denen die Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit (Biegung) und in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit (Verformung, Spannungsbegrenzung, Rissbreitenbegrenzung) erfüllt sind. Es handelt sich hierbei um rein biegebeanspruchte Bauteile. Die Querschnittsgeometrie ist ein Rechteckquerschnitt mit Zugbewehrung. Normalkrafteinwirkung (auch zufolge Vorspannung) ist nicht berücksichtigt. Eine allfällige Querkraftbemessung ist gesondert durchzuführen.

In den Vordimensionierungstabellen wird generell nicht zwischen CFRP-, GFRP und BFRP-bewehrten Bauteilen unterschieden, sondern eine Abhängigkeit vom Verhältnis der E-Moduln sowie der Festigkeiten angegeben. Damit soll ein möglichst breiter Anwendungsbereich, der unterschiedlichste FRP-Bewehrungen berücksichtigt, abgedeckt werden.

Biegetragfähigkeit

Bei Betonbauteilen, die mittels nichtmetallischer Bewehrung bewehrt sind, ist zu beachten, dass die Bewehrung keine Fließgrenze aufweist. So ist die bekannte Annahme eines Fließens der Bewehrung bei gleichzeitigem Erreichen der Betondruckfestigkeit nicht gerechtfertigt. Vielmehr sind in Abhängigkeit des Bewehrungsgrades zwei Fälle im Traglastzustand zu unterscheiden:

- Bruch der Bewehrung, die Betondruckfestigkeit ist noch nicht erreicht
- Versagen der Betondruckzone, die Bruchfestigkeit der Bewehrung ist nicht ausgeschöpft.

Abb. 1 gibt die Biegetragfähigkeit bezogen auf die Querschnittsdimensionen und der Designfestigkeit in Abhängigkeit des Bewehrungsgrades wieder. Jener Bewehrungsgrad, bei dem ein Wechsel vom Faserversagen hin zum Betonversagen stattfindet, wird der ausgeglichene Bewehrungsgrad genannt. Dieser ent-



spricht dem Knickpunkt in Abhängigkeit des Verhältnisses der Bewehrungsfestigkeit zur Betondruckfestigkeit, bei dem die Gerade, die ein Faserversagen beschreibt, in den nichtlinearen Verlauf des Betonversagens übergeht (grüne Linie in Abb. 1).



Abb. 1: Vorbemessungsdiagramm zur Bestimmung des Querschnittswiderstandes bei biegebeanspruchten Bauteilen, die mit nichtmetallischer Bewehrung bewehrt sind.

Darüber hinaus ist eine Abhängigkeit der Biegetragfähigkeit vom Verhältnis der E-Moduln der Bewehrung und des Betons gegeben. Diese kann durch eine Potenzfunktion nach GI. (5) beschrieben werden. Für E-Modul Verhältnisse $\alpha_r < 6,1$ ist demnach eine Abminderung der Biegetragfähigkeit aus *Abb. 1* vorzunehmen.

$$\alpha_r = \frac{E_r}{E_{cm}} \tag{4}$$

$$M_{Rd(\alpha_r < 6,1)} = M_{Rd(\alpha_r = 6,1)} \cdot 0.46 \cdot \alpha_r^{0.44}$$
(5)

Begrenzung der Verformungen

Eine Begrenzung der Verformungen kann vereinfacht über eine Begrenzung der Biegeschlankheit erfolgen. In Tabelle 4 sind Grenzwerte der Biegeschlankheit nach EN 1992-1-1 angeführt, die für eine Betonklasse C30/37 und einer Betonstahlbewehrung Bst550 abgeleitet wurde.

Tabelle 4: Biegeschlankheiten zur Begrenzung der Verformungen

Statisches System	Beton hoch beansprucht $\rho_l = 1,5 \%$	Beton gering beansprucht $\rho_l = 0.5 \%$
frei drehbar gelagerter Einfeldträger; gelenkig gelagerte einachsig oder zweiachsig gespannte Platte	18	25
Endfeld eines Durchlaufträgers oder einer einachsig gespannten durchlaufenden Platte; Endfeld einer zweiachsig gespannten Platte, die kontinuierlich über die längere Auflagerseite durchläuft	23	32
Mittelfeld eines Balkens oder einer einachsig oder zweiachsig ge- spannten Platte	25	35
Platte, die ohne Unterzüge auf Stützen gelagert ist (Flachdecke) (auf Grundlage der größeren Spannweite)	21	30
Kragträger	7	10



Im Folgenden werden Grenzwerte der Biegeschlankheiten für FRP-bewehrte Bauteile abgeleitet. Es ist eine Abhängigkeit vom Verhältnis der Festigkeiten und der E-Moduln (Bewehrung/Beton) gegeben. Für die Vordimensionierung von FRP-bewehrten Bauteilen sind die Werte nach Tabelle 4 mit entsprechenden Abminderungsfaktoren zu beaufschlagen.

für $f_{ftk,100}/f_{ck} > 20$

$$l/d_{(f_{ftk,100}/f_{ck}>20)} = \frac{l}{d_{(Tab.4)}} \cdot 5,08 \cdot \alpha_r^{-0,54}$$
(6)

für $\alpha_r < 6.1$

$$l/d_{(\alpha_r < 6,1)} = l/d_{(\alpha_r < 6,1)} \cdot 0,043 \cdot \alpha_r + 0,73$$
(7)

Tabelle 4 und Gl. (6) und (7) liegen folgende Annahmen zugrunde:

- Verhältnis quasiständiger Last zu Designlast 50% dies entspricht etwa einem Verhältnis der quasiständigen Last zur charakteristischen Last von 70%
- Langandauernde Belastung $\rightarrow k_t = 0.5$
- Kriechbeiwert $\varphi_{(t0,\infty)} = 2,5$
- w_{zul} = I/250

Für stark davon abweichende Randbedingungen im Projekt sind gesonderte Überlegungen oder eine genaue Verformungsberechnung durchzuführen.

Begrenzung der Rissbreiten

Die Begrenzung der Rissbreiten erfolgt in Anlehnung an EN 1992-1-1 über die Begrenzung der Bewehrungsdurchmesser.



Abb. 2: Vorbemessungsdiagramm zur Begrenzung der Rissbreiten.

Abb. 2 wurde unter verschiedenen Annahmen hergleitet, die nachfolgend angeführt sind. Weichen die tatsächlich vorliegenden Materialien von diesen Annahmen ab sind Adaptionen notwendig.

- Zugfestigkeit Beton f_{ctm} = 2,9 MPa. Für abweichende Zugfestigkeiten ist der Stabdurchmesser mit dem Verhältnis f_{ctm} / 2,9 anzupassen
- Verbundfestigkeit Bewehrung T_b = 1,8 MPa. Für abweichende Verbundfestigkeiten ist der Stabdurchmesser mit T_b / 1,8 anzupassen.
- E-Modul Bewehrung E_r = 200.000 MPa. Für abweichende Verhältnisse ist der zulässige Bewehrungsdurchmesser um das Verhältnis E_r / 200.000 (in MPa) anzupassen.



Der effektive Bewehrungsgrad ρ_{eff} beschreibt den Bewehrungsgrad bezogen auf den Wirkungsbereich der Bewehrung, um eine Sekundärrissbildung zu berücksichtigen. Die effektive Höhe der Zugzone h_{eff} ergibt sich für biegebeanspruchte Bauteile als Minimum der folgenden Bedingung:

$$h_{c,eff} = min\left[2,5 \cdot (h-d); \frac{h-x}{3}; \frac{h}{2}\right]$$
(8)

Zufolge der Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreiten können auch höhere Bewehrungsmengen erforderlich werden. Dieser Nachweis ist gesondert nach EN 1992-1-1 zu führen.

Begrenzung der Spannungen

Für die Berechnung der Spannungen in FRP-bewehrten Bauteilen wird *Abb.* 3 als Hilfestellung angegeben. Die Spannungen weisen eine Abhängigkeit vom Verhältnis der E-Moduln auf.



Abb. 3: Spannungen in FRP-bewehrten Bauteilen in Abhängigkeit der Materialeigenschaften der Bewehrung und des Betons und der Geometrie des Querschnittes.

Für abweichende Bewehrungsgrade bzw. für Verhältnisse der E-Moduln, die zwischen den in *Abb.* 3 angegebenen Bandbreitenbereich liegen, kann eine direkte Berechnung der Spannungen nach Gl. (9)-(11) durchgeführt werden

$$\xi = -\alpha_r \rho_l + \sqrt{(\alpha_r \rho_l)^2 + 2\alpha_r \rho_l} \tag{9}$$

$$\sigma_c = \frac{M_E}{bd^2 \frac{\xi}{2} \left(1 - \frac{\xi}{3}\right)} \tag{10}$$

$$\sigma_t = -\sigma_c \alpha_r \left(\frac{1}{\xi} - 1\right) \tag{11}$$

Typische Grenzwerte der Spannungsbegrenzung in Anlehnung an ACI 440.1R-15 sind in Tabelle 3 angegeben. Sind genauere Herstellerangaben vorhanden, so sind diese den Werten in Tabelle 3 vorzuziehen



2.3.5 Ökologische Kennzahlen

Tabelle 5 beinhaltet Umweltindikatoren pro kg FRP- bzw. Edelstahlbewehrung nach ÖNORM EN 15804. Diese bilden die Grundlage für eine objektive ökologischen Beurteilung. Die ÖNORM EN 15804 unterteilt den Lebenszyklus eines Bauwerks in unterschiedliche Lebenszyklusphasen (Herstellungsphase (A1-A3), Bauphase (A4-A5), Nutzungsphase (B1-B7) und Entsorgungsphase (C1-C4)). Da die Mehrheit der veröffentlichen EPDs sich auf die Herstellungsphase beschränken und die verfügbaren Umweltdaten für die restlichen Phasen hinsichtlich Datenqualität nicht vollständig sind, berücksichtigen die aufgelisteten Umweltindikatoren nur die Herstellungsphase des Produktes (A1-A3), auch bezeichnet als "von der Wiege bis zum Werkstor" (engl.: cradle-to-gate).

Aufgrund des wesentlich geringeren Gewichts von FRP-Bewehrung im Vergleich zu konventioneller Stahlbewehrung sind ökologische Vorteile in der Transport- und Herstellungs-Phase (A4-A5) zu erwarten. Der oftmals korrosionsbeständige Charakter, bspw. Von CFRP oder GFRP (AR-Glas) Bewehrung, ermöglicht darüber hinaus eine Ausdehnung der Lebensdauer sowie eine Reduktion der Erhaltungskosten im Vergleich zu Bauteilen aus konventionellem Stahlbeton. Dies führt wiederum zu Vorteilen hinsichtlich der Umweltauswirkungen. Die Datenlage zur Entsorgungs- bzw. Recyclingphase von faserverstärkten Kunststoffen ist gering und bedarf weiterer Forschung, um eine valide Aussage hinsichtlich seiner Umweltrelevanz treffen zu können. Untersucht wird aktuell in diesem Zusammenhang vor allem die Trennung von Faser und Matrixmaterial, wie z.B. die dafür notwendigen Prozesse wie die Pyrolyse oder Solvolyse. Aktuelle Untersuchungen zeigen, dass das Recycling von FRP Elementen aktuell hauptsächlich bei CFRP hinsichtlich Ökologie und Ökonomie aufgrund eines hohen Primärrohstoffbedarfs in der Herstellung sowie auch vergleichsweiser hoher Kosten der Carbonfasern relevant ist. Aufgrund der zunehmend höheren Anforderungen an das Recycling von Baustoffen (Deponierungsnovelle It. BGBI. II 144/2021 die am 01.04.2021 veröffentlicht wurde und ab 01.01.2024 in Kraft tritt) wird zukünftig auch das Recycling von FRP Bewehrungen mit anderen Fasermaterialien relevant werden.

Die folgenden Indikatoren sind Tabelle 5 zu entnehmen: GWP – Global Warming Potential, AP – Acidification Potential, AE – Accumulated Exceedance (Die ÖNORM EN 15804 wurde 2020 aktualisiert, wobei für das Versauerungspotential nun die Accumulated Exceedance (AE) anstelle des Acidifcation Potentials (AP) tritt), ADP – Abiotic Depletion Potential. Die Produktionsphase nach ÖNORM EN 15804 (A1-A3) wurde berücksichtigt.

Für die Berechnung der Wirkungsindikatoren für einen zu bewertenden Bauteil werden die Werte aus Tabelle 5 mit den Massen des Bauteils multipliziert.

	GFRP	BFRP	CFRP	ER
GWP [kg CO ₂ -Äq.]	2,1	1,6	21,5	3,7
AP [kg SO₂-Äq.]	7,3E-03	5,4E-03	2,5E-01	1,8E-02
AE [mol H+-Äq.]	1,0E-02	-	1,7E-01	-
ADP nicht fossil [kg Sb-Äq.]	1,8E-06	1,8E-02	1,1E-05	5,4E-05
ADP fossil [MJ]	37,9	-	338,7	40,9

Tabelle 5: Ökologische Kennzahlen verschiedener Bewehrungsmaterialien pro kg Baustoff

2.3.6 Ökonomische Kennzahlen

Die Kosten verschiedener FRP-Produkte ist stark abhängig von den Materialien (Fasermaterial/Tränkungsmaterial) und der Herstellungsmethode. Auf Basis einer Umfrage von mehreren Unternehmen, die FRP-Bewehrungen herstellen wird in Tabelle 6 eine Bandbreite für Kosten bei FRP-Bewehrungen angegeben. Es ist anzumerken, dass die Hersteller darüber hinaus betonen, dass die Kosten sehr projektspezifisch sind und z.B. größeren Abnahmemengen geringer ausfallen können. Es wird deshalb für konkretere Werte eine direkte Anfrage empfohlen.

Die in Tabelle 6 für Edelstahlbewehrungen angegebenen Preise stellen handelsübliche Preise für diese Art der Bewehrung dar.



	GFRP	BFRP	CFRP	ER	
Stab [€/kg]	8	6	100	6	
Textil [€/ka]	20	20	40	6	

Tabelle 6: Ökonomische Kennzahlen verschiedener Bewehrungsmaterialien pro kg Baustoff

2.3.7 Beurteilung der Kosten und des Umwelteinflusses bei Errichtung

Die Beurteilung des ökologischen und ökonomischen Anwendungspotentials verschiedener FRP-Bewehrungen im Betoninfrastrukturbau erfolgt durch Verknüpfung der erhaltenen Materialmassen aus den Vorbemessungsdiagrammen in Kap. 2.3.4 oder aus einer detaillierten Bemessung, mit den entsprechenden Kennzahlen in Kap. 2.3.5 und Kap. 2.3.6. In Abb. 4 sind die Ergebnisse einer Parameterstudie an einer 6m langen Einfeldträger- Plattenbrücke zu sehen, bei der die SLS- und ULS Nachweise aus Kap. 2.3.4 für verschiede Verhältnisse der Bewehrungsquerschnittsfläche A_f (aufgetragen auf der x-Achse) zur Bauteilhöhe d (y-Achse) ausgewertet wurden. Der Bereich der oberhalb aller Kurven zu liegen kommt (grau schraffierter Bereich) ist jener Bereich, wo alle Nachweise gerade noch erfüllt sind. Wird diese Umhüllende mit den ökonomischen und ökologischen Kennzahlen aus Kap. 2.3.5 und Kap. 2.3.6 verknüpft ergeben sich der Umwelteinfluss (hier in Form des GWP; grüne Kurve) sowie die Kosten (gelbe Kurve) des Tragwerks/m Spannweite für die unterschiedlichen möglichen Kombinationen aus Bewehrungsfläche zu Bauteilhöhe. Die in der jeweiligen Farbe zugehörige schraffierte Flächen kennzeichnen den alleinigen Anteil des Betons in Relation zu den Gesamtkosten bzw. Umwelteinfluss.







Abb. 4: Grenzkurven der Einfeldbrücke und Darstellung des damit verknüpften GWP und der Kosten für (a) betonstahlbewehrt, (b) CFRP-bewehrt und (c) GFRP bewehrt.

Bei Betrachtung des GWP-Verlaufs und der Kosten der CFRP-Variante ist ein steiler Anstieg nach einem ausgeprägten lokalen Minimum zu erkennen, obwohl die Bauteildicke mit zunehmender Bewehrungsfläche deutlich sinken. Dies folgt aus dem großen Einfluss der Bewehrung, die am rechten Rand der Darstellung mehr als die Hälfte des GWPs der Gesamtkonstruktion ausmacht. Speziell bei carbonbewehrten Bauteilen ist demnach auf ein optimales Design Acht zu geben, da in der Regel ein eng umgrenzter optimaler Bereich existiert in dem die Kosten als auch der ökologische Einfluss minimal ist.

Dies ist bei der betonstahlbewehrten Varianten weniger stark ausgeprägt, da hier umgekehrt die notwendige Betonmasse das GWP der Gesamtkonstruktion stärker bestimmt. Bei Betrachtung der GFRP-Variante ist hingegen festzustellen, dass die geringsten Treibhauspotentiale mit ebendieser Varianten erzielt werden können. Der Verlauf der Materialkosten sieht umgekehrt aber anders aus als der ökologische Verlauf. Dieser wird sehr stark von den Materialkosten der Bewehrungen bestimmt, wodurch auch hier ein steiler Anstieg nach dem optimalen Querschnitt zu erkennen ist.

Die oben genannten Spezifika sind bei einer Vordimensionierung zu berücksichtigen, um ein optimales Design zu gewährleisten. Für BFRP-bewehrte Bauteile lassen sich dieselben Rückschlüsse ziehen wie für GFRP-bewehrte Bauteile.

ANHANG A - Beispielrechnung

A.1 Allgemeines

Die Anwendung des Leitfadens wird Anhand eines gewählten Bauteils aufgezeigt. Bei dem gewählten Bauteil handelt es sich um eine reguläre Bahnsteigkante. Dies ist lediglich als Beispiel anzusehen.







A.2 Stufe I

Die Tabelle aus Stufe I wird zur Beurteilung der Eignung von allen Bewehrungsart verwendet, um einen Vergleich der Bewertung zu ermöglichen. Da es sich um eine Bahnsteigkante handelt und nicht alle Beurteilungskriterien aus Stufe I für das Bauteil zutreffen werden die unpassenden Kriterien nicht beachtet.

		BST	CFRP	GFRP BFRP	ER
1	Dauerhaftigkeit/Instandhaltung				
1.1	Extrem ungünstige, korrosionsfördernde Umgebungsverhältnisse (tausalzbe- anspruchte Bauteile, Stützwände, Meeresumgebung, Parkdecks)	-	+	+	+
1.2	Spritzwasser gefährdet (Brückenpfeiler bei Überführungen, Tunnel)	-	+	+	+
1.3	Drückendes Wasser	-	+	+	+
1.4	Sonderkonstruktion (Anschlussbewehrung zwischen Ortbeton und Fertigteil, wärmegedämmte Übergänge, Bewehrung kreuzt Fugen, Balkonanschlüsse, rissbehaftete Bauteile)	-	+	+	+
1.5	Nicht inspizierbare Bewehrungslage	-	+	+	+
1.6	Mischbewehrung (mit Stahl) erwünscht	+	_ 1	+	+
2	Materialeffizienz				
2.1	Verwendung von Leichtbeton mit poröser Gefügestruktur	-	+	+	+
2.2	Abweichung der normativ angegebenen Betondeckung		+	+	+
2.3	Sehr geringe Betondeckung erwünscht		+	+	~
2.4	Dünne und leichte Elemente angestrebt (Materialeffizienz)	-	+	+	~
2.5	Hoher Bewehrungsgrad (BST, Edelstahl) des Bauteils	-	+	~	-
2.6	Anschaffungskosten	+	-	~	-
3	Beanspruchung				
3.1	Feuerbelastung	+		/~4	+
3.2	Konstruktive Bewehrung	+	~	+	~
3.3	Elektromagnetisch belastetes Umfeld			+	
3.4	Druck Belastung, Momentenumlagerung bei Fließgelenk	+	~ 5	~	+
3.5	Große Spannweiten	+	_ 6	6	+
4	Herstellung				
4.1	Fertigteil - Handhabung	~	+	+	~
4.2	Fertigteil - Transport	~	+	+	~
4.3	Ortbeton - Handhabung	~	+ 7	+ 7	~
4.4	Ortbeton - Einbau	+	-	-	+
4.5	Ortbeton - Biegung	+	_ 8	_ 8	+
4.6	Temporäres Bauteil – Ökonomischer und Ökologischer Aspekt	+	-	~	~
4.7	Temporäres Bauteil - Abbruch	~	+	+	~
4.8	Kosten	+	-	+	-

Ergebnis aus Stufe I:

BSt

t Falls eine Abweichung der normativ angegeben Betondeckung, somit eine geringere Betondeckung erwünscht ist, um die Materialeffizienz zu steigern, ist die Anwendung von BSt unzulässig. Werden Punkte 2.2 und 2.3 nicht berücksichtigt so ergibt sich eine Bewertung mit 3(+), 2(~) und 3(-).

CFRP	7(+), 1(~), 2(-)
GFRP/BFRP	9(+), 1(~)
ER	3(+), 5(~), 2(-)

Die Ergebnisse aus Stufe I zeigen ein Potential für den Einsatz von nichtmetallischer Bewehrung auf. Die Materialeffizienz kann durch eine geringere Betondeckung erreicht werden, wodurch eine Bewehrung mit BSt problematisch wird. Eine Bewehrung mit GFRP bzw. BFRP zeigt das höchste Potential auf, wobei GFRP für eine weitere Begutachtung in Stufe II herangezogen wird.



A.3 Stufe II – genaueres Verfahren

A.3.1 Schnittgrößen

Die berechneten Schnittgrößen für vorliegendes Bsp. sind in nachfolgender Abbildung ersichtlich.



A.3.2 Materialkennwerte

Die Bahnsteigkante wird mit GFRP-Bewehrung bewehrt. Folgende Materialkennwerte der Bewehrung wurden Tabelle 3 entnommen:

	Ef	f _{ftk}	Ст	CE	Cc	γм	ρ
	[N/mm²]	[N/mm²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kg/m³]
GFRP Stab	59500	1100	0,8	0,7	0,35	1,5	2130

Um den Einfluss der Temperatur und der Umwelteinwirkungen zu berücksichtigen ist die Zugfestigkeit nach 100 Jahren zu berechnen:

$$f_{ftk,100} = C_T \cdot C_E \cdot f_{ftk} = 0.8 \cdot 0.7 \cdot 1100 = 616 \text{ N/mm}^2$$

Die Designzugfestigkeit ergibt sich in weiterer Folge zu:

$$f_{\rm ftd} = \frac{f_{\rm ftk,100}}{\gamma_{\rm M}} = \frac{616}{1.5} = 410.7 \, N/mm^2$$



Für den Beton wird eine Betonfestigkeitsklasse C25/30 gewählt. Die Materialkennwerte, die nachfolgend angeführt sind, wurden EN 1992-1-1 entnommen.

	E _{cm}	f _{ck}	f _{ctk}	үм	ρ
	[N/mm²]	[N/mm²]	[-]	[-]	[kg/m³]
C25/30	31000	25	0,8	1,5	2400

Die Designfestigkeit des Betons berechnet sich zu:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_M} = \frac{25}{1.5} = 16,67 \, N/mm^2$$

Das Verhältnis der E-Moduln ergibt sich demnach zu:

$$\alpha_r = \frac{E_r}{E_{cm}} = \frac{59\,500}{31\,000} = 1,92$$

Das Verhältnis der Festigkeiten von Bewehrung und Beton ergibt sich zu:

$$f_{ftk,100}/f_{ck} = 24.64$$

A.3.3 Betondeckung

Als Bewehrung werden Glasfaserstäbe Ø 8mm gewählt. Die Mindestbetondeckung aus dem Verbundkriterium ergibt

$$c_{min,b} = 2,0 \cdot \phi_r = 2,0 \cdot 8 = 1,6 mm$$

A.3.4 Bauteilhöhe

In einem ersten Schritt wird die erforderliche Bauteilhöhe über die Begrenzung der Verformungen abgeschätzt. Dazu wird das entsprechende I/d-Verhältnis aus Tabelle 4 abgelesen. Das statische System der Bahnsteigkante kann als Kragarm idealisiert werden. Da die Belastungen auf das Bauteil verhältnismäßig gering sind wird angenommen, dass es sich um ein gering bewehrtes Bauteil handelt ($\rho_I = 0,5$). Dadurch ergibt sich eine max. zul. Biegeschlankheit von I/d = 10. Diese ist um die Beiwerte nach GI 2 und 3 zu korrigieren um den Einfluss der Steifigkeit und Festigkeit zu berücksichtigen

Statisches System	Beton hoch bean- sprucht ρ _l = 1,5 %	Beton gering bean- sprucht ρ _l = 0,5 %
Kragträger	7	10

$$l/d_{(f_{ftk})} = \frac{l}{d_{(Tab.2)}} \cdot 5.08 \cdot \alpha_r^{-0.54} = 10 \cdot 5.08 \cdot 44^{-0.54} = 9.0$$

$$l/d_{(\alpha_r < 6,1)} = l/d_{(f_{ffk})} \cdot 0,043 \cdot \alpha_r + 0,73 = 9.0 \cdot 0,043 \cdot 1,9 + 0,73 = 7,3$$

Die erforderliche statische Nutzhöhe ergibt sich bei einer Kragarmlänge von 0,95 m zu:

$$d_{erf} = \frac{l}{7.3} = \frac{950}{7.3} = 130 \ mm$$

Die Bauteilhöhe ergibt sich demnach zu

$$h_{erf} = d_{erf} + c = 130 + 15 = 145 \, mm$$



A.3.5 Erforderliche Biegebewehrung

Zur Abschätzung der erforderlichen Biegebewehrung wird mit dem Diagramm in Abb. 1 unter Annahme eine Bewehrungsgrades ein Momentenwiderstand berechnet und der Einwirkung gegenübergestellt. In Abhängigkeit der Verhältnisse der E-Moduln und der Festigkeiten von Bewehrung und Beton ist der aus Abb. 1 abgelesene Momentenwiderstand entsprechend anzupassen.



Für ein Verhältnis von $f_{td}/f_{cd} \sim 25$ ergibt sich $M_{Rd}/(b \cdot d^2 \cdot f_{td}) = 4,1$. Mit einer statische Nutzhöhe d = 130 mm und einer Designzugfestigkeit $f_{ftd} = 410,7$ N/mm² ergibt sich bei einer Breite b = 1000 mm der Momentenwiderstand M_{Rd} zu

$$M_{Rd(\alpha_r=6,1)} = 4,1 \cdot b \cdot d^2 \cdot f_{td} = 4,1 \cdot 1000 \cdot 130^2 \cdot 410,7 \cdot 10^9 = 27,8 \ kNm$$

Dieser Wert ist mit Gl. (5) abzumindern, um das Verhältnis der E-Moduln zwischen Bewehrung und Beton zu berücksichtigen.

 $M_{Rd} = M_{Rd(\alpha_r=6,1)} \cdot 0,46 \cdot \alpha_r^{0.44} = 27,8 \cdot 0,46 \cdot 1,9^{0,44} = 16,93 \ kNm > M_{Ed} = 15,3 \ kNm \checkmark$

A.3.6 Begrenzung der Spannungen

Für die Begrenzung der Spannungen wird in Abhängigkeit der E-Moduln von Bewehrung und Beton und des Bewehrungsgrades das Verhältnis von $\sigma_r \cdot b \cdot d^2/M$ bzw. $\sigma_c \cdot b \cdot d^2/M$ aus *Abb. 3* abgelesen.



Seite 17 von 20



Zwischen den einzelnen Kurven kann auf der sicheren Seite liegend linear interpoliert werden.

α _r	σ _r ·b·d²/M [-]	σ _c ·b·d²/M [-]
1,5	2,1·10 ⁸	-18,0·10 ⁶
3,0	2,1·10 ⁸	-13,2·10 ⁶
1,9	2,1·10 ⁸	-16,7·10 ⁶

Alternativ kann eine exakte Berechnung nach Gl. (9)-(11) durchgeführt werden. Dadurch ergeben sich etwas genauere Werte:

$$\begin{split} \xi &= -\alpha_r \rho_l + \sqrt{(\alpha_r \rho_l)^2 + 2\alpha_r \rho_l} = -1.9 \cdot 0.5 + \sqrt{(1.9 \cdot 0.5)^2 + 2 \cdot 1.9 \cdot 0.5} = 0.129\\ \sigma_c &= \frac{M_E}{b d^2 \frac{\xi}{2} \left(1 - \frac{\xi}{3}\right)}\\ \sigma_r &= -\sigma_c \alpha_r \left(\frac{1}{\xi} - 1\right) \end{split}$$

Die sich ergebenden Spannungen unter charakteristischer bzw. quasi-ständiger Einwirkungskombination sind für beide Varianten nachfolgend tabellarisch aufgelistet

		Bestimmung nach Abb. 3		Berechnung nach Gl. (9)-(11)	
	M _E [kNm]	σ _r [N/mm²]	σ _c [N/mm²]	σ _r [N/mm²]	σ_{c} [N/mm ²]
Charakteristisch	10,3	124,6	-9,9	123,7	-9,6
Quasi-ständig	4,5	55,9	-4,5	55,7	-4,3

$$\begin{split} \sigma_{r,k} &= 123,7 \text{ N/mm}^2 < f_{ftk,100} \cdot C_c = 616 \cdot 0,35 = 215,6 \text{ N/mm}^2 \checkmark \\ \sigma_{c,k} &= |-9,6| \text{ N/mm}^2 < f_{ck} \cdot k_1 = 25 \cdot 0,6 = 15,0 \text{ N/mm}^2 \checkmark \end{split}$$

 $\sigma_{c,qs}$ = |-4,3| N/mm² < $f_{ck} \cdot k_1$ = 25 \cdot 0,45 = 11,3 N/mm² \checkmark

A.3.7 Begrenzung der Rissbreiten

Für die Begrenzung der Rissbreiten wird das Diagramm in *Abb. 2* herangezogen. Der effektive Bewehrungsgrad ergibt sich, unter Berechnung einer Betondruckzonenhöhe mit einem dreieckförmigen Spannungsverlauf zu:

$$x = \xi \cdot d = 0,129 \cdot 130 = 16,7 mm$$

$$h_{c,eff} = \min \left[2,5 \cdot (h-d); \frac{h-x}{3}; \frac{h}{2} \right] = \min \left[2,5 \cdot (145 - 130); \frac{145 - 16,7}{3}; \frac{145}{2} \right] = 37,5 mm$$

$$A_{c,eff} = h_{c,eff} \cdot b = 37,5 \cdot 1000 \cdot 10^{-2} = 375 cm^{2}$$

$$\rho_{eff} = \frac{A_{r}}{A_{c,eff}} = \frac{6,5}{375} = 0,017$$





Aus *Abb.* 2 lässt sich für einen effektiven Bewehrungsgrad von $\rho_{eff} = 0,017$ ein zulässiges Verhältnis $\mathcal{Q}_r/w_{k,zul} = 97$ auslesen. Dabei wurde eine Spannung in der Bewehrung von 200 N/mm² angenommen. In Kap. A.3.6 wurde unter quasi-ständiger Kombination eine noch geringere Spannung ausgerechnet, weshalb der angenommen Wert von 200 N/mm² auf der sicheren Seite liegt. Eine Extrapolation des Diagrammes, wird in diesem Fall deshalb nicht durchgeführt.

Dieser Wert ist zu korrigieren, falls die mittlere Betonzugfestigkeit f_{ctm} , E_r und T_b von den ursprünglichen Annahmen die dem Diagramm zugrunde liegen abweichen (f_{ctm} = 2,9 N/mm², E_r = 200.000 N/mm² und T_b = 1,8 N/mm²). Für vorliegenden Fall betrifft dies den E-Modul der Bewehrung und die Betonzugfestigkeit. Der korrigierte Wert von $d_r/w_{k,zul}$ ergibt sich demnach zu:

$$\frac{\emptyset_r}{W_{k,zul}} = \frac{\emptyset_r}{W_{k,zul}} (unkor.) \cdot \frac{f_{ctm}}{2,9} \cdot \frac{Er}{200\,000} = 97 \cdot \frac{2,6}{2,9} \cdot \frac{59500}{200\,000} = 25,9$$

Unter Berücksichtigung einer Zulässigen Rissbreite von 0,4 mm ergibt sich demnach ein zulässiger Bewehrungsdurchmesser von

$$d_r = w_{k,zul} \cdot \frac{d_r}{w_{k,zul}} = 0.4 \cdot 25.9 = 10.4 \ mm > d_{vorh} = 8 \ mm \checkmark$$

Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite

Die Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite wird mit dem in der EN 1992-1-1 für Betonstahlbewehrung angegebenen Verfahren durchgeführt. In diesem Fall muss nachgewiesen werden, dass die bei Rissbildung auftretenden Zugkraft von der Bewehrung aufgenommen werden kann. Es ist keine Abhängigkeit vom Verhältnis der E-moduln bzw. der Festigkeiten vorhanden, weshalb Formel 7.1 aus EN 1992-1-1 uneingeschränkt verwendbar ist.

$$A_{r,min} = \frac{k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct}}{\sigma_r} = \frac{0.4 \cdot 1.0 \cdot 2.6 \cdot (0.5 \cdot 1000 \cdot 145)}{200} \cdot 10^{-2} = 3,77 \ cm^2 < A_{r,vorh} = 6,50 \ cm^2 \checkmark$$

mit

kc = 0,4 bei biegebeanspruchten Rechteckquerschnitten

k = 1,0 bei Bauteilhöhen < 300 mm

 $f_{ct,eff} = f_{ctm}$

 $A_{ct} = 0.5 \cdot b \cdot h$ (Fläche der Betonzugzone im ungerissenen Querschnitt)

σr = 200 N/mm² (es wird jener Wert herangezogen der beim Nachweis der Begrenzung des Durchmessers der Bewehrung im vorigen Abschnitt verwendet wurde)



A.4 Ökonomische und Ökologische Auswertung

Mit der im vorigen Abschnitt ermittelten Betonquerschnittsfläche und der Bewehrungsfläche können Materialmassen (z.B. je Laufmeter) bestimmt werden. Dadurch kann ein Vergleich der Kosten und der ökologischen Auswirkungen auf Errichtungsebene gezogen werden. Die Auswertung in diesem Abschnitt bezieht sich lediglich auf den vertikalen Abschnitt der Bahnsteigkante und berücksichtigt keine konstruktive Bewehrung. Diese ist gesondert zu betrachten.

Die vorhandenen Materialmassen ergeben sich je Laufmeter zu:

$$V_c = A_c \cdot L = (145 \cdot 1000 - 650) \cdot 950 \cdot 10^{-9} = 0.137m^3$$
$$m_c = V_c \cdot \rho_c = 0.137 \cdot 2400 = 329.8 kg$$

$$V_r = A_r \cdot L = 650 \cdot 950 \cdot 10^{-9} = 0,618 * 10^{-3} m^3$$
$$m_r = V_r \cdot \rho_r = 0,618 * 10^{-3} \cdot 2130 = 1,3 kg$$

Die ökologischen Auswirkungen ergeben sich mit den Werten aus **Tabelle 5** demnach zu:

	GFRP [1 kg]	Beton [1 m ³] ¹	Bauteil
GWP [kg CO ₂ -Äq.]	2,1	197	29,8
AP [kg SO ₂ -Äq.]	7,3E-03	0,29	4,9E-02
ADP nicht fossil [kg Sb-Äq.]	1,8E-06	6,43E-04	9,05E-05
ADP fossil [MJ]	37,9	900	173,3

Die Kosten ergeben sich mit den Werten aus Tabelle 6

	GFRP [1 kg]	Beton [1 m ³]	Bauteil
Kosten [€]	8	120	27,0

¹ Institut Bauen und Umwelt e. V. (IBU) (2018) Beton der Druckfestigkeitsklasse C 25⁄30, Umwelt-Produktdeklaration EPD-IZB-20180101-IBG1-DE, Inhaber: InformationsZentrum Beton GmbH, 2018.