

Master's Thesis

Investigations on the potential for application of non-metallic reinforcement in structural concrete

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

Diplomarbeit

Untersuchungen zum Einsatzpotential nichtmetallischer Bewehrungen im Betonbau

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades einer
Diplom-Ingenieurin
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Laura Krug, BSc

Matr.Nr.: 11727596

unter der Anleitung von

O.Univ.Prof. Dr.-Ing. **Johann Kollegger**

Dipl.-Ing. Dr.-Ing. **Philipp Preinstorfer, BSc**

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

Wien, im Oktober 2020



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kurzfassung

Die Klimakrise, ausgelöst durch große Mengen anthropogener Treibhausgase, bedroht unseren Planeten auf nie da gewesene Weise. Die Bauindustrie und insbesondere der Betonsektor haben einen großen Anteil daran. Als Folge dessen entstand der Ansatz, die Effizienz von Betonbauteilen mit Bewehrungen aus Hochleistungsfasern zu steigern, um Ressourcen und Treibhausgasemissionen einzusparen. Mit der Verwendung von nichtmetallischen Faserverbundkunststoffen als Bewehrung kann außerdem die Dauerhaftigkeit der Tragwerke gesteigert werden, da keine Korrosion stattfindet. Das Ziel dieser Arbeit ist es, das ökologische Potenzial nichtmetallischer Bewehrung bei Verwendung im Betonbau aufzuzeigen. Dazu wird ein Vergleich zwischen Stahlbeton und FRP-bewehrten Bauteilen durchgeführt. Im deutschsprachigen Raum gibt es derzeit aber keine Richtlinien, nach denen eine Bemessung mit diesen Bewehrungen erfolgen kann. Daher werden in dieser Arbeit international verfügbare Richtlinien betrachtet und verglichen.

Als Bemessungsgrundlage für die darauffolgende Parameterstudie wurden die Vorschriften des ACI 440 2015 herangezogen und ein Einfeldträger mit Rechteckquerschnitt dimensioniert. Der Biegewiderstand, die Durchbiegung und das Treibhauspotenzial wurden in Abhängigkeit der Bewehrungsfläche, der zugehörigen statischen Nutzhöhe und der Trägerlänge untersucht. Dabei wurden Carbon, AR-Glas, Basalt und Betonstahl als Bewehrungsmaterial herangezogen. In allen Berechnungen stellte sich die Begrenzung der Verformung als maßgebender Nachweis heraus. Die mindestens erforderlichen, betrachteten Querschnittsabmessungen steigen mit der Trägerlänge linear an. Carbon weist die günstigsten mechanischen Eigenschaften auf, dementsprechend sind die notwendigen Querschnittsabmessungen am geringsten. Gleichzeitig ist es das Bewehrungsmaterial mit dem größten Treibhauspotenzial.

Dem entgegen stehen die etwa vergleichbaren Materialien AR-Glas und Basalt, die deutlich geringere Zugfestigkeiten und Elastizitätsmodule aufweisen sowie über die Zeit weniger dauerhaft sind. Damit sind für die Nachweise größere Mengen Bewehrung und eine größere statische Nutzhöhe notwendig. Der wesentliche Vorteil dieser Bewehrungen liegt in ihrem weitaus kleineren Treibhauspotenzial, aber auch in der Verfügbarkeit sowie den Kosten.

Das Einsatzpotenzial aller nichtmetallischen Bewehrungsmaterialien ist angesichts der Bemessungsmöglichkeiten gegeben. Für einen deutlicheren Vorteil hinsichtlich Bemessung und ökologisches Wirken gegenüber dem konventionellen Betonstahl sind jedoch Optimierungen notwendig. Diese können von den Bemessungsvorschriften, über die Wahl des statischen Systems, der Querschnittswahl, Vorspannung bis hin zu der Betonzusammensetzung reichen.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abstract

The climate crises, caused by large amounts of anthropogenic greenhouse gases, threatens our planet in an unprecedented way. The construction industry, and in particular the concrete sector, is a major contributor to this. This led to the approach to increase the efficiency of concrete components with reinforcements made of high-performance fibers in order to save resources and greenhouse gas emissions. The use of non-metallic fiber composite materials as reinforcement can also increase durability by preventing corrosion, thus extending the life of the structures. The aim of this thesis is to demonstrate the ecological potential of non-metallic reinforcement when used in concrete construction. For this purpose, a comparison between steel-reinforced concrete and FRP-reinforced components is carried out. Currently there are no guidelines in the German-speaking countries according to which design can be carried out with these reinforcements. Therefore internationally available guidelines are considered and compared in this thesis.

As design basis for the following parameter study the regulations of ACI 440 2015 were used and a single-span beam with rectangular cross-section was dimensioned. The bending resistance, deflection and global warming potential were investigated as a function of the reinforcement area, the associated effective static height and beam length. Carbon, AR glass, basalt and reinforcing steel were used as reinforcement material. In all calculations, the limitation of deformation turned out to be the decisive proof. The minimum required cross-sectional dimensions increase linearly with the beam length. Carbon has the most favorable mechanical properties, so the necessary cross-sectional dimensions are the smallest. At the same time, it is the reinforcement material with the greatest global warming potential.

In contrast there are the roughly comparable materials AR glass and basalt, which have significantly lower tensile strengths and elasticity modules and are less durable over time. This means that larger quantities of reinforcement and a greater effective static height are required for the designs. The main advantage of these reinforcements is their much smaller global warming potential.

The application potential of all non-metallic reinforcement materials regarding design possibilities is basically given. However, for a clear advantage in terms of design and ecological effect compared to conventional reinforcing steel, optimizations are necessary. These can range from the design specifications, the selection of the static system, the selection of the cross-section, prestressing to the concrete composition.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	8
1 Einleitung	9
1.1 Problemstellung	9
1.2 Aufgabenstellung	10
1.3 Abgrenzung	10
2 Stand der Kenntnisse	11
2.1 Faserverbundkunststoffe	11
2.1.1 Fasern	12
2.1.2 Matrizen	13
2.1.3 Materialkennwerte	13
2.2 Bestehende Regelwerke	14
2.3 Bemessung von Tragwerken	15
2.3.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit	16
2.3.2 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	24
2.3.3 Dauerhaftigkeit	28
2.3.4 Schlussfolgerung	28
3 Regelbemessung	30
3.1 Bemessung des Grenzzustands der Tragfähigkeit	30
3.2 Bemessung des Grenzzustands der Gebrauchstauglichkeit	34
4 Parameterstudie	36
4.1 Randbedingungen	36
4.2 Umwelteinfluss	37
4.3 Berechnung	37
4.3.1 Biege­widerstand	37
4.3.2 Ausgeglicherer Bewehrungsgrad	38
4.3.3 Durchbiegung	39
4.3.4 Treibhauspotenzial	40
4.4 Analyse	41
4.4.1 Carbon FRP	41
4.4.2 AR-Glas FRP	42
4.4.3 Basalt FRP	44
4.4.4 Betonstahl	45
4.4.5 Vergleich der Bewehrungen	48
4.4.6 Interpretation und Optimierungsansätze	51
5 Zusammenfassung	53
A Berechnungen der Parameterstudie mit MATLAB	55

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

AFRP	Aramidfaserverbundkunststoff
BFRP	Basaltfaserverbundkunststoff
CFRP	Carbonfaserverbundkunststoff
E-Modul	Elastizitätsmodul
FRP	Faserverbundkunststoff
GFRP	Glasfaserverbundkunststoff
GWP	Global Warming Potential, Treibhauspotenzial
SLS	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
UHPC	Ultra-high performance concrete
ULS	Grenzzustand der Tragfähigkeit

Lateinische Buchstaben

<i>A</i>	Fläche
<i>E</i>	Elastizitätsmodul
<i>F</i>	Kraft, Einwirkung
<i>I</i>	Flächenträgheitsmoment
<i>M</i>	Biegemoment
<i>N</i>	Normalkraft
<i>V</i>	Querkraft

<i>b</i>	Breite des Querschnitts
<i>d</i>	statische Nutzhöhe
<i>f</i>	Festigkeit
<i>h</i>	Höhe des Querschnitts
<i>x</i>	Höhe der Druckzone

Indizes

<i>c</i>	Bezug auf Beton
<i>f</i>	Bezug auf FRP Bewehrung

Griechische Buchstaben

ϵ	Dehnung
σ	Spannung
ρ	geometrischer Bewehrungsgrad
θ	Winkel

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Problemstellung

Der weltweite Rohstoffverbrauch ist höher, als die Erde langfristig verkraften kann (WWF 2020) und erste Folgen des enormen CO_2 -Ausstoß sind schon heute durch vermehrte Wetterextreme und zerstörerische Waldbrände erkennbar (Mast und Schmitt 2020; BR 2019). Die Bauindustrie und insbesondere der Betonsektor leisten einen großen Beitrag dazu bei, denn die Zementherstellung ist für acht Prozent der weltweiten Emissionen verantwortlich (WWF 12.04.2019). Trotzdem steigt die Verwendung von Beton in neuen Bauwerken (Kromoser et al. 2019). Daher zeigt sich die Notwendigkeit, die Effizienz von Betonbaukonstruktionen zu erhöhen, um dauerhafte Strukturen mit so wenig Material- und Energieverbrauch wie möglich zu erhalten. Eine mögliche Strategie ist, durch die Verwendung von Hochleistungsmaterialien, wie z.B. nichtmetallische Faserverbundkunststoffe (FRP) und Ultrahochleistungsbeton (UHPC), den Anteil an Beton und Bewehrung zu reduzieren (Kromoser et al. 2019). Damit lässt sich auch eine weitere Problematik lösen: Teure Instandhaltungen aufgrund von Korrosionsschäden, die langfristig mit Stahlbewehrung einhergehen, können vermieden werden. Das betrifft insbesondere Infrastrukturbauwerke wie Brücken und Anker- oder Lärmschutzwände. In den letzten Jahren entstanden dadurch neue Forschungsvorhaben, in denen u.a. das Materialverhalten, Versagensmechanismen, Entwurfs- und Bemessungskriterien untersucht (Kueres et al. 2019; Younes et al. 2015; Hofmann et al. 2020), sowie erste Pilotprojekte realisiert wurden:

In Albstadt-Ebingen (Deutschland) z.B. entstand 2015 die weltweit erste Fuß- und Radwegbrücke, die ausschließlich aus carbonfaserbewehrtem, hochfestem Beton besteht. Sie wurde als monolithisches Fertigteil mit einem Trogquerschnitt hergestellt, dessen Gehwegplatte 90 mm stark ist. Ohne weitere Gehbelagenaufbauten und mit einer Spannweite von 15 m sowie einer Breite von 3 m konnte circa die Hälfte des Eigengewichts einer vergleichbaren Stahlbetonbrücke eingespart werden (Helbig et al. 2016). Das Treibhauspotenzial der Brücke ist über den gesamten Lebenszyklus hinweg ca. 30 % geringer als das einer Stahlbetonalternative (Rempel 2020). Mittlerweile wurden auch erste Straßenbrücken aus Carbonbeton in Albstadt errichtet. Sie weisen eine Spannweite von 6,5 bzw. 10,5 m und eine Dicke von 14 cm auf (solidian 2017). Die Bemessung stellt die Ingenieure aber immer wieder vor Herausforderungen.

Derzeit gibt es für den Einsatz von Faserverbundkunststoffen als Bewehrung keine gültigen Richtlinien im deutschsprachigen Raum, sehr wohl aber in anderen Ländern. Das ist nur eines der Gründe dafür, dass sich eine vielfältige Anwendung noch nicht etabliert hat, denn grundsätzlich weist FRP-Bewehrung aktuell deutlich höhere Errichtungskosten als Stahlbewehrung auf (Burgoyne und Balafas 2007). Damit ein erfolgreicher Einsatz gerechtfertigt werden kann, ist einerseits der gesamte Lebenszyklus des Bauwerks zu betrachten, andererseits eine Abgrenzung sinnvoller Einsatzgebiete, die ökologische und ökonomische Faktoren einbezieht, notwendig.

1.2 Aufgabenstellung

Ziel dieser Diplomarbeit ist daher das Einsatzpotenzial nichtmetallischer Bewehrungen im Betonbau herauszuarbeiten. Dieses wird auf Basis von Bemessungsvorschriften und daraus folgenden Bauteilabmessungen bestimmt. Dafür wird zunächst ein Überblick über verschiedene nichtmetallische Faserverbundkunststoffe und Bemessungsvorschriften bestehender Regelwerke zu FRP-Bewehrung hinsichtlich Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS), Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) und Dauerhaftigkeit gegeben sowie eine Gegenüberstellung mit den Vorschriften des Eurocodes 2 für Stahlbeton vollzogen. Daraus folgend wird eine Regelbemessung auf Grundlage eines der Regelwerke an einem Beispiel durchgeführt, um die verschiedenen einfließenden Parameter schließlich in einer Parameterstudie zu untersuchen. Dabei werden sowohl Abmessungen, als auch das Bewehrungsmaterial variiert. Ziel ist es, das Einsatzpotenzial nichtmetallischer Bewehrungen hinsichtlich Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit unter Einbeziehung des Treibhauspotenzials aufzuzeigen.

1.3 Abgrenzung

In dieser Arbeit werden lediglich schlaff bewehrte Einfeldträger betrachtet. Die Betongüte und -zusammensetzung wird nicht variiert, ebenso wie die rechteckige Form und die Breite des Querschnitts. Für die Parameterstudie werden nur der Momentenwiderstand und die Durchbiegung betrachtet, andere bemessungsrelevante Untersuchungen wie Querkraft und Torsion, Rissbildung und die bauliche Durchbildung werden in der Parameterstudie nicht behandelt. Für die ökologische Wirkung wird stellvertretend nur das Treibhauspotenzial (GWP) betrachtet. Andere Indikatoren wie der Gesamtprimärenergiebedarf und die Lebenszykluskosten finden keine Berücksichtigung. Die Bemessung und Sicherheitsbasis erfolgen nach den Vorschriften des ACI 440 2015.

Kapitel 2

Stand der Kenntnisse

2.1 Faserverbundkunststoffe

Bewehrungen aus nichtmetallischen Faserverbundkunststoffen (FRP) bestehen aus kontinuierlichen Verstärkungsfasern, eingebettet in eine Kunststoffmatrix. Einzelne Fasern, sogenannte Filamente, besitzen einen Durchmesser von wenigen Mikrometern. Diese werden unidirektional ausgerichtet und durch die Harzmatrix verklebt (Ehrenstein 2006 zitiert nach Niewels 2008). Die Fasern dienen der Kraftübertragung und die Kunststoffmatrix dem inneren Verbund, sie leitet die Kräfte zu den Fasern, schützt diese vor äußeren Einflüssen (Nanni et al. 2014) und sichert die Formstabilität (Niewels 2008). Der Faser- und Volumenanteil beeinflusst die Festigkeit und Steifigkeit der FRP, während die Matrix den Versagensmechanismus und die Bruchzähigkeit beeinflusst (Nanni et al. 2014).

Die Bewehrungen sind in Form von Bewehrungsstäben und -lamellen, Spanngliedern und als flächige Textilbewehrungen vorhanden (Schlaich et al. 2012; Stark und Hegger 2013; Younes et al. 2015). Die Fasern bestehen vorrangig aus Glas und Carbon, aber auch aus Aramid oder Basalt. Sie weisen ein anisotropes Materialverhalten auf (Nanni et al. 2014), welches zu einer optimalen Abtragung von Zugkräften in Längsrichtung geeignet, jedoch in Querrichtung empfindlich ist (Knab et al. 2015; Schlaich et al. 2012). Alle Fasern vereint der große Vorteil, dass sie gegenüber dem herkömmlichen Betonstahl beständiger gegen Korrosion sind (Schlaich et al. 2012). Sie besitzen hohe Zugfestigkeiten, eine geringere Dichte als Stahl (Nanni et al. 2014) und ein linear-elastisches Materialverhalten bis zum Bruch, wodurch ein sprödes Versagen zutage tritt (Schlaich et al. 2012; Knab et al. 2015; Hofmann et al. 2020; Niewels 2008). Die sich verändernden Lastumlagerungsmöglichkeiten in bewehrten Bauteilen sind bei der Bemessung statisch unbestimmter Systeme zu beachten (Knab et al. 2015).

Die Herstellung von FRP-Bewehrungsstäben erfolgt üblicherweise durch das Strangzieh-Verfahren (Pultrusion). Die Faserbündel werden in Harz getränkt und anschließend in ihre endgültige Form gebracht. Sie härten unter Wärme aus. Die Staboberfläche wird herstellungs- und verfahrensbedingt vor dem Erhärten des Harzes besandet oder mit weiteren Fasern umflochten, um eine Profilierung zu erzeugen. Auch das Flechten der Faserbündel vor dem Erhärten, das Einfräsen einer Profilierung und Aufrauen der Staboberfläche sind Möglichkeiten, um eine gute Verbundoberfläche herzustellen (Niewels 2008). Der ausgeprägte mechanische Verbund der FRP-Stäbe ist neben dem Erscheinungsbild und einem anderen Herstellungsverfahren der wesentliche Unterschied zu getränkter, flächenhafter, maschenartiger Textilbewehrung, die hauptsächlich Haft- und Reibverbund aufweist (Kulas 2013).

Textile Bewehrungen sind zwei- oder dreidimensionale Gitter aus gebündelten, ungedrehten Fasern, Rovings genannt, die mit Textilherstellungsverfahren produziert werden. Die gebräuchlichste Produktionstechnologie ist die Kettenwirkerei. Um die Festigkeit, Steifigkeit und das Verbundverhalten zu verbessern, werden die Textilstrukturen meistens imprägniert. Dadurch wird auch die Formstabilität der Bewehrung verbessert. Durch Imprägnierung auch eine dreidi-

mensional vorgeformte Textilstruktur beibehalten werden. Die gebräuchlichsten Imprägnierungen sind Styrol-Butadien, Vinylesterharz und Epoxidharze (Kulas 2013).

Neben dem Einsatz als Bewehrung können die Kunststofffasern auch in Form von Kurzfasern verwendet werden. Diese werden direkt beim Mischvorgang willkürlich in die Betonmatrix hinzugefügt. Da sie nicht richtungsorientiert sind, können sie je nach Fasergehalt zwar die Erstrisslast steigern und das Nachbruchverhalten verbessern, insgesamt aber nur Gebrauchseigenschaften beeinflussen (Kulas 2013).

2.1.1 Fasern

Carbonfasern

Die Carbonfaser bzw. Kohlenstofffaser muss zu mind. 90 Prozent aus Kohlenstoff bestehen. Diese wird in der Regel mittels mehrstufigen thermischen Prozessen bevorzugt aus Polyacrylnitril (PAN) hergestellt (Kirsten et al. 2015). Sie besitzt einen vergleichsweise hohen Elastizitätsmodul (E-Modul; siehe dazu Tab. 2.1). Die Bruchdehnung ist im Vergleich zu Stahl und den anderen Faserverbundkunststoffen deutlich kleiner (Schlaich et al. 2012). Die Dauerfestigkeit von Carbonfasern beträgt ca. 80 Prozent der Anfangsfestigkeit (Schlaich et al. 2012). Sie besitzen eine hohe Ermüdungsfestigkeit (höher als Stahl; Schlaich et al. 2012), eine hohe Beständigkeit gegen Alkali- oder Säureangriff, sowie einen niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten (Nanni et al. 2014; Schlaich et al. 2012). Die Benetzung von Harzen ist nicht leicht, daher ist ein Leimen der Fasern vor der Einbettung in das Harz erforderlich (Nanni et al. 2014).

Carbonfasern sind aufgrund ihrer hohen Steifigkeit und Festigkeit auch für die Anwendung in tragenden Bauteilen geeignet. Eine Herausforderung bei der Anwendung von Carbonfasern als Vorspannelement ist die Verankerung. Traditionelle Keilverankerungen sind hier nicht geeignet, da sie eine Spannungskonzentration erzeugen und die Fasern schädigen, die empfindlich in Querrichtung sind, was zum Versagen führen kann (Schlaich et al. 2012). Carbonfasern sind bereits erfolgreich im Einsatz für die Verstärkung bestehender Konstruktionen in statisch sensiblen Bereichen mittels aufgeklebten Carbonlamellen oder dünnen Aufbetonschichten mit hochfesten carbonbasierten Bewehrungsstrukturen (Kirsten et al. 2015).

Glasfasern

Glasfasern bestehen hauptsächlich aus Silikastaub (Nanni et al. 2014). Unbehandeltes Glas besitzt eine vergleichsweise schlechte Dauerhaftigkeit im alkalischen Milieu. Erst durch die Zugabe von Zirkonium (ZrO_2) entsteht das alkaliresistente Glas (AR-Glas; Niewels 2008), welches widerstandsfähig gegen die meisten Chemikalien und ausreichend widerstandsfähig gegen Alkalien im Beton ist. Es ist praktisch nicht leitfähig, unmagnetisch und besitzt eine geringe Wärmeleitfähigkeit. Über ihre Lebensdauer hinweg zeigen Glasfasern einen langsamen Festigkeitsabfall (Knab et al. 2015). Der Elastizitätsmodul (E-Modul) der Glasfaserbewehrung liegt bei etwa 60.000 MPa gegenüber etwa 200.000 MPa bei Betonstahl, was einen großen Einfluss auf die Biegesteifigkeit der Bauteile im gerissenen Zustand ausübt (Knab et al. 2015).

Glasfasern besitzen eine höhere Verfügbarkeit und einen günstigeren Preis als Carbonfasern. Allerdings sind sie laut Kirsten et al. 2015 aufgrund ihres geringen E-Moduls nur für mittlere Belastungen und nicht tragende Bauteile einsetzbar. Sind hohe Steifigkeiten gefordert, sei kein Einsatz herkömmlicher Glasfasern möglich. Dem entgegen stehen die Inhalte des Regelwerks AASHTO 2018, wo es ausschließlich um die Bewehrung mit Glasfasern für tragende Bauteile geht. Es stellt sich jedoch die Frage, wie wirtschaftlich die Auslegung erfolgen kann, wenn die Steifigkeit und die weniger gute Dauerhaftigkeit berücksichtigt werden.

Basaltfasern

Basaltfasern werden aus der gleichnamigen Gesteinsart Basalt hergestellt, ein basisches Vulkan-
gestein, das weltweit verfügbar ist (Nanni et al. 2014). Die physikalischen Eigenschaften der
Basaltfaser ähneln der Glasfaser. Basaltfasern besitzen gegenüber konventioneller Betonstahlbe-
wehrung eine höhere Zugfestigkeit und elektromagnetische Neutralität (Hofmann et al. 2020).
Sie sind umweltverträglich, ungiftig, nicht magnetisch und besitzen eine hohe Wärmestabilität
sowie isolierende Eigenschaften (Nanni et al. 2014). Basaltfasern weisen eine geringere Dichte
als Stahl auf, wodurch eine leichtere Verarbeitung und Handhabung beim Einbau möglich ist.
Allerdings besitzen sie einen deutlich geringeren Elastizitätsmodul, wodurch es zu größeren
Biegeverformungen bei gleichem geometrischen Bewehrungsgrad kommt. (Hofmann et al. 2020).
Die Dauerhaftigkeit gegenüber Alkalien ist eingeschränkt gegeben, für die Stäbe von solidian
(solidian 2020) bis zur Bruchspannung.

Aramidfasern

Die Aramidfaser ist eine organische Polyamidfaser mit guten mechanischen Eigenschaften bei
geringer Dichte, einer hohen Zähigkeit und hoher Schlagfestigkeit. Sie ist ein Isolator für Elektri-
zität und Wärme und beständig gegen organische Lösungsmittel, Kraftstoffe sowie Schmiermittel.
Allerdings ist sie empfindlich gegen UV-Licht, hohen Temperaturen und hoher Feuchtigkeit.
Ihre Zugfestigkeit und der E-Modul sind höher als der von Glas. Aufgrund der hohen Kosten ist
die Verwendung jedoch eingeschränkt (Nanni et al. 2014).

2.1.2 Matrizen

Die Matrix, die die Faserstränge umhüllt, besteht meistens aus duroplastischem Polymerharz.
Sie ist ursprünglich flüssig oder ein Feststoff mit geringer Schmelztemperatur und wird mit
einem Katalysator oder Wärme gehärtet. Im Gegensatz zu thermoplastischen Harzen können
duroplastische Harze nach dem Aushärten nicht wieder in ihre ursprüngliche flüssige Form
gebracht oder umgeformt werden. Die am häufigsten verwendeten duroplastischen Harze sind
Epoxidharz, Polyester und Vinylester. In Verbindung mit Zusatzstoffen sowie Füllstoffen kann
ihre Leistung angepasst und verbessert werden (Nanni et al. 2014). Sie zeichnen sich durch
eine geringe Kriechneigung und Relaxation, einen guten Widerstand gegen chemische Angriffe,
Temperaturbeständigkeit und eine sehr niedrige Viskosität aus, wodurch eine gute Penetration
der Faserbündel im Herstellungsprozess erfolgen kann. Damit die hohe Zugfestigkeit der Verstär-
kungsfasern ausgenutzt werden kann, müssen die Harze eine höhere Bruchdehnung aufweisen als
die Fasern (Niewels 2008).

2.1.3 Materialkennwerte

Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über die Materialkennwerte der verschiedenen Fasern aus der
Literatur, umgeben von einer Matrix, als Verbundwerkstoff. Da diese zum Teil stark schwanken
und veraltet sind, werden in Tabelle 2.2 auf dem Markt aktuell verfügbare Kennwerte des
Herstellers solidian angegeben, die in den nächsten Kapiteln für die Berechnungen Verwendung
finden. Im Vergleich zu Baustahl B550 mit 0,5 GPa weisen diese doppelt bzw. vierfach (Carbon)
größere Zugfestigkeiten auf. Die Elastizitätsmodule sind im Vergleich zu Baustahl mit 200 GPa
vor allem bei GFRP und BFRP deutlich geringer.

²aus dem Datenblatt für einen Stab mit Durchmesser 6mm. Laut Angaben von solidian auch für 10mm verwendbar

²um 10% abgeminderte Werte der Mattenbewehrung mit 4,62 mm², da der Durchmesser mit 2,4 mm deutlich
kleiner ist

Tab. 2.1: Eigenschaften von Stäben Faserverbundkunststoffen aus der Literatur

FRP	E-Modul (GPa)	Zugfestigkeit (GPa)	Bruchdehnung (‰)
CFRP (Niewels 2008)	120-580	0,6-3,5	5-17
GFRP (Niewels 2008)	35-60	0,5-1,6	12-31
AFRP (Niewels 2008)	41-125	1,0-2,5	19-44
BFRP (Hofmann et al. 2020)	50-60	bis 1,2	20-25

Tab. 2.2: Eigenschaften von Stäben aus Faserverbundkunststoffen; aktuelle Werte (solidian 2020)

FRP	E-Modul (GPa)	Zugfestigkeit (GPa)	Bruchdehnung (‰)
CFRP ¹	162	2,1	18
GFRP ²	66	0,9	41
BFRP	55	1,1	24

2.2 Bestehende Regelwerke

Derzeit existieren in Österreich und im Eurocode keine Vorschriften zur Bemessung von Betontragwerken mit nichtmetallischer Bewehrung. International liegen jedoch verschiedene Regelwerke vor, unter anderem aus den USA, Kanada, Japan und Italien (Tab. 2.3). In den folgenden Kapiteln werden die Inhalte und Bemessungsvorschriften dieser Regelwerke für Bewehrungsstäbe vorgestellt und verglichen.

Tab. 2.3: Übersicht der Regelwerke

Code	Land	Erscheinungsjahr
JSCE 1997	Japan	1997
ACI 440 2015	USA	2015
AASHTO 2018	USA	2018
CSA 2012	Kanada	2017
CSA 2019	Kanada	2019
CNR 2007	Italien	2007

Die japanischen Richtlinien „Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures using continuous fiber reinforcing materials (Design)“ des Betonkomitees der Japanischen Gesellschaft der Bauingenieure (JSCE) wurden 1997 in englischer Sprache veröffentlicht. Sie sind das Ergebnis vieler Forschungsarbeiten zweier Forschungsausschüsse, die sich jahrelang mit FRP-Bewehrung im Beton beschäftigten. Der erste Forschungsausschuss „Forschungsausschuss für Endlosfaser-Bewehrungsmaterialien (CFRM)“ wurde 1989 eingerichtet und arbeitete unter anderem an Testmethoden, Auslegung von Strukturen und Dauerhaftigkeitsproblemen. Die Ergebnisse wurden 1992 veröffentlicht. Der zweite Forschungsausschuss arbeitete 1993-1995 Empfehlungen zu Entwurf und Konstruktion, Spezifikationen, Standard-Testmethoden und Daten für den Einsatz von FRP-Bewehrungen aus, die 1996 auf Japanisch und 1997 schließlich in englischer Sprache erschienen. Die Designprinzipien sind analog zu denen für Stahlbetonbau und im vorliegenden Dokument nicht weiter ausgeführt (JSCE 1997).

Die Richtlinien der USA „Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars“ des Amerikanischen Betoninstituts ACI Committee 440 sind aus dem Jahr 2015. Die Grundlage dieses Leitfadens bilden internationale Erkenntnisse aus experimenteller und analytischer Forschung sowie Praxisanwendungen von FRP-Bewehrung. Erstmals wurde der Leitfaden 2001 erstellt. Die Bemessungsphilosophie beruht auf dem Ansatz der Festigkeitsbemessung (design for strength) und Prinzipien der Grenzzustandsbetrachtungen, wobei Gebrauchskriterien oft maßgebend sein können (ACI 440 2015).

Das AASHTO Committee on Bridges and Structures der American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) veröffentlichte 2018 die zweite Auflage einer Richtlinie für den Entwurf von Brücken mit der Verwendung von GFRP-Bewehrungen, genannt „AASHTO LRFD Bridge Design Guide Specifications for GFRP-Reinforced Concrete“. Die Bemessungsphilosophie ist auch hier ein Entwurf auf Basis von Grenzzustandsbetrachtungen, die Anforderungen bezüglich des Gebrauchs, der Ermüdung, Kriechbruch, Festigkeit und Extremsituationen mit einbezieht (AASHTO 2018). Wie in Kapitel 2.1 bereits beschrieben, weisen Glasfasern einen vergleichsweise geringen Elastizitätsmodul sowie Schwächen bei der Dauerhaftigkeit auf. Die Bemessung mit anderen Fasern sollte demzufolge zu konservativen Lösungen führen.

Die kanadische Norm „Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers“ ist die zweite Ausgabe für den Entwurf und die Konstruktion zu faserverstärkten Bauteilen; sie erschien 2012 und wurde 2017 erneut bestätigt. Die Norm ersetzt die erste Ausgabe, die 2002 veröffentlicht wurde. Sie wurde von dem entsprechenden Technischen Ausschuss „Technical Committee on Design and Construction of Building Structures with Fibre-Reinforced Polymers“ erarbeitet. Die Bemessungsphilosophie ist ein Entwurf auf Basis von Grenzzustandsbetrachtungen (CSA 2012).

Weiterhin gibt der „Canadian Highway Bridge Design Code“ Bemessungsregeln für Autobahnbrücken vor, die unter anderem FRP-bewehrte Brücken enthalten. Die neueste Ausgabe ist von 2019. Die Bemessungsphilosophie ist auch hier ein Entwurf auf Basis von Grenzzustandsbetrachtungen, was den ULS, SLS sowie den Ermüdungsgrenzzustand beinhaltet (CSA 2019). Im Zuge der nachfolgenden Kapitel wird vor allem dann auf letzteren Bemessungscode eingegangen, wenn er sich von den Vorschriften des CSA 2012 unterscheidet. Ebenso vorgegangen wird bei den Brückenrichtlinien für GFRP aus den USA (AASHTO 2018) im Vergleich zum ACI 440 2015.

Die italienische Richtlinie „Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars“ ist im Zuge einer Serie von Dokumenten über FRP-Verstärkungen entstanden und wurde von einer Task-Gruppe erstellt, hauptsächlich bestehend aus ProfessorInnen und DoktorInnen italienischer Universitäten. Dabei wurden das Format und die Prinzipien des Eurocodes übernommen. Die Veröffentlichung erfolgte 2007. Der Entwurf von FRP-verstärkten Betonelementen soll Festigkeits- und Gebrauchsansprüchen genügen (CNR 2007).

Neben diesen national entstandenen Richtlinien gibt es weitere Empfehlungsdokumente wie zum Beispiel fib bulletin 40, die sich in Task Group 9.3 mit FRP Bewehrungen auseinandersetzen. Dabei untersuchten sie bestehende Regelwerke wie die hier aufgeführten (die in der Ausgabe von 2007 zum Teil veraltet sind) und setzten sich mit den Bemessungsphilosophien auseinander (FIB Task Group 9.3 2007).

2.3 Bemessung von Tragwerken

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Inhalte der in Kap. 2.2 aufgeführten Regelwerke zur Bemessung von Tragwerken mit Bewehrungen aus Faserverbundkunststoffen wiedergegeben und gegenübergestellt. Im Zuge dessen wird der Fokus für den Grenzzustand der Tragfähigkeit auf

ein Versagen infolge Biegung und Querkraft, für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit auf die Spannungsbegrenzung, Rissbildung und Durchbiegung sowie auf die Dauerhaftigkeit im Allgemeinen gelegt. Die angeführten Regelwerke (s. Kap. 2.2) basieren auf dem semiprobabilistischen Teilsicherheitskonzept, welches sowohl die Einwirkungen, als auch die Widerstände faktorisiert. Die Basis für den Entwurf bilden Grenzzustandsbetrachtungen.

Hinweise zu Formelzeichen

Die Formelzeichen der Regelwerke werden unverändert angegeben, um die Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten. Für grundlegende Arten der Einwirkung und Materialeigenschaften verwenden die Regelwerke die gleichen Symbole. In ihren Indizes bestehen teilweise Unterschiede. Im Abkürzungsverzeichnis werden die grundlegenden Formelzeichen aller Regelwerke erläutert. Etwaige Abweichungen davon werden bei Angabe der Formelzeichen im Verlaufe des Dokuments gekennzeichnet.

2.3.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit

In den bestehenden Regelwerken werden die faserverstärkten Betonbauteile vorwiegend als Biegeträger bemessen, manche gehen zusätzlich auf axiale Belastungen oder die Kombination von Biege- und axialer Belastung ein. Weitere Regelungen für Platten werden je nach Regelwerk ergänzend vorgeschlagen. Dieses Kapitel beschränkt sich auf die Hauptanwendung als Biegeträger und betrachtet für den Grenzzustand der Tragfähigkeit die Biegetragfähigkeit sowie die Schubtragfähigkeit.

2.3.1.1 Biegetragfähigkeit

Das Verhalten eines Trägers mit FRP-Bewehrung unter Biegebeanspruchung ist grundsätzlich ähnlich zu dem eines Stahlbetonbalkens. Im Vergleich zu Stahlbewehrung besitzt FRP-Bewehrung in der Regel eine höhere Zugfestigkeit und einen geringeren Elastizitätsmodul. Aufgrund dessen ist das Verhältnis von Festigkeit zu Steifigkeit eine Größenordnung größer als bei Stahlbewehrung und Normalbeton. Durch die gleichen Verhältnisse bei Stahlbeton ergibt sich, dass die Tiefe der neutralen Achse in einem rechteckigen Querschnitt ungefähr in der Mitte liegt. Das erhöhte Verhältnis bei FRP bewirkt nun, dass die Tiefe der neutralen Achse weiter oben am druckbeanspruchten Ende des Querschnitts liegt, wenn die Festigkeit von FRP ausgenutzt wird. Damit ist ein größerer Anteil des Querschnitts unter Zug und die Druckzone dementsprechend geringer, wodurch sich größere Dehnungsgradienten sowie Biegeverformungen ergeben (FIB Task Group 9.3 2007). Mit dem Aufbringen einer Vorspannung, einer hohen Betondruckfestigkeit oder einem profiliertem Querschnitt mit einer größeren Druckzonbreite kann einem frühzeitigem Betonversagen entgegengewirkt werden (Niewels 2008).

Die Biegebemessung beruht in allen Regelwerken auf folgenden Annahmen:

- Ebenbleiben der Querschnitte
- Vernachlässigung der Druckfestigkeit von FRP
- Vernachlässigung der Zugfestigkeit im Beton
- Für den Verlauf der Druckspannungen über den Querschnitt kann der rechteckige, äquivalente Spannungsblock angewendet werden
- Die Spannungs- Dehnungs- Beziehung in der FRP-Bewehrung ist linear elastisch bis zum Bruch

Die Annahme des perfekten Verbundes wird explizit in ACI 440 2015; CSA 2012; CNR 2007 genannt. Die maximale Stauchung des Betons liegt je nach Regelwerk bei 0,003 (ACI 440 2015; AASHTO 2018) bzw. bei 0,0035 (CSA 2012; CSA 2019; JSCE 1997; CNR 2007).

Grundsätzlich wird zwischen druck- und zugkontrolliertem Versagen unterschieden, wobei beide Versagensarten akzeptabel sind; druckkontrolliertes Versagen wird jedoch nach ACI 440 2015 und CSA 2012 bevorzugt. Der Querschnitt versagt auf Biegung, wenn die maximale Dehnung im Beton (Druck) oder in der FRP-Bewehrung (Zug) in der äußersten Faser erreicht ist. Im Vergleich zu Stahlbeton ist zu beachten, dass eine einaxiale Spannungs-Dehnungsbeziehung der FRP-Bewehrung vorherrscht, da diese nicht fließt. Daher weist der Querschnitt weniger Duktilität auf. Das Sicherheitsniveau wird im ACI 440 2015 gegenüber Stahlbetonbemessungen erhöht, um die mangelnde Duktilität auszugleichen. Weiterhin kann durch das rein linear elastische Verhalten keine Umlagerung stattfinden, was explizit in ACI 440 2015; CSA 2012; JSCE 1997 genannt wird. In Abbildung 2.1 ist das Prinzip des Kräftegleichgewichts mit einem äquivalenten Spannungsblock an einem rechteckigen Querschnitt dargestellt. Während CNR 2007 den Hinweis gibt, dass bei mehrlagiger Bewehrungsanordnung der Schwerpunkt der äußeren Lage maßgebend für die Bemessung ist, beziehen sich die Regelungen des ACI 440 2015 auf rechteckige Querschnitte mit nur einer Lage FRP-Bewehrung. Die Konzepte seien grundsätzlich auf andere Querschnittsformen oder mehrere Lagen übertragbar, jedoch muss das Verhalten anderer Querschnittsformen durch Experimente bestätigt werden. Die Biegekapazität ist abhängig von der Versagensart, welche im ACI 440 2015 durch den Vergleich des vorhandenen Bewehrungsgrads ρ_f zu dem ausgeglichenen Bewehrungsgrad ρ_{fb} bestimmt wird. Ein ausgeglichener Bewehrungsgrad besteht, wenn Betonversagen und FRP-Bruch gleichzeitig auftreten.

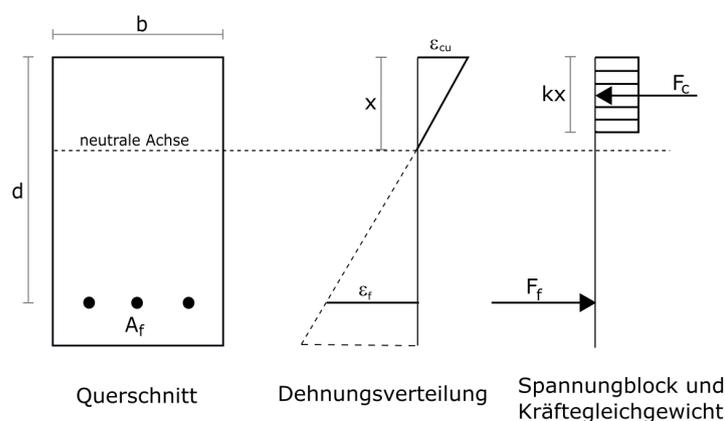


Abb. 2.1: Querschnitt mit Dehnungsverteilung und Kräftegleichgewicht für die Biegebemessung, analog zu Fig. 4-4 FIB Task Group 9.3 2007

Ist $\rho_f > \rho_{fb}$, ist mit einem Betonversagen zu rechnen. Die Spannungsverteilung im Beton kann mit dem rechteckigen Spannungsblock angenähert werden. Aus dem Kräftegleichgewicht und der Dehnungsverträglichkeit kann in weiterer Folge das Widerstandsmoment berechnet werden (Formel 2.1). Dabei wird im Unterschied zur Berechnung mit FRP-Versagen nicht die maximale Spannung (Zugfestigkeit f_{fu}) herangezogen, sondern die aufgrund der vorhandenen Dehnung in der Bewehrungsebene sich ergebende Spannung (f_f). Ist $\rho_f < \rho_{fb}$, versagt der Querschnitt aufgrund FRP-Bruch. ACI 440 2015 schlägt in diesem Fall entweder eine iterative Berechnung oder eine vereinfachte, konservative Berechnung des Widerstandsmoments vor, die auch in AASHTO 2018 vorgeschlagen wird (Formel 2.2). Dabei wird die eigentlich unbekannte Betonstauchung dem maximalen Wert von 0,003 gleichgesetzt.

$$M_n = A_f f_f \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad a = \frac{A_f f_f}{0,85 f'_c b} \quad (2.1)$$

$$M_n = A_f f_{fu} \left(d - \frac{\beta_l c_b}{2} \right) \quad c_b = \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{fu}} \right) d \quad (2.2)$$

M_n	nominaler Momentenwiderstand
a	Tiefe des rechteckigen Spannungsblocks
c_b	Höhe der Druckzone bei ausgeglichenem Dehnungsverhältnis
β_l	Abminderungsfaktor abhängig von Betonfestigkeit zw. 0,65 und 0,85
Index u	ultimate - maximale Festigkeit bzw. Dehnung

Die Vorschriften von CNR 2007 zur Biegebemessung basieren ebenfalls auf den zwei genannten Versagensarten. Zur Berechnung wird entsprechend der Versagensart entweder die maximale Betonstauchung oder die maximale Dehnung von FRP angesetzt und auf Basis dessen der Widerstand durch ein Kräftegleichgewicht bestimmt. Abweichend dazu schreibt CSA 2012 vor, dass der Querschnitt so bemessen werden muss, dass Versagen durch die Stauchung des Betons zustande kommt. Alternativ muss der Designwiderstand mindestens den 1,6-fachen Designlasten entsprechen. Ist die Dehnung von FRP unter vollen Nutzlasten größer als 0,0015, ist eine zusätzliche Spannungsbegrenzung notwendig. CSA 2019 schreibt vor, dass der Biegewiderstand M_r mindestens 50% größer als das Rissmoment sein soll und wenn der Tragentwurf auf Versagen der FRP-Bewehrung ausgelegt ist, muss der Biegewiderstand größer sein als $1,5M_f$ (einwirkendes Designmoment). JSCE 1997 benennt ebenfalls die zwei Versagensarten. Für FRP-Bruch ist dabei die maximale FRP-Dehnung anzusetzen, für Betonversagen die Druckspannung im Beton mit dem rechteckigen Spannungsblock.

Sicherheitsfaktoren

Die Sicherheitsfaktoren der Regelwerke sind für die Biegebemessung in Tabelle 2.4 gegeben. Im Vergleich mindert der ACI 440 2015 die Tragfähigkeit am meisten und JSCE 1997 am wenigsten ab. Grundsätzlich unterscheiden der ACI 440 2015 und AASHTO 2018 die Art des Versagens für den festigkeitsreduzierenden Widerstandsfaktor (strength-reduction factor). Dieser ist abhängig von der Versagensart, weil der Zuverlässigkeitsindex aus der Stahlbetonnorm (ACI 318) beibehalten werden soll. Da mit FRP-Bewehrung kein duktiler Verhalten gegeben ist, soll ein konservativerer Reduktionsfaktor höhere Festigkeitsreserven liefern. Druck-kontrollierte Querschnitte sind definiert mit $\rho_f \geq 1,4\rho_{fb}$, dann ist der Abminderungsfaktor $\phi = 0,65$. Zug-kontrollierte Querschnitte sind definiert mit $\rho_f \leq \rho_{fb}$, der Abminderungsfaktor beträgt dann $\phi = 0,55$. Es besteht damit ein Übergangsbereich, indem theoretisch ein druckkontrollierter Querschnitt mit Versagen durch Betonbruch entsteht, trotzdem wird hier der Sicherheitsbeiwert im Vergleich zu dem definierten druckkontrollierten Bereich reduziert (Abbildung 2.2). AASHTO 2018 erhöht den Widerstandsfaktor auf bis zu 0,75, wenn die Zugdehnung in der extremen GFRP Faser unter einem Wert der 0,8-fachen Designzugdehnung bei Faserbruch bleibt. CSA 2012 gibt keine Details zur Entstehung der Sicherheitsfaktoren an, lediglich die Werte der Widerstandsfaktoren für die Bemessung. Im Vergleich zum CSA 2012 differenziert der CSA 2019 die Sicherheitsfaktoren abhängig von Herstellungsprozess der FRP-Bewehrung und dem verwendeten Material. Während Carbonfasern mit 0,80 abgemindert werden, beträgt der Widerstandsfaktor für Aramid- und Glasfasern 0,65. Erfolgt der Herstellungsprozess nicht durch Pultrusion, wird die Abminderung zusätzlich vergrößert.

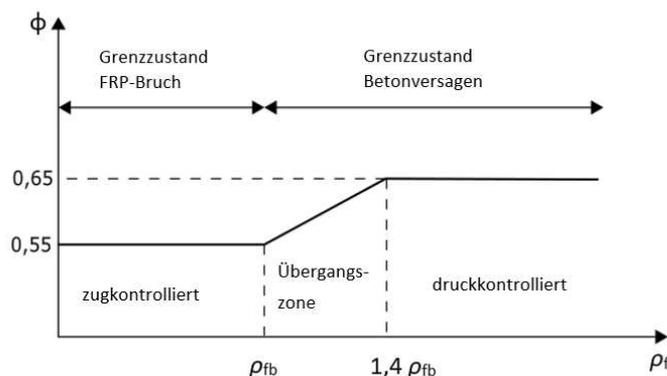


Abb. 2.2: Festigkeitsreduktionsfaktor als Funktion des Bewehrungsgrades nach Fig. 7.2.3 ACI 440 2015

Tab. 2.4: Sicherheitsfaktoren für die Biegebemessung

Regelwerk	Sicherheitsfaktor für FRP	Sicherheitsfaktor für Beton
Italien (CNR 2007)	0,67 = 1/1,5	0,67 = 1/1,5
Kanada (CSA 2012)	0,75 = 1/1,33	0,65 = 1/1,54
Kanada (CSA 2019)	0,65 – 0,80 = 1/1,54 – 1/1,25	0,75 = 1/1,33
USA (ACI 440 2015)	0,55 = 1/1,82	0,65 = 1/1,54
Japan (JSCE 1997)	0,77 – 0,87 = 1/1,3 (GFRP) – 1/1,15	0,77 = 1/1,3

Mindestbewehrung

Der ACI 440 2015 empfiehlt eine Mindestbewehrung für zugkontrollierte Querschnitte, um Versagen durch Risse im Beton zu vermeiden. CSA 2012 verlangt hingegen in jedem Biegeträger eine Mindestbewehrung, es sei denn, dass Rissmoment ist größer als die 1,5-fache faktorisierte Momenteneinwirkung $M_{cr} \geq 1,5M_f$. JSCE 1997 und CNR 2007 schreiben in jedem Fall eine Mindestbewehrung vor. Die Mindestbewehrung liegt je nach Regelwerk bei dem 1,5- bzw. 1,8-fachen Rissmoment (siehe Tab. 2.5). JSCE 1997 dagegen schreibt einen Mindestbewehrungsgrad vor, der 0,2% beträgt oder sich aus dem 35-fachen Verhältnis der charakteristischen Zugfestigkeiten des Betons zur Bewehrung ergibt. Damit werden hier im Vergleich zu den anderen Regelwerken die Bauteilabmessungen außer Acht gelassen.

Tab. 2.5: Mindestbewehrung

Regelwerk	Mindestbewehrung	Anmerkung
Japan (JSCE 1997)	$(35 \frac{f_{tk}}{f_{tuk}})\% \geq 0,2\%$	T-Querschnitt 1,5-facher Bewehrungsgrad
USA (ACI 440 2015)	$0,55M_n \geq M_{cr}$	entspricht $M_n \geq 1,8M_{cr}$
Kanada (CSA 2012)	$M_r > 1,5M_{cr}$	
Italien (CNR 2007)	$M_{Rd} \geq 1,5M_{cr}$	

2.3.1.2 Schub

Das Schubtragverhalten bewehrter Betonelemente ist von internen Tragmechanismen abhängig, deren Ausmaße und Kombination noch zur Diskussion stehen. Der Schubwiderstand entsteht hauptsächlich durch die ungerissene Druckzone, Rissprogresszone, Rissverzahnung, Dübelwirkung und wenn vorhanden durch Schubbewehrung. Dabei spielen die Materialeigenschaften des Betons und der Bewehrung, sowie ihre Wechselwirkung für die innere Mechanik eine große Rolle. Abweichend zu Betonstahl ist bei FRP-Bewehrung eine größere Dehnung und damit einhergehend größere Durchbiegungen und Risse einzubeziehen, ebenso fehlendes plastisches Verhalten und sprödes Versagen, was die Umverteilung von Spannungen problematisch macht, sowie die anisotrope Natur unter kombinierten Axial- und Querkräften, die zu berücksichtigen ist.

Die Schubtragfähigkeit der Druckzone ist in bewehrten Elementen abhängig von ihrer Tiefe, die wiederum von den Eigenschaften der Längsbewehrung abhängt. Daher kann davon ausgegangen werden, dass dieser Traganteil bei FRP-Elementen etwas anders ist als bei Stahlbeton. In der Regel ist die Betondruckzone nach der Rissbildung kleiner als bei Stahlbeton, allerdings nimmt diese mit zunehmender Dehnung der Bewehrung im Vergleich zu Stahl nicht weiter ab. Vielmehr führt die Nichtlinearität des Betons unter Druck zu einer leichten Vergrößerung der Druckzonenhöhe. Da breitere Risse in FRP-Elementen zu erwarten sind, ist der Beitrag der Rissverzahnung geringer als bei Stahlbeton. Die Dübelwirkung ist ebenso vernachlässigbar, da FRP-Bewehrung typischerweise eine geringe Quersteifigkeit aufweist. Schubbewehrung wird vorgesehen, wenn die Schubbeanspruchung die Schubkapazität des Betons übersteigt. Die meist vertikalen Glieder übernehmen die auftretenden Zugkräfte im Schubriss. Der Beitrag der Schubbewehrung zum Schubwiderstand ist bei Stahlbeton von der Fließspannung abhängig. Aufgrund des linear-elastischen Verhaltens von FRP werden andere Phänomene wie Schlupf und Dehnung relevanter. Außerdem nimmt die Zugfestigkeit von FRP unter der kombinierten Einwirkung von Zug und Schub erheblich ab, wodurch bei hohen Spannungen ein Versagen in der Eckverankerung zu erwarten ist. Es wird hier daher eine maximale Festigkeit von 40-50% der einaxialen Festigkeit empfohlen und in JSCE 1997 sowie ACI 440 2015 berücksichtigt.

Schubversagen ist durch die Bildung vorheriger Risse gekennzeichnet, die zur Hauptachse des Elements geneigt sind. Es kann gleichzeitig mit der Bildung neuer Risse oder nach einer Lasterhöhung auftreten. Im Wesentlichen können dieselben Versagensmechanismen wie im Stahlbetonbau auftreten, wobei bedingt durch das linear elastische Materialverhalten der FRP-Bewehrung ein Bruch der Schubbewehrung auftritt. Grundsätzlich ist es schwierig, die komplexen Vorhersagemodelle in Bemessungsgleichungen einzubeziehen, weshalb die meisten Modelle auf semi-empirischen Ansätzen beruhen. Das Grundprinzip der Empfehlungen für FRP-Bewehrungen lautet, dass unter der Voraussetzung eines guten Verbundes, das selbe Sicherheitsniveau unabhängig von der Bewehrung erreicht wird, wenn die FRP-Bewehrungen dieselbe Dehnung und Kraft wie bei einer Bemessung mit Stahlbewehrung aufweist (Abbildung 2.3). Die Dehnungsgrenzwerte für die Schubbewehrung basieren deshalb ursprünglich auf der Fließdehnung und dienen der Integrität des Querschnitts sowie der Additivität der Widerstandsmechanismen, die für Stahlbeton nachgewiesen werden. Weitere Experimente haben aber gezeigt, dass FRP-Bewehrungen höhere Dehnungen zulassen, die zum Teil Einzug in die Normen gefunden haben. Aus den genannten Gründen und um die Akzeptanz von FRP-Bewehrungen in der Baubranche zu erhöhen, wurden schließlich die bestehenden Bemessungsgrundlagen modifiziert und die reduzierte Steifigkeit sowie die Bewehrungsart berücksichtigt (FIB Task Group 9.3 2007).

Die rechnerische Querkrafttragfähigkeit setzt sich demnach aus zwei Anteilen zusammen; der Tragfähigkeit des Betons und der der FRP-Bewehrung, wenn man davon ausgeht, eine Schubbewehrung zu benötigen.

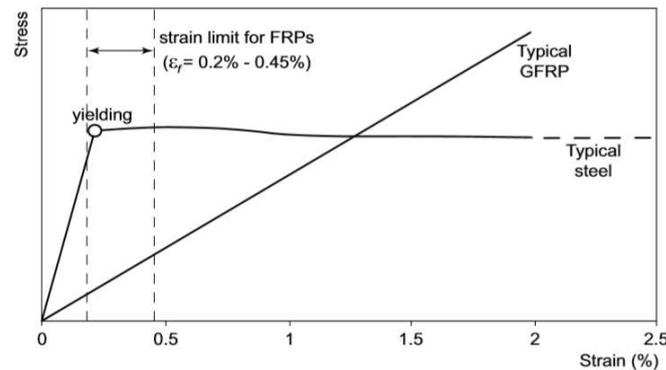


Abb. 2.3: Dehnungsbegrenzung für Schubbewehrung, (Fig. 6-6 FIB Task Group 9.3 2007)

CSA 2012 gibt für die Schubtragfähigkeit des Betons für Querschnitte mit einer effektivem Tiefe von höchstens 300 mm ohne eine axiale Belastung folgende Formel an:

$$V_c = 0,05\lambda\phi_c k_m k_r \sqrt[3]{f'_c b_w d_v} \quad \lambda = 1,0 \text{ für Normaldichte} \quad f'_c \leq 60 \text{ MPa} \quad (2.3)$$

$$k_m = \sqrt{\frac{V_f d}{M_f}} \leq 1,0 \quad k_r = 1 + \sqrt[3]{E_F \rho_{Fw}} \quad (2.4)$$

ϕ_c Widerstandsfaktor für Beton

b_w minimale effektive Stegbreite des Querschnitts

d_v effektive Schubtiefe, der größere Wert aus 0.9d und 0.72h

Für Querschnitte mit einer effektiven Tiefe, die größer ist als 300 mm und bei der die Schubbewehrung gleich oder größer ist als die Mindestschubbewehrung, wird V_c wie oben beschrieben ermittelt. Falls weniger Bewehrung als die Mindestschubbewehrung, die unter bestimmten Voraussetzungen vernachlässigbar ist, vorhanden ist, wird V_c mit einem Faktor k_s multipliziert:

$$k_s = \frac{750}{450 + d} \leq 1,0 \quad (2.5)$$

Im Auflagerbereich, wo die Auflagerreaktion eine Druckkraft parallel zur Schubkraft erzeugt, ist V_c mit einem Faktor $1 \leq k_a \leq 2,5$ zu vergrößern.

Die Schubtragfähigkeit der Schubbewehrung senkrecht zur Längsachse wird folgendermaßen ermittelt, wobei θ den Winkel der diagonalen Druckspannung entspricht und abhängig von der Längsdehnung ist:

$$V_{sF} = \frac{0,4\phi_F A_{Fv} f_{Fu} d_v}{s} \cot \theta \quad f_{Fu} \leq 0,005E_f \quad \theta = 30^\circ + 7000\epsilon_l \quad (2.6)$$

A_{Fv} Fläche der Schubbewehrung
 s Abstand zwischen Schubbewehrung

Der kanadische Highway Bridge Design Code (CSA 2019) gibt etwas andere Formeln vor:

$$V_c = 2,5\beta\phi_c f_{cr} b_v d_{long} \quad d_{long} = \max \{0,72h; 0,9d\} \quad (2.7)$$

$$\beta = \left[\frac{0,4}{1 + 1500\epsilon_x} \right] \left[\frac{1300}{1000 + s_{ze}} \right] \quad \epsilon_x = \frac{M_f}{d_{long}} + V_f + 0,5N_f \leq 0,003 \quad (2.8)$$

$$V_{FRP} = \frac{\phi_{FRP} A_v \sigma_v d_{long} \cot \theta}{s} \quad (2.9)$$

mit σ_v als der kleinere Wert der folgenden Gleichungen:

$$\sigma_v = \frac{\left(\frac{0,05r}{d_s + 0,3} \right) f_{FRPbend}}{1,5} \quad \sigma_v = E_{vFRP} \epsilon_v \quad \text{mit } \epsilon_v = 0,004 \quad (2.10)$$

β berücksichtigt Schubwiderstand des gerissenen Betons
 ϵ_x Längsdehnung
 s_{ze} Rissabstandsparameter

Der ACI 440 2015 gibt zwei Versagensarten auf Schub an; Schubzugversagen mit dem Bruch der FRP-Schubbewehrung und Schubdruckversagen mit einem Einschnüren der Betondruckzone. Das Versagen ist abhängig vom Gehalt der Schubbewehrung bzw. dem Schubbewehrungsindex $\rho_{fv} E_f$. Erhöht sich dieser, entwickelt sich Versagen von Schubzug- hin zu Schubdruckversagen. Weiterhin sind die Schubrisse zu kontrollieren und dafür die Zugdehnung der FRP-Bewehrung auf $\epsilon_{max} = 0,004$ zu begrenzen. Die Schubtragfähigkeit ist auch hier die Summe aus Beton- und FRP-Tragfähigkeit der Schubbewehrung. Der für die Schubspannungen in Stahlbeton verwendete Festigkeitsreduktionsfaktor von 0,75 soll auch hier Anwendung finden. Im Betonanteil wird die Steifigkeit von FRP-Bewehrungen über die Tiefe der neutralen Achse mit dem Term kd berücksichtigt. Für den Bewehrungsanteil wird die gleiche Methode wie bei Stahl angewandt. Die Begrenzung der Spannung in der Bewehrung soll Schubrisssweiten kontrollieren und Versagen im gebogenen Teil des Bügels vermeiden. Mit senkrechten Bügeln erfolgt die Ermittlung zu:

$$V_c = \frac{2}{5} \sqrt{f'_c} b_w (kd) \quad k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f \quad n_f = \frac{E_f}{E_c} \quad \rho_f = \frac{A_f}{bd} \quad (2.11)$$

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fv} d}{s} \quad f_{fv} = 0,004 E_f \leq f_{fb} \quad (2.12)$$

Index v: Schubbewehrung

AASHTO 2018 gibt leichte Variationen dieser Formeln an, in denen die Betontragfähigkeit mit einer vereinfachten Methode grundsätzlich genauso berechnet wird; statt dem Faktor 0,4 ergibt sich allerdings 0,16 und damit eine geringere Tragfähigkeit. Im Beitrag der Schubbewehrung kann in der nicht vereinfachten Methode der Winkel der diagonalen Druckspannung abweichend von 45° , abhängig von der Dehnung der Längsbewehrung, bestimmt werden.

Das Regelwerk Italiens (CNR 2007) bezieht sich ausschließlich auf Schubbewehrungen senkrecht zur Bauteilachse. Die Schubtragfähigkeit ergibt sich bei Vorhandensein einer Schubbewehrung aus der Summe der Beton- und der FRP-Tragfähigkeit. In Formeln ausgedrückt:

$$V_{Rd,ct} = 1,3 \left(\frac{E_f}{E_s} \right)^{\frac{1}{2}} \tau_{Rd} k (1,2 + 40\rho_l) b d \quad \tau_{Rd} = 0,25 f_{ctd} \quad \rho_l = \frac{A_f}{b d} \leq 0,02 \quad (2.13)$$

$$k = 1, \quad \text{wenn mehr als 50\% Längsbewehrung unterbrochen ist} \\ (1,6 - d) \geq 1, \quad \text{mit } d \text{ in m}$$

$$V_{Rd,f} = \frac{A_{fw} * f_{fr} * d}{s} \quad f_{fr} = \frac{f_{fd}}{\gamma_{f,\phi}} \quad (2.14)$$

Der JSCE 1997 schlägt zwei Verfahren für die Ermittlung der Schubtragfähigkeit vor. Mit dem konventionellen Verfahren erfolgt die Bemessung der Schubtragfähigkeit des Betons analog zur Stahlbetonbemessung und die Steifigkeit von FRP wird durch das Verhältnis der E-Module von FRP zu Stahl berücksichtigt. Die Formel ist geeignet, falls reine Biegung ohne Normalkraft entlang des Bauteils auftritt. Für die Tragfähigkeit der Schubbewehrung wird der Therm $E_w \epsilon_{fwd}$ anstatt der Fließspannung von Stahl eingesetzt.

$$V_{ud} = V_{cd} + V_{sd} \quad (2.15)$$

$$V_{cd} = \frac{\sqrt[4]{\frac{1}{d}} \sqrt[3]{\frac{100 A_f E_{fu}}{b_w d E_0}} 0,2 \sqrt[3]{f'_{cd}} b_w d}{\gamma_b} \quad (2.16)$$

$$V_{sd} = \frac{A_w E_w \epsilon_{fwd} (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s) z}{s_s \gamma_b} \quad z = \frac{d}{1,15} \quad (2.17)$$

$$\epsilon_{fwd} = \sqrt{f'_{mcd} \frac{\rho_w E_{fu}}{\rho_{web} E_w}} 10^{-4} \quad f'_{mcd} = \left(\frac{h}{0,3} \right)^{-\frac{1}{10}} f'_c \quad \rho_{web} = \frac{A_w}{b_w s_s} \quad (2.18)$$

$$(2.19)$$

- α_s Winkel zwischen Schubbewehrung und Längsachse
- E_0 Referenz E-Modul (Stahl: 200 kN/mm²)
- E_{fu} E-Modul Zugbewehrung
- A_w Fläche der Schubbewehrung im Bereich s
- E_w E-Modul Schubbewehrung (= E_{fu})
- f'_{mcd} erlaubte Designdruckfestigkeit für Beton bzgl. Größeneffekt

Das zweite Verfahren ist aus dynamischen Modellen entwickelt und stimmt mit empirischen Daten überein, wie z.B. dass der Winkel der Hauptdruckspannung im Beton in der Regel nicht 45° beträgt und die Tragmechanismen des Betons mit der vorhandenen Schubkraft variieren und nicht dem Wert der Schubtragfähigkeit ohne Schubbewehrung entsprechen.

$$V_{ud} = V_{cd} + V_{sd} \quad V_{cd} = V_{czd} + V_{aid} \quad (2.20)$$

$$V_{czd} = \beta f'_{mcd} x_e b_w \gamma_b \quad V_{aid} = \beta_P \beta_{pE} (f'_{mcd})^{1/3} (h - x_e) b_w / \gamma_b \quad (2.21)$$

$$V_{sd} = A_w E_w \epsilon_{fwd} (h - x_e) b_w / (\tan \theta_{cr} s_s) / \gamma_b \quad (2.22)$$

- V_{czd} Designschubtragfähigkeit des Betons in der Druckzone
- V_{aid} Designschubtragfähigkeit des Betons in der diagonalen Risszone

2.3.2 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit werden drei wesentliche Punkte behandelt: Spannungsbegrenzungen, Rissbreitenbeschränkungen und Durchbiegungen.

2.3.2.1 Spannungsbegrenzung

Die Entwicklung der Spannungen in FRP-Bewehrung ist von vielen Faktoren abhängig, wie das Kurz- und Langzeitverhalten, den Materialeigenschaften von Beton und FRP-Bewehrung, Kriechen und Schwinden, der Belastungsgeschichte und Rissverteilungen. Spannungsbegrenzungen bei FRP-Bewehrungsstäben sind notwendig, da diese unter konstanten Lasten nach einer gewissen Dauer bis zum Versagen kriechen können (Kriechbruch). Zusätzlich können bei hohen Belastungen Mikrorisse im Harz den Schutz der Fasern beeinträchtigen und Schädigungen begünstigen (FIB Task Group 9.3 2007).

Der CSA 2012 begrenzt die Spannungen der FRP-Bewehrung im SLS materialabhängig auf folgende Anteile der charakteristischen Zugfestigkeit: Aramid 0,35, Carbon 0,65 und Glas 0,25. Die maximale Dehnung unter Gebrauchslasten soll höchstens 0,002 betragen. JSCE 1997 begrenzt die Spannungen der FRP-Bewehrung grundsätzlich auf 70% der charakteristischen Zugfestigkeit, verweist aber auch auf das Regelwerk für Stahlbeton. Italien gibt an, dass die Einwirkung die faktisch charakteristische Zugfestigkeit nicht überschreiten darf ($\gamma_f = 1$). Die charakteristische Festigkeit ergibt sich unter Berücksichtigung der Dauerhaftigkeit. Unter Langzeitbelastung ergeben sich Abminderungsfaktoren zwischen 0,3 und 0,9 der Kurzzeitfestigkeit. Der ACI 440 2015 gibt Spannungsbegrenzungen für Kriechbruch und Ermüdung an, die nach der Formel 2.23, die das charakteristische Moment infolge aller ständigen Eigen- und Nutzlasten, das Trägheitsmoment im gerissenen Zustand und das Verhältnis von effektiver Tiefe zur Tiefe der elastischen neutralen Achse enthält. Der Faktor k wird nach Gleichung 2.11 berechnet. Weiterhin sind sichere Grenzwerte gegeben, mit der die Kurzzeitfestigkeit abgemindert werden kann. Diese können statt der Berechnung verwendet werden und betragen für Glasfasern den Wert 0,2, für Aramid 0,3 und Carbon 0,55. AASHTO 2018 gibt leicht abweichende Werte für Glasfasern an, die für Ermüdung 0,25 und Kriechbruch 0,3 betragen. Die Spannungsbegrenzungen sind zur Übersicht in Tabelle 2.6 zusammengefasst.

$$f_{fs,sus} = M_{s,sus} \frac{n_f d (1 - k)}{I_{cr}} \quad k \text{ nach (2.11)} \quad (2.23)$$

Tab. 2.6: Faktoren zur Spannungsbegrenzung für FRP-Bewehrung

Regelwerk	GFRP	AFRP	CFRP	Kommentar
CNR 2007	0,3	0,5	0,9	Abminderung unter Langzeitverhalten
CSA 2012 & CSA 2019	0,25	0,35	0,65	
ACI 440 2015	0,2	0,3	0,55	alternativ nach Formel (2.23)
AASHTO 2018	0,25/0,3	-	-	Ermüdung / Kriechbruch
JSCE 1997	0,7	0,7	0,7	Verweis auf STB-Norm

2.3.2.2 Rissbreitenbeschränkung

Im Allgemeinen muss die Rissbreitenbeschränkung nicht wie bei Stahlbeton durchgeführt werden um Korrosion zu vermeiden, sondern sie wird vielmehr aus ästhetischen Gründen, sowie aus

Gründen der Schwingungsanfälligkeit des Bauteils angewendet (Niewels 2008). Ebenfalls können Kriechbruch und Schubeffekte einbezogen werden (ACI 440 2015). Die Rissbildung, Rissbreite und der Rissabstand werden durch viele Faktoren beeinflusst, wie z.B. Betonzugfestigkeit, Verbund, Elastizitätsmodul, eingesetzte Bewehrung, Spannungsverteilung vor der Rissbildung, Bauteilgeometrie und Betondeckung. Da die Verbundspannungs-Schlupfbeziehung im relevanten Schlupfbereich bis 0,4 mm qualitativ ähnlich zu Stahlbeton ist, können zwar dieselben Risstheorien angewendet werden, allerdings ist die Verwendung der Rissbreitenansätze aufgrund unterschiedlicher Dehnsteifigkeiten nach Niewels 2008 nur bedingt möglich. In den Regelwerken finden diese Ansätze deshalb in abgewandelter Form Verwendung.

CNR 2007 empfiehlt, nur die permanenten Lasten für die Ermittlung der charakteristischen Rissbreite w_k zu berücksichtigen. Hierfür ist die Formel 2.24 aus dem Eurocode 2 für Stahlbeton anwendbar, in der der finale mittlere Rissabstand s_m sowie die mittlere Dehnung der Bewehrung ϵ_{fm} einfließen. Die maximale Rissbreite ist auf $w_{max} = 0,5$ mm begrenzt.

$$w_k = \beta * s_m * \epsilon_{fm} \quad \text{wobei} \quad \beta = 1,7 \quad \text{für Risse infolge Lasten} \quad (2.24)$$

Auch JSCE 1997 übernimmt die Ermittlung der Rissbreite aus den Bemessungsnormen für Stahlbeton. Ein wesentlicher Einfluss ist hier der Verbund, der mit einem Faktor k einfließt. Die maximale Rissbreite w_{max} ist abhängig von der Struktur, Umweltbedingungen etc. und wird aus ästhetischen Gründen auf $w_{max} = 0,5$ mm beschränkt.

$$w = k \{4c + 0,7(c_f - \phi)\} \left(\frac{\sigma_{fe}}{E_f} + \epsilon'_{csd} \right) \quad (2.25)$$

- k Verbundeigenschaften, generell 1,0-1,3
- c Betondeckung in mm
- c_f Mitte zu Mitte-Abstand zwischen Verstärkungsmaterialien in mm
- ϕ Durchmesser der Bewehrung in mm
- ϵ'_{csd} Stauchung des Betons aufgrund Kriechen und Schwinden

Grundsätzlich sind auch die Regelungen des ACI 440 2015 aus denjenigen für Stahlbeton angepasst. Es werden zwei Verfahren zur Ermittlung der Rissbreiten vorgestellt, ein direktes, in welcher die Rissbreiten berechnet und eine indirektes, in der die Stababstandsgrenzen s_{max} (Formel 2.26) festgelegt werden. Das indirekte Verfahren entstand aufgrund von Bedenken bezüglich der Eignung der empirischen Formel für die Vorhersage der Rissbreiten in dem direkten Verfahren. Basis des direkten Verfahrens ist ein physikalisches Modell, Expositionsbedingungen werden nicht mehr berücksichtigt. Die Wahl der Grenzzrissbreite w in den Formeln ist abhängig vom Tragwerk und aus ästhetischen Gründen auf 0,4 – 0,7 mm zu begrenzen, prinzipiell sind aber größere Rissbreiten als bei Stahlbeton zulässig. Der Parameter k_b berücksichtigt das Verbundverhalten und soll bei nicht vorhandenen Testwerten konservativerweise 1,4 betragen. Im AASHTO 2018 wird ein anderer Faktor C_b in ähnlicher Weise berücksichtigt, allerdings steht dieser im Zähler des Bruches und hat einen Wert von 0,83, was etwa 1/1,2 entspricht und damit weniger konservativ ist.

$$s_{max} = 1,15 \frac{E_f w}{f_{fs} k_b} - 2,5 c_c \leq 0,92 \frac{E_f w}{f_{fs} k_b} \quad (2.26)$$

- w Grenzrissbreite, auf 0,4-0,7 mm aus ästhetischen Gründen begrenzen
- k_b berücksichtigt Verbundverhalten, $k_b = 1,4$ bei nicht vorhandenen Testwerten
- c_c Betondeckung in inch bzw. mm
- f_{fs} Spannungen in der FRP-Bewehrung unter Gebrauchslasten

Ebenso empfiehlt CSA 2012 für die Risskontrolle die Einhaltung von Abstands- sowie Mindestbewehrungsregelungen. Alle Bauteile, die mit einem Fachwerkmodell bemessen wurden, müssen in Oberflächennähe ein Bewehrungsnetz enthalten. Weiterhin soll das Verhältnis von Bewehrungsfläche zu Bruttobetonfläche mindestens 0,003 (Carbon) bzw. 0,004 (AR-Glas und Aramid) betragen. Der Abstand dieser Bewehrung wird mit 300 mm (Carbon) bzw. 200 mm (AR-Glas und Aramid) begrenzt. CSA 2019 empfiehlt eine Rissbreitenbegrenzung für Bauteile, deren FRP- Dehnungen im SLS $\epsilon_{FRP} \geq 0,0015$ überschreiten. In aggressiver Umgebung soll diese 0,5 mm, ansonsten 0,7 mm betragen. Die Rissbreite ist nach folgender Formel zu berechnen:

$$w_{cr} = 2 \frac{f_{FRP}}{E_{FRP}} \frac{h_2}{h_1} k_b \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} \quad (2.27)$$

- s Abstand der Schubbewehrung
- h_1 Abstand zwischen Schwerpunkt der Zugbewehrung und neutraler Achse
- h_2 Abstand zwischen Oberfläche der Zugseite und neutraler Achse
- d_c Abstand zwischen Schwerpunkt der Zugbewehrung und Betonoberfläche Zugseite
- k_b berücksichtigt Verbund, in Tests bestimmen sonst
 - = 0,8 für sand-ummantelte FRP-Stäbe
 - = 1,0 für verformte FRP-Stäbe

2.3.2.3 Durchbiegung

Aufgrund des geringeren Elastizitätsmoduls der FRP-Bewehrung sind größere Durchbiegungen als bei Stahlbeton zu erwarten. JSCE 1997 empfiehlt Nachweise diesbezüglich gemäß ihren Regelungen für Stahlbeton durchzuführen und weist zusätzlich daraufhin, dass aufgrund der größeren Verformungen die Wahrscheinlichkeit für die Bildung von Schubrisen größer ist und diese dementsprechend zu berücksichtigen sind. Langzeitdurchbiegungen, in denen Biegerisse sowie Kriechen und Schwinden durch Koeffizienten k_i berücksichtigt werden, sind wie folgt zu ermitteln:

$$w_{longterm} = (k_1 + k_2 + k_3) * w_{elastic} \quad (2.28)$$

ACI 440 2015 bietet auch für die Begrenzung der Durchbiegungen zwei Methoden an, eine indirekte, in welcher die Mindestdicke eines Elements vorgegeben wird, und eine direkte, in der die Begrenzung durch die berechnete Durchbiegung durchgeführt wird. Die Mindestdicke der indirekten Methode ist für Balken und einachsige gespannte Platten gegeben und variiert je nach Lagerung zwischen 1/4 und 1/16. Tension-Stiffening wird hier nicht berücksichtigt. In der direkten Methode sollen kurzzeitige Durchbiegungen mit effektiven Trägheitsmomenten und den üblichen Techniken ermittelt werden. Effektive Trägheitsmomente I_e berücksichtigen die Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen (tension-stiffening) und die Veränderung der Biegesteifigkeit entlang des Bauteils (Formel 2.29). Voraussetzung ist, dass das einwirkende Moment größer als das Rissmoment ist. Ansonsten kann das ungerissene Trägheitsmoment verwendet werden. Die

direkte Methode wird auch im AASHTO 2018 vorgeschlagen. Die langfristigen Durchbiegungen infolge Kriechen und Schwinden werden mit Formel 2.30 berechnet.

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \gamma_d \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2 \left(1 - \frac{I_{cr}}{I_g}\right)} \leq I_g \quad (2.29)$$

I_g	ungerissenes Trägheitsmoment
I_{cr}	gerissenes Trägheitsmoment
M_{cr}	Rissmoment
M_a	maximales Moment für Verformung $M_a \geq M_{cr}$
γ_d	berücksichtigt variierende Steifigkeit über die Bauteillänge

$$\Delta_{(cp+sh)} = 0,6\xi(\Delta_i)_{sus} \quad (2.30)$$

ξ	zeitabhängiger Faktor für Langzeitbelastung, max. 2
Δ_i	sofortige Durchbiegung

Es wird erwartet, dass die zeitabhängige Durchbiegungszunahme im Vergleich zu Stahlbetonbauteilen geringer ist. Die Zunahme der Tiefe der neutralen Achse erhöht das Trägheitsmoment des gerissenen Querschnitts deutlicher als bei Stahlbeton.

CSA 2012 empfiehlt eine Begrenzung der Durchbiegung, die je nach Bauteilart zwischen 1/180 und 1/480 liegt. Die Langzeitdurchbiegung wird ebenfalls mit einem Faktor S berücksichtigt, der maximal den Wert 2 für 5 Jahre annehmen kann. Die Ermittlung der Durchbiegung erfolgt durch eine unmittelbare Berechnung mittels Integration der Krümmung oder nach einer Formelsammlung, in der übliche Systeme gelistet sind. CSA 2019 dagegen verwendet zur Bestimmung der Verformbarkeit einen Gesamtleistungsfaktor J bestehend aus den Verhältnissen der faktorisierten Biegemomente im ULS und SLS, der abhängig von der Querschnittsform einen Mindestwert einhalten soll:

$$J = \frac{M_{ult}\psi_{ult}}{M_s\psi_c} \geq 4,0 \text{ für rechteckige Querschnitts und } 6,0 \text{ für T-Profile} \quad (2.31)$$

M_{ult}	Moment aus ULS
ψ_{ult}	Krümmung mit Moment aus ULS
M_s	Moment aus SLS
ψ_c	Krümmung bei dem Moment der max. Betonstauchung von 0,001

CNR 2007 empfiehlt die Ermittlung der Durchbiegung durch eine Integration der Krümmungen oder mit vereinfachten Analysen ähnlich zu denen für Stahlbeton. Die Formel für die zweite Variante entstand in Anlehnung an den Eurocode 2:

$$f = f_1\beta_1\beta_2 \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}}\right)^m + f_2 \left[1 - \beta_1\beta_2 \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}}\right)^m\right] \quad (2.32)$$

f_1	Durchbiegung des ungerissenen Querschnitts
f_2	Durchbiegung des gerissenen Querschnitts
$m = 2$	
$\beta_1 = 0,5$	Koeffizient für Verbundeigenschaften
$\beta_2 = 1$	für Kurzzeitbelastung
$\beta_2 = 0,5$	für Langzeitbelastung oder zyklische Belastung

2.3.3 Dauerhaftigkeit

Zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit wird in den Regelwerken ein Faktor genutzt, der die Schwächung der Matrix der FRP-Bewehrung berücksichtigt.

CNR 2007 unterscheidet zwei Expositionen; Feuchtigkeit und keine Feuchtigkeit, und gibt dann abhängig vom Fasertyp einen Umweltfaktor zwischen 0,7 - 1,0 an, mit dem die Festigkeit bzw. die Bruchdehnung abgemindert wird, wobei der Faktor für Carbon am größten und für Glas am kleinsten ist. Zusätzlich wird ein Abminderungsfaktor für Langzeiteffekte gegeben, der Kriechen, Relaxation und Ermüdung berücksichtigt (siehe Spannungsbegrenzung Kap. 2.3.2).

ACI 440 2015 und AASHTO 2018 mindern ebenfalls die Festigkeit und die maximale Dehnung der FRP-Bewehrung ab und unterscheiden dabei zwischen Betonen, die der Umwelt und Wetter ausgesetzt sind und Betonen, bei denen dies nicht der Fall ist. Der Faktor liegt ebenfalls abhängig vom Fasertyp zwischen 0,7 und 1,0 und ist nach eigenen Angaben konservativ.

Kanada verweist für die Dauerhaftigkeit an ihre Norm für Stahlbeton, auch in der FRP-Norm von Japan ist keine Angabe bzgl. Dauerhaftigkeit zu finden.

2.3.4 Schlussfolgerung

Die Bemessungsvorschriften der angeführten Regelwerke basieren allesamt auf den jeweiligen nationalen Regelwerken für Stahlbeton. In diesen besteht die grundlegende Annahme, dass der Versagensmodus von Stahlbetonbauteilen aufgrund von Fließen der Bewehrung immer duktil ist. Für Bewehrung aus FRP ist das nicht der Fall. Daher wurden in den Regelwerken für FRP entsprechend Anpassungen vorgenommen bzw. zusätzliche Sicherheitsfaktoren eingebracht. Trotzdem stellt sich die Frage, ob der grundsätzliche Bemessungsansatz nicht losgelöst von Stahlbeton sein sollte, damit das Bauteilverhalten realer und somit sicherer abgebildet wird - was jedoch sehr viel aufwändiger in der Erstellung ist. Weiterhin weisen die Regelwerke strukturelle Unsicherheiten auf, z.B. durch den Mangel an veröffentlichten Aufzeichnungen zur Entstehung der Materialteilsicherheitsbeiwerte. Die Anwendung mehrerer Festigkeitsreduktionsfaktoren zur Berücksichtigung des Langzeitverhaltens führt möglicherweise nicht zu dem Versagensmodus, für den die Bemessung ausgerichtet ist oder zu unwirtschaftlicher Bemessung. Daher wird empfohlen, geeignete Bemessungsvorschriften aufgrund von Untersuchungen zu entwickeln (FIB Task Group 9.3 2007). Folgende Schlussfolgerungen können aus der Gegenüberstellung der Normen gewonnen werden:

- Die Aktualität der Regelwerke ist sehr unterschiedlich. Der JSCE 1997 besteht seit 1997 und enthält damit keine Erkenntnisse aus den letzten 20 Jahren. Auch der CNR 2007 ist nicht aktuell. Die betrachteten nordamerikanischen Richtlinien aus den USA (ACI 440 2015; AASHTO 2018) und Kanada (CSA 2012; CSA 2019) hingegen wurden in den letzten Jahren bestätigt bzw. neu aufgelegt.
- Die Sicherheitsfaktoren des ACI 440 2015 sind am konservativsten (FRP-Abminderung auf 0.55), die des JSCE 1997 am wenigsten konservativ (0.87 für CFRP). Auch bei der Mindestbewehrung hat der ACI 440 2015 mit dem 1,8-fachen Rissmoment die höchsten Anforderungen und ist konservativer als die anderen Regelwerke mit 1,5-fachem Rissmoment (CSA 2012; CNR 2007) .
- Die Bemessung der Biegemomente ist insgesamt vergleichbar und beruht auf dem inneren Kräftegleichgewicht, aber auch hier findet eine weitere Abminderung des Momentenwiderstandes durch den ACI 440 2015 statt, wenn FRP-Versagen eintritt, indem durch den Abminderungsfaktor β_l die Druckzonenhöhe verkleinert wird. Im Vergleich zum EC2 werden

je nach Versagensart unterschiedliche Berechnungen herangezogen, bei dem empfohlenen Betonversagen kann die hohe Zugfestigkeit der Bewehrungen nicht ausgenutzt werden.

- Für die Bemessung auf Schub gibt es kein allgemein anerkanntes Bemessungsmodell. Es werden in allen Regelwerken zwei Traganteile, aus Beton und Schubbewehrung bestehend, berücksichtigt, die unterschiedlich quantifiziert werden. Die Formeln dazu sind meist aus dem Stahlbetonbau abgeleitet und angepasst. Alle Richtlinien mindern die Betondruckfestigkeit für den Betontraganteil ab, im Traganteil der Bewehrung werden unterschiedliche Einflüsse berücksichtigt. Der ACI 440 2015 und CSA 2019 begrenzen die Dehnung der Schubbewehrung auf 0,004, eine Spannungsbegrenzung der Schubbewehrung ist in allen betrachteten nordamerikanischen Regelwerken zu finden. Der CSA 2012 sowie AASHTO 2018 lassen außerdem eine Variation des Druckstrebenwinkels in Abhängigkeit der Längsbewehrungsdehnung zu. Weiterhin verkleinert der CSA 2012 die Schubtragfähigkeit der Bewehrung mit einem Faktor von 0,4 und der JSCE 1997 greift auf eine komplexere Herangehensweise als die Verwendung der maximalen Festigkeit der Schubbewehrung zurück.
- In der Spannungsbegrenzung im SLS differenziert JSCE 1997 als einziges nicht das Material der FRP-Bewehrung und ist am wenigsten konservativ, der ACI 440 2015 hingegen am meisten. Insgesamt ist die Spannungsbegrenzung, abgesehen von CNR 2007 für Carbon, deutlich größer als bei Betonstahl nach dem Eurocode 2.
- Die Rissbreitenbeschränkung findet zum Teil auf Basis der Berechnung von Rissbreiten (CNR 2007; JSCE 1997; ACI 440 2015; CSA 2019), aber auch aufgrund 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 0,5 mm, in den nordamerikanischen Regelwerken unter Umständen bis zu 0,7 mm.
- Die Begrenzung der Durchbiegung wird größtenteils mittels direkter Berechnungen der Durchbiegungen (CNR 2007; ACI 440 2015; AASHTO 2018; CSA 2012) durchgeführt. Lediglich der ACI 440 2015 führt optional die Begrenzung der Schlankheit ein, die allerdings recht konservativ und damit unwirtschaftlich ist.
- Für eine ausreichende Dauerhaftigkeit verwenden der ACI 440 2015; AASHTO 2018; CNR 2007 einen Umweltfaktor, der materialabhängig die Umwelteinflüsse berücksichtigt. Dabei findet jedoch keine große Differenzierung der Art des Einflusses statt.
- Insgesamt gilt es besonders zu beachten, dass das Bauteilverhalten weniger Duktilität aufweist und Bewehrungsversagen schlagartig auftreten kann. Mit den hohen Sicherheitsfaktoren wird versucht, diese Besonderheiten zu berücksichtigen. Damit wird eine wirtschaftliche Ausnutzung des Materials jedoch schwierig.
- Aufgrund der Aktualität und Differenziertheit in der Betrachtung werden die US-amerikanischen (ACI 440 2015; AASHTO 2018) und kanadischen Regelwerke (CSA 2012; CSA 2019) als am besten geeignet bewertet.
- Da die Bemessung nach dem Regelwerk ACI 440 2015 insofern einfach umsetzbar ist, als das das Regelwerk selbst viel Input und Beispiele einbringt, wird in den folgenden Kapiteln mit diesem Regelwerk weiter gearbeitet, obwohl die Ansätze eher konservativ sind.

Kapitel 3

Regelbemessung

In diesem Kapitel wird an einem Beispiel eine Bemessung und Nachweisführung eines FRP-bewehrten Bauteils nach dem ACI 440 2015 für den ULS sowie für den SLS durchgeführt. Dazu wird ein Einfeldträger mit einem rechteckigen Querschnitt verwendet (Abb. 3.1).

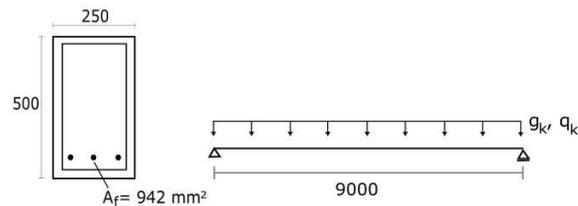


Abb. 3.1: System und Querschnitt [mm]

3.1 Bemessung des Grenzzustands der Tragfähigkeit

Eingangswerte

Für die Bemessung wird die Betongüte C50/60 gewählt sowie Carbonstäbe als Bewehrung. Im Unterschied zum EC2 werden auf der Einwirkungsseite die Eigenlasten mit dem Faktor 1.2 und die Nutzlasten mit dem Faktor 1.6 multipliziert (Bsp. 4 ACI 440 2015 bzw. Nanni et al. 2014). Für die Nutzlast werden 10 kN/m² gewählt, damit der Träger mindestens für Fuß- und Radwegbrücken einsetzbar ist.

Beton C50/60

$f'_c = 50 \text{ N/mm}^2$	charakt. Betondruckfestigkeit(Zylinder)
$\epsilon_{cu} = 0.003$	max. Betonstauchung
$\beta_l = 0.65$	Faktor zur Abminderung des ausgeglichenen Bewehrungsgrad abhängig von der Betonfestigkeit
$E_c = 37\,000 \text{ N/mm}^2$	E-Modul Beton

FRP Bewehrung (längs) Carbon (Vgl. Tab. 2.2)

$f_{fu1} = 2100 \text{ N/mm}^2$	charakt. Zugfestigkeit (längs)
$\epsilon_f = 0.018$	charakt. Bruchdehnung
$E_f = 162\,000 \text{ N/mm}^2$	E-Modul FRP
$r_b = 6 \text{ mm}$	Biegeradius der FRP-Bewehrung
$d_b = 10 \text{ mm}$	Durchmesser der Bewehrungsstäbe
$n = 12$	Anzahl der Stäbe
$A_f = \frac{d_b^2}{2} \pi n = 942 \text{ mm}^2$	Bewehrungsfläche

Schubbewehrung

$A_{fv} = 160 \text{ mm}^2$	Fläche der Schubbewehrung
$s = 150 \text{ mm}$	Abstand zwischen Bügel

Querschnitt

$b = 250 \text{ mm}$	Breite
$h = 500 \text{ mm}$	Höhe
$c_c = 38 \text{ mm}$	Betondeckung
	Umrechnung von 1.5 inch aus Bsp. 1 ACI 440 2015
$d = h - c_c - 12.5 - \frac{d_b}{2} = 444,5 \text{ mm}$	statische Nutzhöhe, 12.5 aus Bsp. 1 ACI

statisches System: Einfeldträger

$l = 9 \text{ m}$	Länge
-------------------	-------

Rissbreitenbeschränkung

$w = 0,7 \text{ mm}$	max. Rissbreite
$k_b = 1.4$	Verbundverhalten, ohne experimentelle Daten

Einwirkung (ULS und SLS)

$g_k = b * h * 25 = 3,13 \text{ kN/m}$	charakt. Eigengewicht
$q_k = 10 * b = 2,5 \text{ kN/m}$	charakt. Nutzlast mit 10 kN/m^2
$M_k = \frac{(g_k + q_k)l^2}{8} = 56,9 \text{ kNm}$	einwirkendes SLS-Moment
$g_d = 1.2 * g_k = 3,8 \text{ kN/m}$	Design Eigengewicht
$q_d = 1.6 * q_k = 4 \text{ kN/m}$	Design Nutzlast
$M_d = \frac{(g_d + q_d)l^2}{8} = 78,5 \text{ kNm}$	einwirkendes Designmoment
$V_d = \frac{(g_d + q_d)l}{4} = 17,4 \text{ kN}$	einwirkende Design-Querkraft

Materialfestigkeit

Auf der Widerstandsseite werden sowohl die Festigkeit als auch die Bruchdehnung mit dem Umweltreduktionsfaktor C_E multipliziert, der für Carbon 0.9 beträgt. Für AR-Glas beträgt der Faktor 0.7, für Basalt wird dieser Faktor im folgenden Kapitel ebenso herangezogen. Damit soll die Dauerhaftigkeit der Bewehrung mit einbezogen werden. Eine weitere Reduktion des Widerstands findet in Abhängigkeit des Nachweises statt.

$C_E = 0.9$	Umweltreduktionsfaktor Carbon
$f_{fu} = C_E f_{fu1} = 1890 \text{ N/mm}^2$	Design-Bruchfestigkeit
$\epsilon_{fu} = C_E \epsilon_f = 0.016$	Design-Bruchdehnung
$f_{fb} = (0.05 \frac{r_b}{d_b} + 0.3) f_{fu} = 624 \text{ N/mm}^2 \leq f_{fu}$	Designzugfestigkeit von gebogenen FRP-Stäben (Schubbewehrung)

Bewehrungsgrad

In Abhängigkeit der Größe des Bewehrungsgrades im Vergleich zum ausgeglichenen Bewehrungsgrad, der ein gleichzeitiges Beton- und Bewehrungsversagen darstellt, wird die Art der Nachweisberechnung für Biegung bestimmt. Ist der vorhandene Bewehrungsgrad größer als der ausgeglichene, entsteht Betonversagen. Ist der vorhandene Bewehrungsgrad dagegen kleiner als der ausgeglichene, versagt der Querschnitt durch Bewehrungsbruch.

$\rho_f = \frac{A_f}{bd} = 0.0085$	vorhandener Bewehrungsgrad
$\rho_{fb} = 0.85 \beta_l \frac{f'_c}{f_{fu}} * \frac{E_f \epsilon_{cu}}{E_f \epsilon_{cu} + f_{fu}} = 0.003$	ausgeglicherer Bewehrungsgrad
$\rho_f \geq \rho_{fb}$	\Rightarrow Betonversagen

Biegetragfähigkeit

Aufgrund der Auslegung des Querschnitts mit Betonwversagen wird der Momentenwiderstand mit der vorhandenen Spannung in der Bewehrung und dem Kräftegleichgewicht berechnet. Der Widerstand wird mit $\phi = 0.65$ verringert. Bei einem Versagen der Bewehrung wäre der Teilsicherheitsbeiwert $\phi = 0.55$ (Vgl. Abbildung 2.2).

$$\begin{aligned}
 f_f &= \sqrt{\frac{(E_f \epsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0.85 \beta_t f'_c}{\rho_f} E_f \epsilon_{cu}} - 0.5 E_f \epsilon_{cu} && \text{Spannung in der Längsbewehrung} \\
 &= 1038 \text{ N/mm}^2 \leq f_{fu} \\
 a &= \frac{A_f f_f}{0.85 f_c b} = 92 \text{ mm} && \text{Druckzonenhöhe} \\
 M_n &= A_f f_f (d - \frac{a}{2}) = 390 \text{ kNm} && \text{Widerstandsmoment} \quad (2.1)
 \end{aligned}$$

Biegenachweis

$$\begin{aligned}
 \phi &= 0.65 && \text{Teilsicherheitsbeiwert wenn} \\
 &&& \rho_f \geq 1.4 \rho_{fb} = 0.0042 \\
 \phi M_n &= 253 \text{ kNm} && \text{abgeminderter Momentenwiderstand} \\
 M_d &\leq \phi M_n && \text{Biegenachweis erfüllt}
 \end{aligned}$$

Mindestbewehrung

Die Berechnung der Mindestbewehrung wird der Vollständigkeit halber durchgeführt, auch wenn durch das druckkontrollierte Versagen keine Mindestbewehrung notwendig ist.

$$\begin{aligned}
 b_w &= b && \text{gesamte Breite als effektive Breite} \\
 A_{f,min} &= \frac{0.41 \sqrt{f'_c}}{f_{fu}} b_w d \geq \frac{2.3}{f_{fu}} b_w d && \text{Mindestbewehrung } A_{f,min} \\
 170 \text{ mm}^2 &\geq 135 \text{ mm}^2 \\
 170 \text{ mm}^2 &\leq 942 \text{ mm}^2 && \text{Mindestbewehrung erfüllt}
 \end{aligned}$$

Schubtragfähigkeit

Die Schubkraft des Trägers besteht aus dem Traganteil des Betons und der Bewehrung. Der Sicherheitsbeiwert beträgt hier $\phi_V = 0.75$.

$$\begin{aligned}
 n_f &= \frac{E_f}{E_c} = 4.4 && \text{Verhältnis E-Module} \\
 k &= \sqrt{2 \rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f = 0.24 && \text{Verhältnis Tiefen neutrale Achse - Bewehrung} \\
 V_c &= \frac{2}{5} \sqrt{f'_c} b_w k d = 75 \text{ kN} && \text{Schub-Traganteil Beton} \quad (2.11)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_{fv} &= 0.004 E_f \leq f_{fb} && \text{Zugspannung für Schubbewehrung} \\
 V_f &= \frac{A_{fv} f_{fv} d}{s} = 296 \text{ kN} && \text{Anteil Schubbewehrung} \quad (2.12)
 \end{aligned}$$

Nachweis Schub

$\phi_V = 0.75$	Sicherheitsbeiwert für Schub
$V_n = (V_c + V_f) = 370,5 \text{ kN}$	Schubwiderstand
$\phi_V V_n = 278 \text{ kN}$	Designwiderstand

$$V_d \leq \phi_V V_n$$

Nachweis erfüllt

Mindestbewehrung Schub

Eine Mindestschubbewehrung ist nur notwendig, wenn die einwirkende Querkraft V_d größer ist als $\phi V_c/2$.

$$A_{fv,min} = \frac{0.35b_w s}{f_{fv}} = 21 \text{ mm}^2 \quad \text{Mindestbewehrung}$$

3.2 Bemessung des Grenzzustands der Gebrauchstauglichkeit**Rissbildung**

Die Begrenzung der Rissbildung kann durch einen maximalen zulässigen Abstand der Bewehrungsstäbe erfolgen (Vgl. Kapitel 2.3.2).

$$f_{fs} = \frac{M_k}{(d - \frac{a}{2})A_f} = 152 \text{ N/mm}^2 \quad \text{Spannung in Bewehrung}$$

$$s_{max} = \frac{1.15E_f w}{f_{fs} k_b} - 2.5c_c \leq \frac{0.92E_f w}{f_{fs} k_b} \quad \text{max. Abstand zw. Bewehrungsstäben} \quad (2.26)$$

$$519 \text{ mm} \leq 491 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow s_{max} = 491 \text{ mm}$$

$$d_{c,side} = 2.5 + 0.5d_b = 7,5 \text{ mm} \quad \text{seitliche Betondeckung}$$

$$s_{provided} = \frac{b - 2d_{c,side}}{n - 1} = 21 \text{ mm} \quad \text{verfügbarer Abstand}$$

$$s_{provided} \leq s_{max}$$

\Rightarrow **Rissnachweis erfüllt**

Durchbiegung

In der ersten Variante für die Durchbiegungsbegrenzung kann konstruktiv eine Mindesthöhe des Querschnitts vorgegeben werden. Diese ist für Einfeldträger wie folgt:

$$h_{soll} = \frac{l}{10} = 0,9 \text{ m} \quad \text{Sollhöhe des Querschnitts}$$

$$h_{soll} > h \quad \text{Querschnittshöhe h zu klein}$$

In der genaueren Berechnungsmethode, die nachfolgend aufgezeigt wird, wird ein effektives Trägheitsmoment berechnet, mit dem zunächst die sofortige Durchbiegung bestimmt wird. Mit einem

zeitabhängigen Faktor ξ wird schließlich der Einfluss von Kriechen und Schwinden berücksichtigt.

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{3}k^3 + n_f A_f d^2 (1-k)^2 \quad \text{Trägheitsmoment des gerissenen Querschnitts}$$

$$= 5.7 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

$$I_g = \frac{bh^3}{12} = 2.6 \cdot 10^9 \text{ mm}^4 \quad \text{Brutto- Trägheitsmoment}$$

$$y_t = 0.5bh$$

$$M_{cr} = \frac{0.62\sqrt{f_c}I_g}{y_t} = 0,18 \text{ kNm} \quad \text{Rissmoment}$$

$$M_k \geq M_{cr} \quad \text{Querschnitt reißt}$$

$$\gamma = 1.72 - 0.72 \frac{M_{cr}}{M_k} = 1.7$$

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \gamma \frac{M_{cr}}{M_k} \left(1 - \frac{I_{cr}}{I_g}\right)} \leq I_g \quad (2.29)$$

$$I_e = 5.7 \cdot 10^8 \leq 2.6 \cdot 10^9 \quad \text{effektives Trägheitsmoment in mm}^4$$

$$K = 1 \quad \text{für simple spans (Abschnitt 7.3.2.1 ACI 440 2015)}$$

$$\Delta_{i,DL} = \frac{K5M_k l^2}{48E_c I_e} = 22,7 \text{ mm} \quad \text{Durchbiegung}$$

$$\xi = 2 \quad \text{zeitabhängiger Faktor für Langzeitbelastung, nach 5 Jahren, Größtwert}$$

$$\Delta_{c,ps} = 0.6\xi\Delta_{i,DL} = 27 \text{ mm} \quad \text{Langzeit-Durchbiegung} \quad (2.30)$$

$$w_{\max} = \frac{1}{300} = 30 \text{ mm} > 27 \text{ mm} \quad \text{Durchbiegungskriterium erfüllt}$$

Spannungsbegrenzung

Zur Begrenzung der Spannung in der FRP-Bewehrung wird Carbon auf 55 % der Designzugfestigkeit abgemindert (Vgl. Tabelle 2.6).

$$f_{f,max} = 0.55 \cdot f_{fu} = 1040 \text{ N/mm}^2 \quad \text{maximale Spannung}$$

$$f_{fs} < f_{f,max} \quad \text{Spannungsbegrenzung eingehalten}$$

Kapitel 4

Parameterstudie

4.1 Randbedingungen

Die nachfolgend durchgeführte Parameterstudie dient der Untersuchung der optimalen Bauteilabmessungen eines Betonträgers hinsichtlich der Umweltwirkung. Die wesentlichen Einflüsse aus den Bemessungsvorschriften in Bezug auf die Bauteilabmessung sind die Biegebemessung sowie die Begrenzung der Verformungen. Die maßgeblichen Parameter des Querschnitts, die den Bauteilwiderstand diesbezüglich beeinflussen, sind die Trägerhöhe h bzw. die statische Nutzhöhe d sowie die Bewehrungsfläche A_f . Für die Durchbiegung ist zusätzlich die Bauteillänge l von Bedeutung. Die Schubbewehrung bzw. -bemessung hat einen nachrangigen Einfluss auf die Querschnittsdimensionierung, daher wird sie hier vernachlässigt, obwohl ein Einfluss auf das Treibhauspotenzial grundsätzlich gegeben ist. Die folgende Untersuchung wird im Hinblick auf den maßgebenden Nachweis, die damit einhergehende Bestimmung der optimalen Verhältnisse von Querschnittshöhe zu Bewehrungsfläche in Bezug auf den Umwelteinfluss und deren Veränderung in Abhängigkeit der verschiedenen Bewehrungsmaterialien durchgeführt. Dazu werden Bewehrungsstäbe aus Carbon, AR-Glas, Basalt und Stahl für die Berechnungen herangezogen. Im Vergleich zu den nichtmetallischen Bewehrungen, die wie in Kapitel 3 gezeigt mit den Vorschriften des ACI 440 2015 bemessen werden, werden die Berechnungen mit Betonstahl nach den gängigen Methoden des Eurocodes 2 (EN 1992-1-1 2011) durchgeführt. Das Schema der Parametervariation ist in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Tab. 4.1: Schema der Parametervariation

	Parametervariation
geometrische Randbedingungen	Länge, Höhe, Bewehrungsfläche
mechanische Randbedingungen	Festigkeit, Steifigkeit, Bruchdehnung
Regelwerk	ACI 440 2015 (FRP), EN 1992-1-1 2011 (BS)

Weiterhin wird ein Einfeldträger und ein rechteckiger Querschnitt mit konstanter Breite für die Berechnungen herangezogen. Die Materialkennwerte für die nichtmetallischen Bewehrungen stammen von einem deutschen Hersteller (solidian 2020), sodass die Aktualität gewährleistet wird (siehe Tabelle 2.2). Für Beton wurde ein C50/60 gewählt, um grundsätzlich dem Anspruch (siehe Kapitel 1.1) zu genügen, mit hohen Festigkeiten kleinere Abmessungen zu erlangen und um vorzeitigem Betonversagen entgegenzuwirken (siehe Kapitel 2.3.1). Die Nutzlast wird mit 10 kN/m^2 angesetzt und die maximale Durchbiegung Regelwerk übergreifend mit $L/300$ gewählt. Für die Berechnung mit Betonstahl wurde zur Vereinfachung eine Endkriechzahl von $\varphi = 2$ und eine Gesamtschwinddehnung von $\epsilon_{cs} = 0.29 \text{ ‰}$ gewählt, die eigentlich abhängig von den sich veränderten Querschnittsabmessungen sind. Auch der ACI 440 2015 verwendet einen einfachen Ansatz zur Berücksichtigung der Langzeitverformungen mit einem Faktor $\xi = 2$.

4.2 Umwelteinfluss

Der Einfluss auf die Umwelt wird mit dem Global Warming Potential (GWP) bzw. Treibhauspotenzial dargestellt. Der Faktor GWP ist ein Maß für den Beitrag eines Materials zur globalen Erwärmung und äquivalent zu der Menge CO_2 , die in 100 Jahren dasselbe Treibhauspotenzial erzeugt (baunetzwissen 2020). Neben dem Treibhauspotenzial gibt es weitere ökologische Einflussfaktoren. Aufgrund der globalen Bedeutsamkeit, den CO_2 -Ausstoß zu reduzieren, um die Erderwärmung zu begrenzen, wird sich in dieser Arbeit jedoch auf das GWP beschränkt.

Für einen Beton C50/60 beträgt das GWP $335 \text{ kg CO}_2 \ddot{\text{A}}\text{q}$ pro Kubikmeter Beton, Betonstahl erzeugt $2,3 \text{ kg CO}_2 \ddot{\text{A}}\text{q}$ pro Kilogramm der Bewehrung und das GWP der nichtmetallischen Bewehrungen hat pro kg eine Höhe von $18,2 \text{ kg CO}_2 \ddot{\text{A}}\text{q}$ für Carbon, $3,1 \text{ kg CO}_2 \ddot{\text{A}}\text{q}$ für AR-Glas und $2,5 \text{ kg CO}_2 \ddot{\text{A}}\text{q}$ für Basalt (Tabelle 4.2; Stoiber et al. 2020). Damit ist Carbon deutlich stärker am Treibhauseffekt beteiligt als die anderen Bewehrungsmaterialien, die allerdings auch eine geringere Festigkeit aufweisen.

Tab. 4.2: Treibhauspotenzial des Betons und der Bewehrungen

Material		GWP [$\text{kg CO}_2 - \ddot{\text{A}}\text{q}$]
Beton C50/60	pro m^3	335
Betonstahl	pro kg	2,3
CFRP	pro kg	18,2
GFRP	pro kg	3,1
BFRP	pro kg	2,5

4.3 Berechnung

Die Berechnungen erfolgen analog zu der Regelbemessung, die in Kapitel 3 aufgezeigt wurde. Die geometrisch variierenden Größen sind die statische Nutzhöhe d , die Bewehrungsfläche A_f sowie die Trägerlänge l . Die Berechnungen erfolgen mit dem Programm MATLAB R2018b. Mithilfe der Bruce-Force-Methode wird in for-Schleifen für eine Bewehrungsfläche A_f von 0 bis 5000 mm^2 die zugehörige kleinst mögliche statische Nutzhöhe d berechnet, sodass der Biegenachweis und der Nachweis der Verformungen gerade erfüllt sind. Die Ergebnisse der Berechnungen werden in Graphiken dargestellt. Die Berechnungen sind als Auszüge aus den Matlab Codes im Anhang zu finden.

4.3.1 Biegewiderstand

Der Biegenachweis wird dargestellt als eine Kurve, bei der der Momentenwiderstand der Momenteneinwirkung entspricht. Der kleinst mögliche Momentenwiderstand ergibt sich aus der zugehörigen statischen Nutzhöhe d in Abhängigkeit der Bewehrungsfläche A_f . Die Kurve teilt das Diagramm in zwei Bereiche: oberhalb dieser ist die Tragfähigkeit des Trägers gegeben, unterhalb ist sie es nicht. Die Neigung der Kurve verändert sich dort, wo sich die Versagensart ändert (Abbildung 4.1).

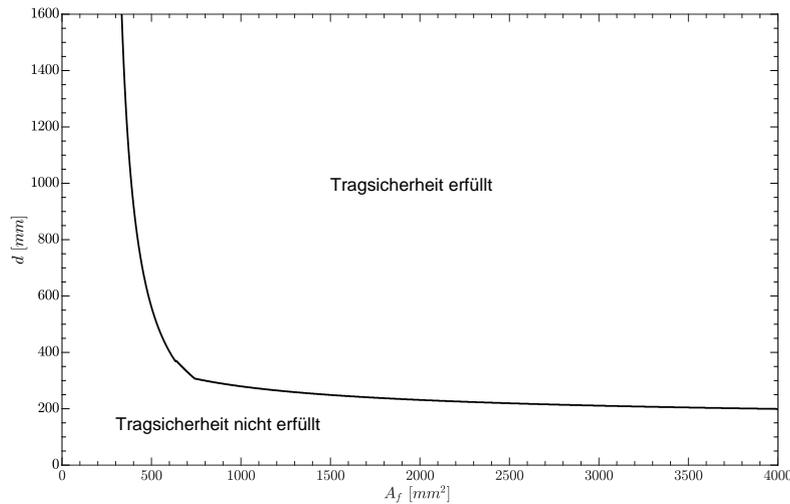


Abb. 4.1: Biege­widerstand

4.3.2 Ausgeglicherer Bewehrungsgrad

Die Gerade des ausgeglichenen Bewehrungsgrades stellt die Bewehrungsfläche und statische Nutzhöhe dar, bei der rechnerisch gleichzeitig Beton- und Bewehrungsversagen eintritt. Damit werden beide Materialien rechnerisch voll ausgenutzt. Die Gerade trennt die Biegungs-Kurve in zwei Bereiche: links von der Gerade tritt FRP-Versagen auf, rechts von der Gerade Betonversagen. Der ACI 440 2015 empfiehlt, die Bemessung auf ein Betonversagen auszulegen und FRP-Versagen zu vermeiden, da FRP-Bewehrung nicht fließt und das Versagen hier plötzlich auftreten würde (Abbildung 4.2).

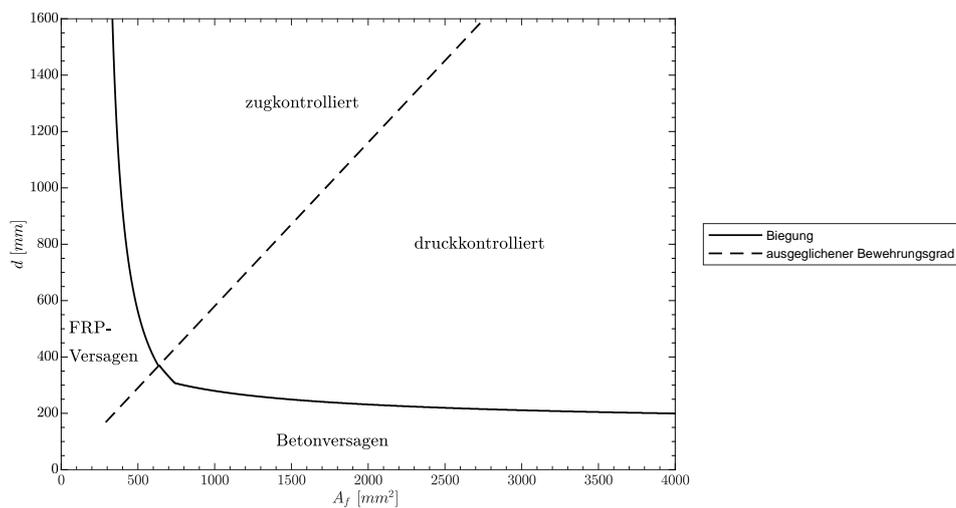


Abb. 4.2: ausgeglicherer Bewehrungsgrad

4.3.3 Durchbiegung

Die Begrenzung der Verformung wird durch eine Kurve dargestellt, die sich bei dem jeweiligen Verhältnis der Bewehrungsfläche und statischen Nutzhöhe ergibt, bei dem die vorhandene Durchbiegung der maximalen Durchbiegung von $L/300$ entspricht. Neben der Biegung als ULS kann dieser Nachweis für die minimalen geometrischen Abmessungen maßgebend werden, so wie es in Abbildung 4.3 der Fall ist.

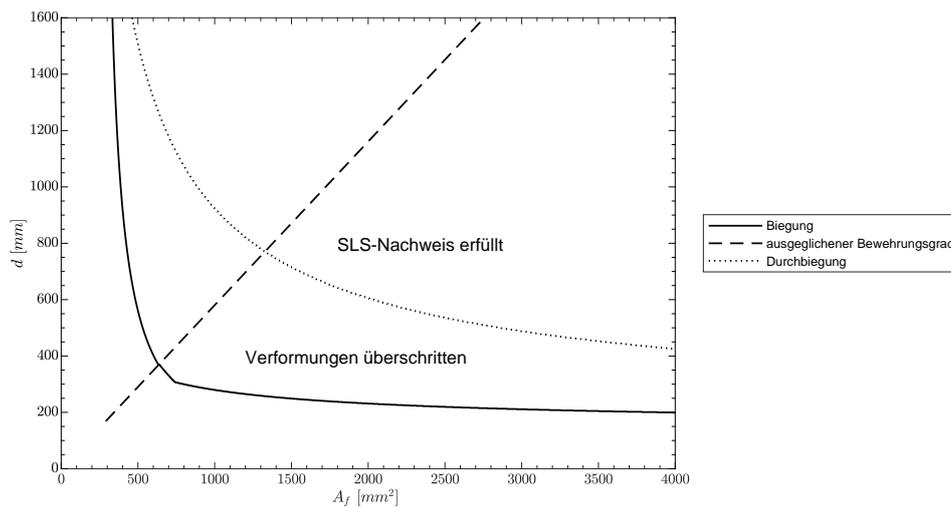


Abb. 4.3: Durchbiegungsbegrenzung

4.3.4 Treibhauspotenzial

Die Kurve des Global Warming Potentials (GWP) besteht aus der Summe der Potenziale des Betons und der Bewehrung. Der GWP des Betons ist in Kubikmetern angegeben, der GWP der Bewehrungen in kg. Für die Berechnung wurden die berechneten Wertepaare A_f und d aus der maßgebenden Bemessungskurve verwendet. Die Kurve stellt eine Aussage über die Umweltverträglichkeit dar. Der aus ökologischer Sicht optimale Punkt liegt bei dem Minimum dieser Kurve, da dort das Treibhauspotenzial am geringsten ist. Zur Verdeutlichung dieser Stelle wird dort eine vertikale Gerade hineingelegt (Abbildung 4.4).

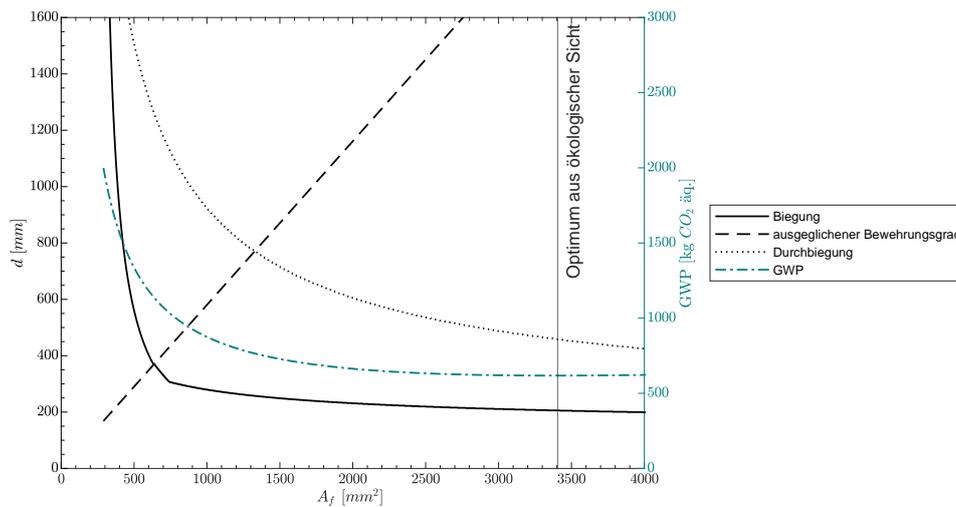
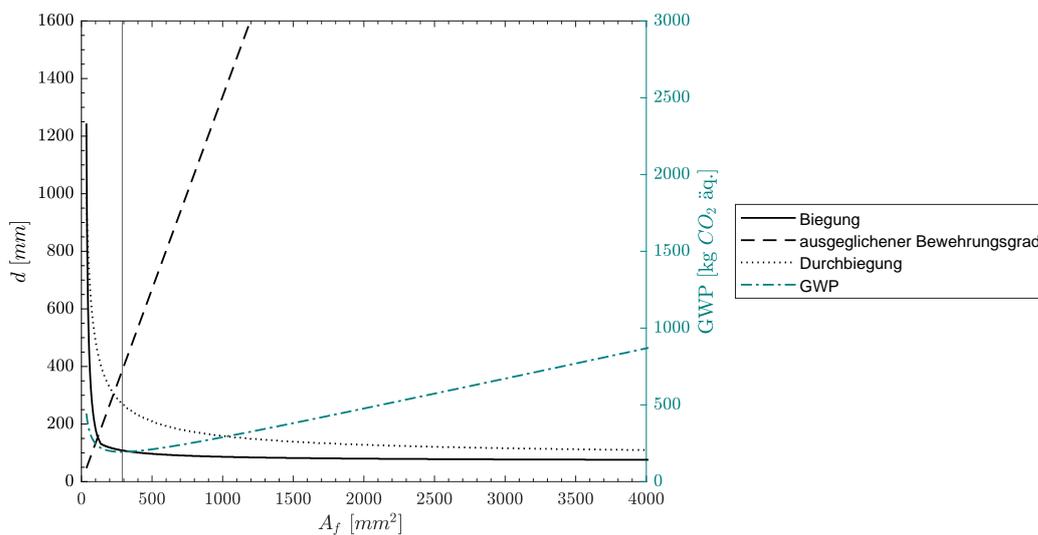


Abb. 4.4: Treibhauspotenzial GWP mit Markierung des Minimums

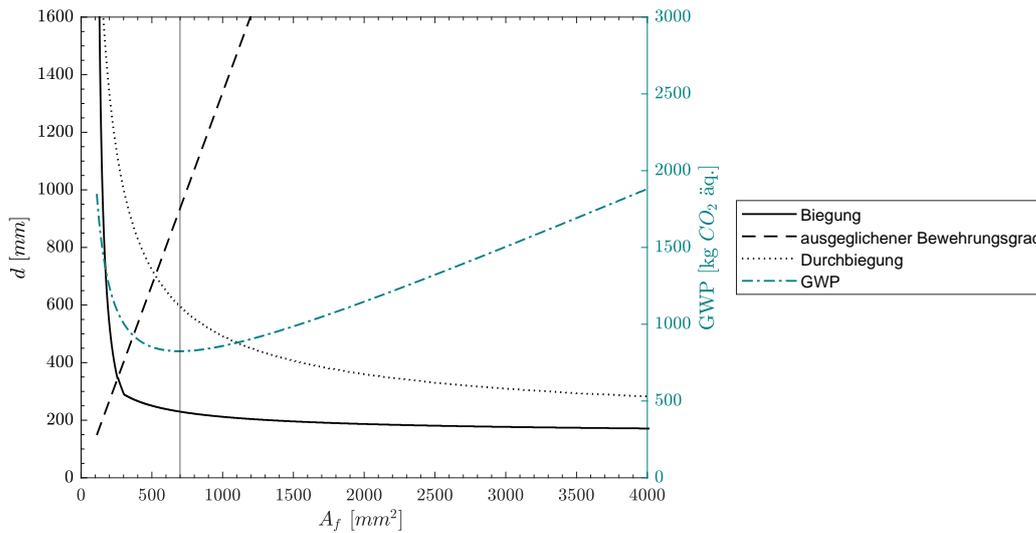
4.4 Analyse

4.4.1 Carbon FRP

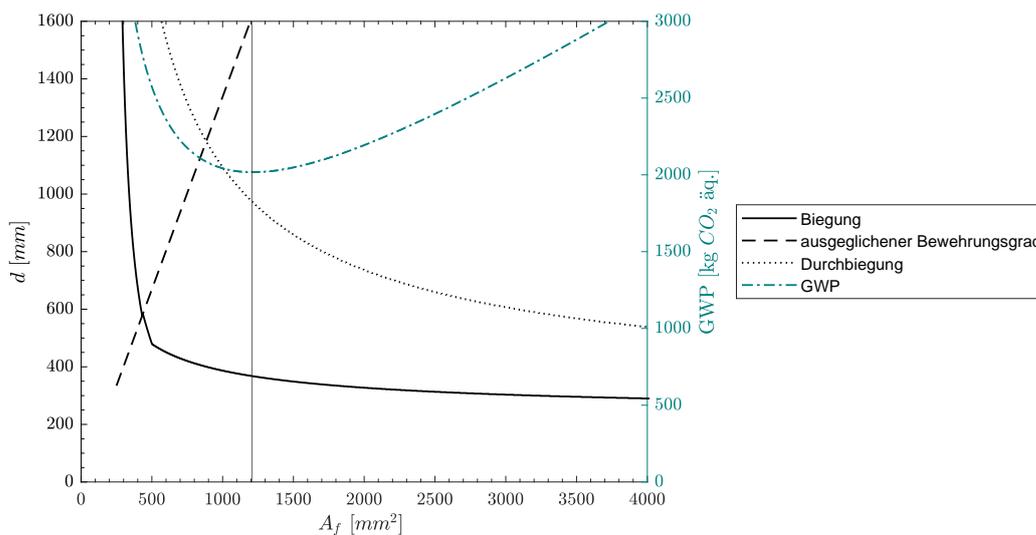
Carbon ist das Bewehrungsmaterial mit der höchsten Zugfestigkeit, was sich maßgeblich auf die Parameterstudie auswirkt. In Abbildung 4.5 sind die Ergebnisse dargestellt. Es besteht ein kleiner Bereich mit wenig Bewehrung, in der FRP-Versagen maßgebend ist und die Querschnittshöhe sehr hoch wird. Der größere Bereich stellt ein Betonversagen dar. Hier wird die Kurve des Biegewiderstands sehr flach, auch die Durchbiegung nähert sich mit steigender Bewehrungsfläche einer konstanten statischen Nutzhöhe an. Die Durchbiegung ist für alle Längen die maßgebende Bemessung. Mit steigender Trägerlänge werden die benötigte statische Nutzhöhe sowie die Bewehrungsfläche immer größer, die zugehörigen Kurven werden in dem betrachteten Bereich steiler. Da die Durchbiegung maßgebend ist, werden die Werte d und A_f dieser Kurve für die Berechnung des Treibhauspotenzials verwendet. Dieses steigt mit der Größe der Bewehrungsfläche und der Bauteillänge ebenfalls stark an. Die ökologisch optimalen Werte entfernen sich mit wachsender Bauteillänge immer stärker von den Werten der rechnerisch optimalen Materialausnutzung hin zu einem höheren Bewehrungsanteil mit einer geringeren Querschnittshöhe.



(a) Trägerlänge 5m



(b) Trägerlänge 10m



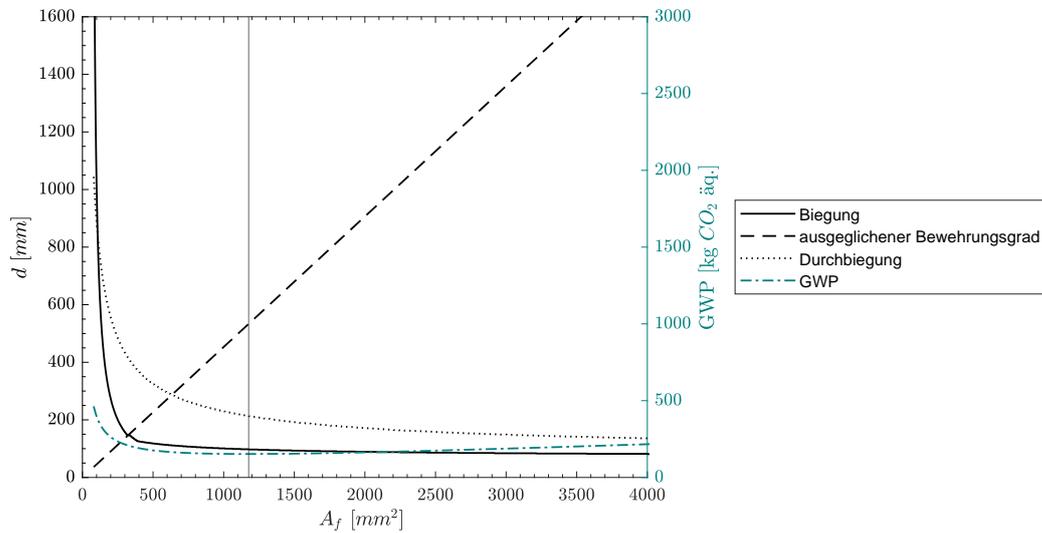
(c) Trägerlänge 15m

Abb. 4.5: Ergebnisse der Parameterstudie des Carbonträgers

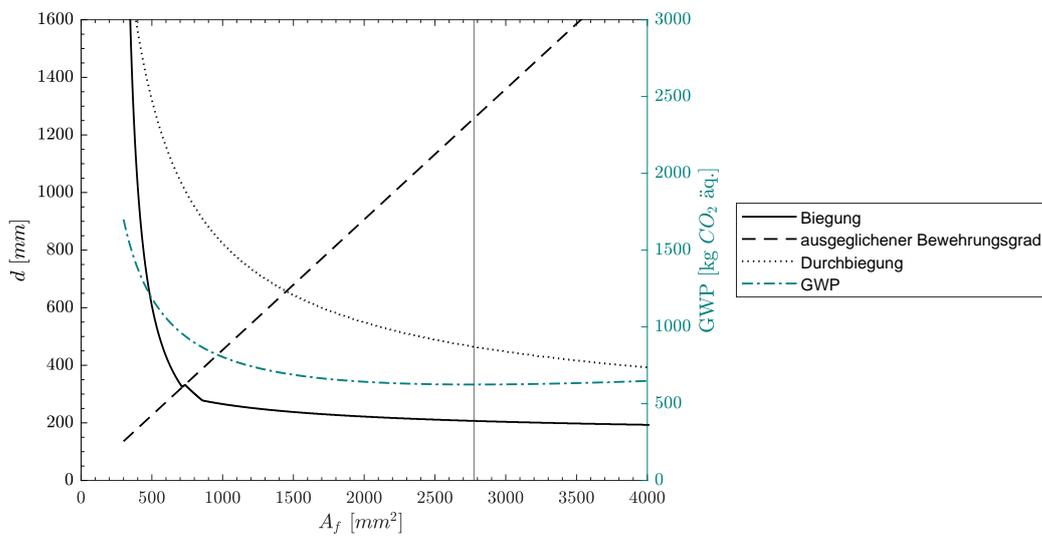
4.4.2 AR-Glas FRP

AR-Glas hat eine deutlich geringere Festigkeit als Carbon. Der Bereich, in dem FRP-Versagen auftritt, wird dadurch größer (Abbildung 4.6). Die Durchbiegung ist auch hier maßgebend für die Bemessung aller Trägerlängen. Die benötigten Abmessungen für den Biege- und Durchbiegungswiderstand wachsen mit steigender Trägerlänge linear an (siehe auch Abbildung 4.12). Das Treibhauspotenzial steigt mit der Trägerlänge und wird analog zur Durchbiegungskurve auch veränderlicher. Damit hat das Verhältnis von Bewehrungsfläche zu statischer Nutzhöhe bei einer großen Trägerlänge einen größeren Einfluss auf das geringste Treibhauspotenzial als bei der kurzen Trägerlänge. Die ökologisch optimalen Querschnittswerte liegen mit steigender Trägerlänge immer weiter im Bereich des Betonversagens mit einer verhältnismäßig großen Bewehrungsfläche

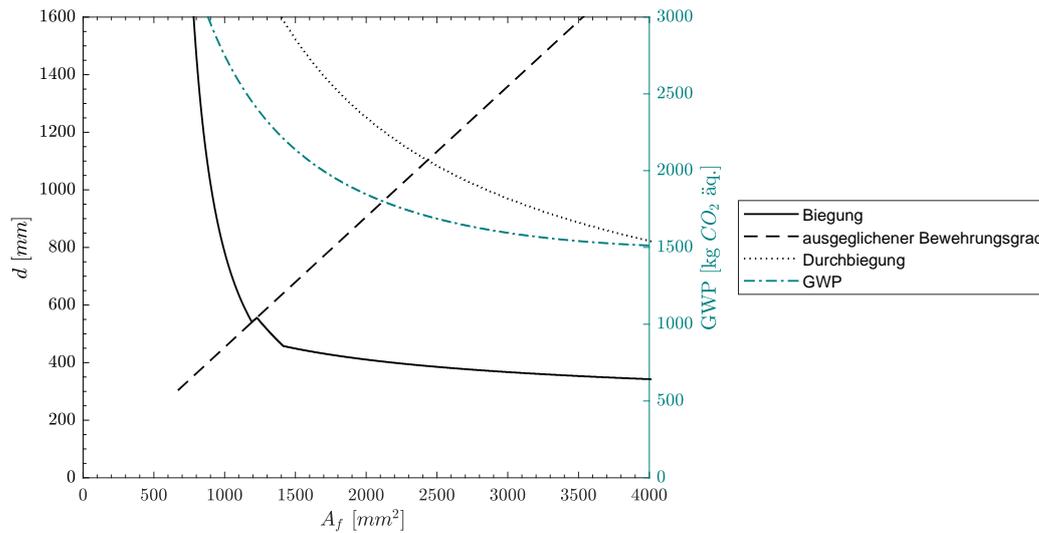
und kleiner Trägerhöhe. Für die Trägerlänge von 15 m liegt der optimale Wert außerhalb des dargestellten Bereichs bei einer Bewehrungsfläche von ca. 4800 mm².



(a) Trägerlänge 5m



(b) Trägerlänge 10m

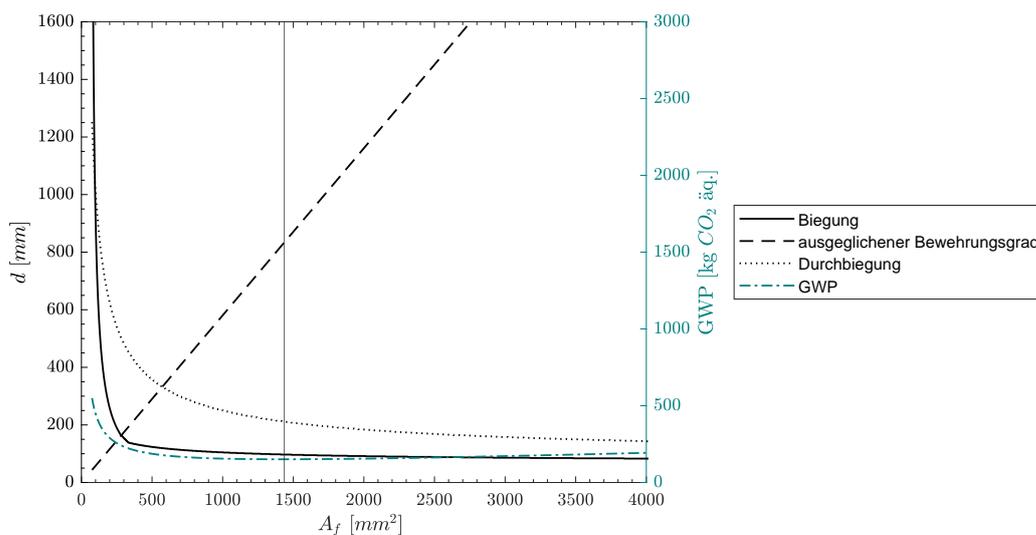


(c) Trägerlänge 15m

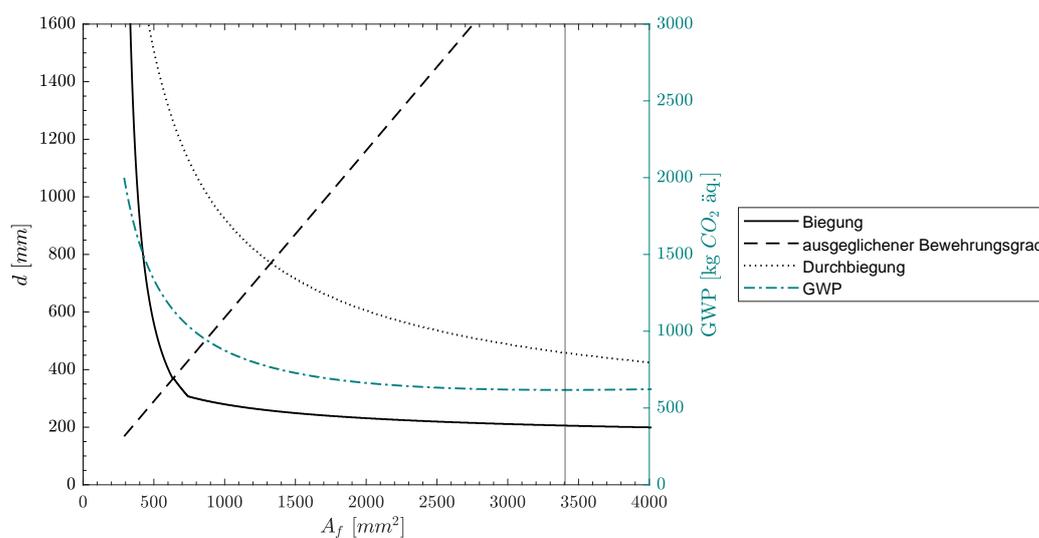
Abb. 4.6: Ergebnisse der Parameterstudie des AR-Glas-Trägers

4.4.3 Basalt FRP

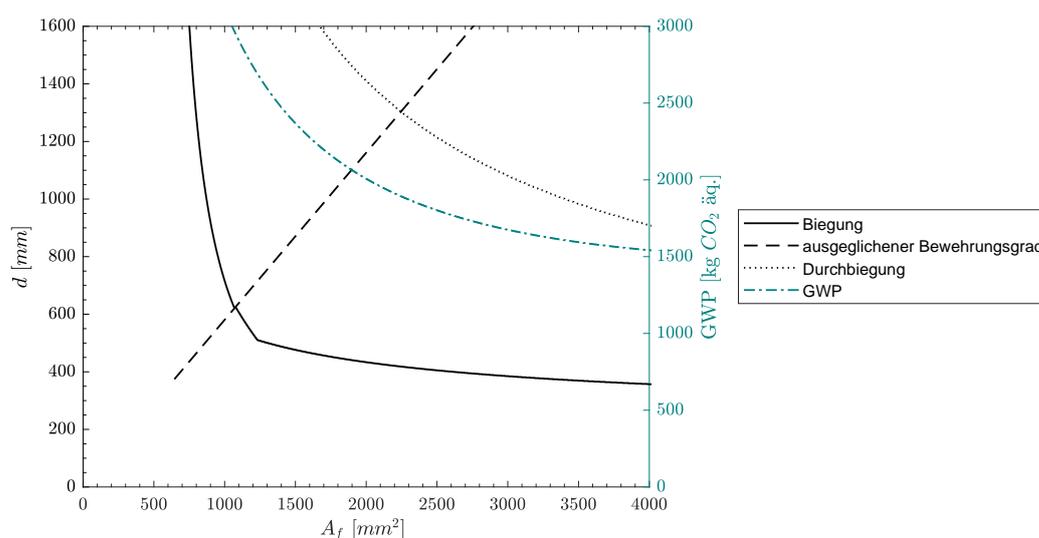
Basalt besitzt eine ähnliche Festigkeit wie AR-Glas, daher weisen die Ergebnisse auch starke Ähnlichkeiten auf (Abbildung 4.7). Allerdings ist Basalt umweltverträglicher. Für den Einfluss der Trägerlänge ergeben sich die gleichen Erkenntnisse wie bei Carbon und AR-Glas. Die Durchbiegung ist der maßgebende Nachweis für alle Längen. Das Treibhauspotenzial steigt und wird differenzieller mit steigender Trägerlänge. Der optimale Wert für das GWP liegt mit steigender Trägerlänge immer stärker in einem Bereich mit hohem Bewehrungsgehalt und niedriger Querschnittshöhe, sodass der optimale Wert für 15m auch hier außerhalb des Darstellungsbereiches liegt.



(a) Trägerlänge 5m



(b) Trägerlänge 10m

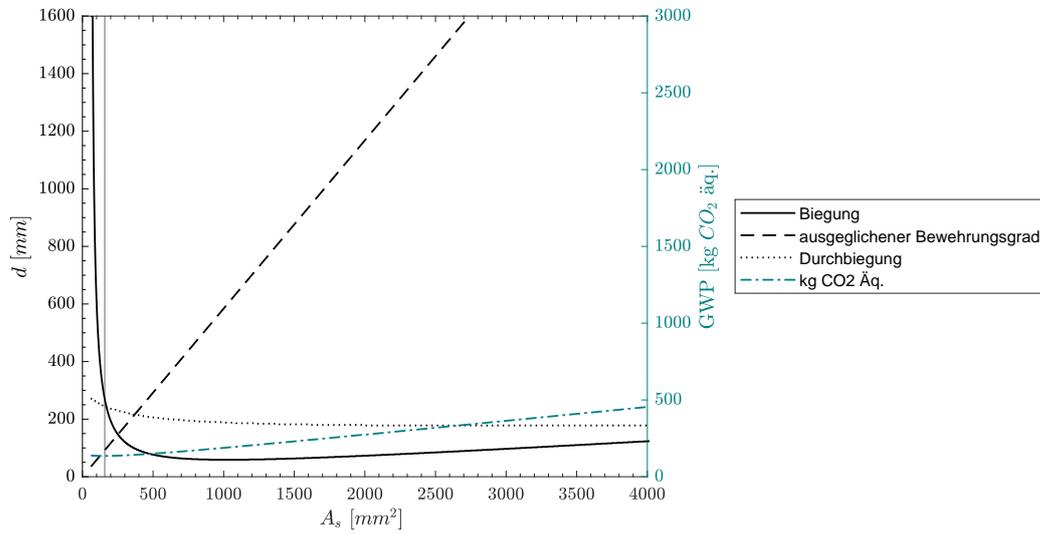


(c) Trägerlänge 15m

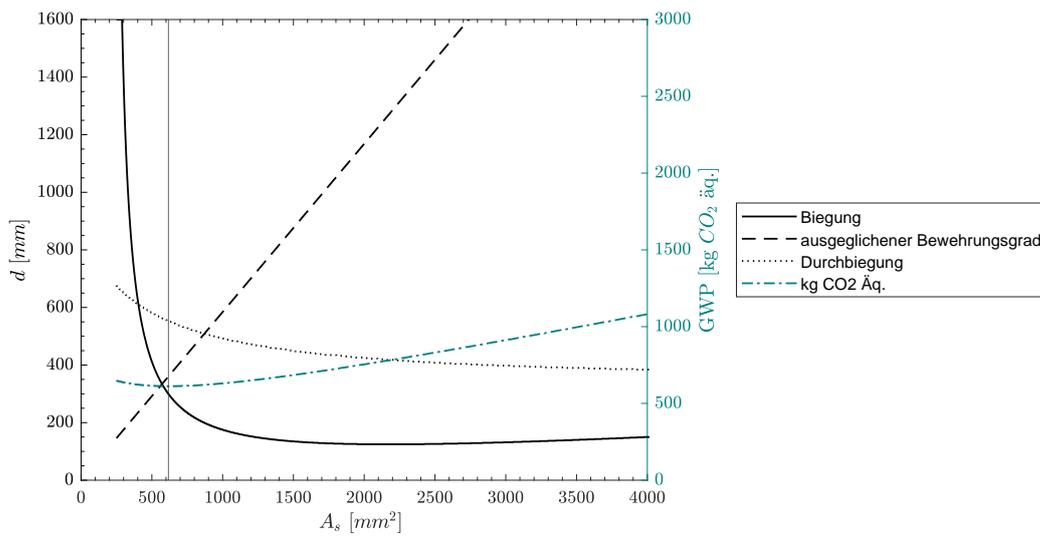
Abb. 4.7: Ergebnisse der Parameterstudie des Basalt-Trägers

4.4.4 Betonstahl

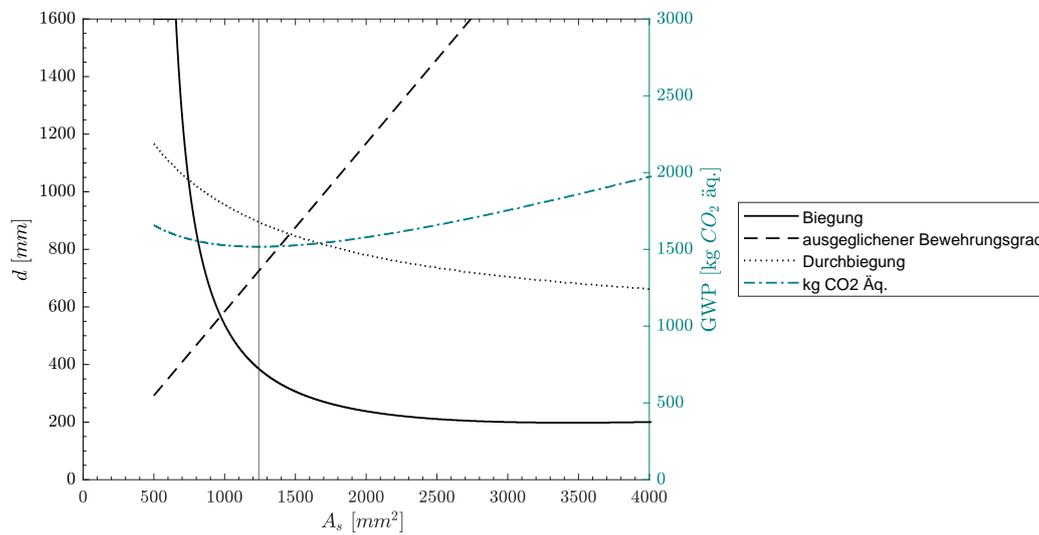
Der gängige Betonstahl weist grundsätzlich ähnliche Ergebnisse auf wie die nichtmetallischen Bewehrungen (Abbildung 4.8). Die beiden Versagensarten nehmen ähnlich große Bereiche ein. Die Berechnungen zeigen, dass die Durchbiegung für alle Längen die maßgebende Bemessung ist. Die ökologisch optimalen Werte, die mit den Werten der Durchbiegungskurve berechnet wurden, liegen nah im Bereich des ausgeglichenen Bewehrungsgrades, tendenziell in dem Bereich, wo Bewehrungsversagen eintritt. Hier sind also geringe Bewehrungsflächen und größere Trägerhöhen vorteilhaft.



(a) Trägerlänge 5m



(b) Trägerlänge 10m



(c) Trägerlänge 15m

Abb. 4.8: Ergebnisse der Parameterstudie des Betonstahl-Trägers

4.4.5 Vergleich der Bewehrungen

Für den Vergleich der verschiedenen Bewehrungsmaterialien (Abbildung 4.9) werden die Graphiken und Werte für eine Trägerlänge von 10 m herangezogen. Auffällig ist, dass die Steigung der Gerade des ausgeglichenen Bewehrungsgrades für Carbon am steilsten ist und der Bereich für Betonversagen damit am größten. Bei Carbon und Betonstahl befinden sich alle relevanten Stellen bzw. Schnittpunkte in einem Bereich mit geringer Bewehrungsfläche, während die Werte für Basalt und AR-Glas deutlich verteilter sind. Außerdem ist die Durchbiegungskurve für Stahl flacher als die anderen, was auf eine andere Berechnungsart des EC2 zurückzuführen ist. Das Treibhauspotenzial steigt bei Carbon mit steigender Bewehrungsfläche deutlich steiler an als bei den anderen Materialien und auch die Absolutwerte sind bei Carbon mit Abstand am größten (Minimum 824 vs. 611-624 kg CO₂ Äq der anderen Materialien; Tabelle 4.3).

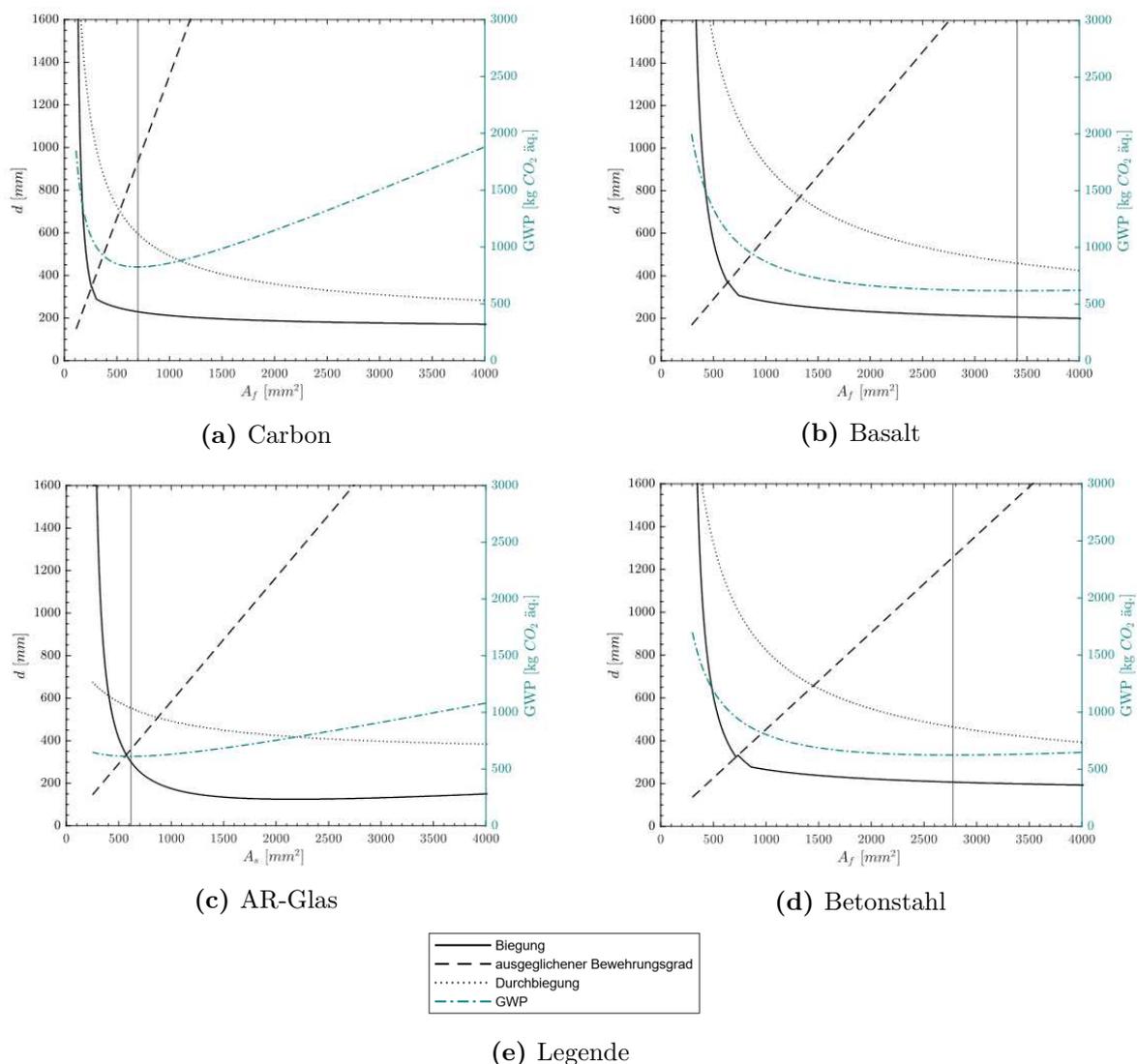


Abb. 4.9: Ergebnisse der Parameterstudie im Vergleich; verschiedene Bewehrungen bei 10 m Länge

In Tabelle 4.3 ist das Treibhauspotenzial aller Träger mit den unterschiedlichen Bewehrungen und Spannweiten zusammengefasst. Es verdeutlicht, dass die Träger mit Carbon ein deutlich

größeres Treibhauspotenzial aufweisen. Für eine genauere Betrachtung des Treibhauspotenzials der Träger wird in Abbildung 4.10 die jeweilige Menge GWP in ihre Anteile aus dem Beton und der Bewehrung gesplittet. Dabei wird deutlich, dass der Beton in jedem Fall den größeren Beitrag des Treibhauspotenzials liefert. In einem Vergleich zu AR-Glas- und Basaltträgern, die sehr ähnliche Werte aufzeigen, sind bei Carbonträgern die absoluten Mengen des Treibhauspotenzials für den Beton und den Carbon deutlich größer. Der Beitrag des Betonstahls zum Treibhauspotenzial des gesamten Träger ist im Vergleich zu den anderen Bewehrungen am niedrigsten.

Tab. 4.3: Vergleich GWP der Träger für alle Spannweiten und Bewehrungen

	GWP [kg CO ₂ – Äq]		
	5 m	10 m	15 m
CFRP	194	824	2017
GFRP	153	624	1498
BFRP	151	617	1490
Betonstahl	135	611	1516

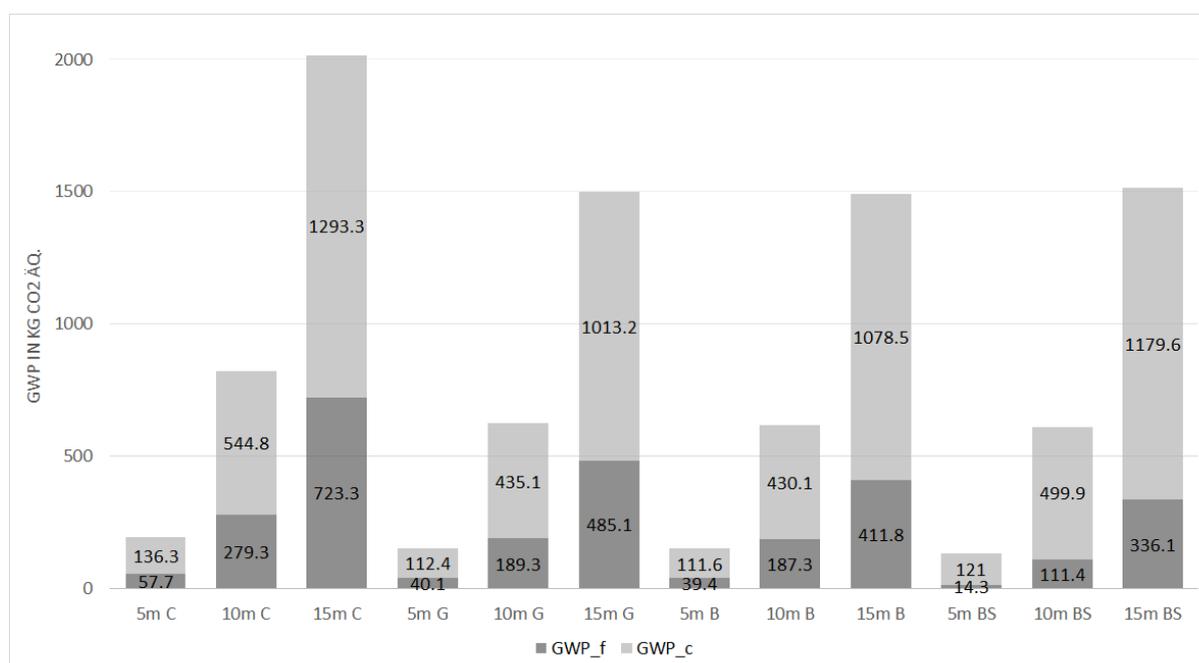


Abb. 4.10: Anteile aus Beton und Bewehrung an dem GWP;
C: Carbon, G: AR-Glas, B: Basalt, BS: Betonstahl

Die konkreten absoluten Werte für die optimale Bewehrungsfläche und zugehörige statische Nutzhöhe sind zum Vergleich in Abbildung 4.11 herausgearbeitet. Dabei wird der der Schnittpunkt der Biegekurve mit der Gerade des ausgeglichenen Bewehrungsgrades sowie der Schnittpunkt der Durchbiegungskurve mit der Gerade des ausgeglichenen Bewehrungsgrades für alle Materialien dargestellt, da hier sowohl die Bewehrung als auch der Beton rechnerisch ausgenutzt werden. Außerdem sind die Punkte mit dem jeweils niedrigsten GWP aufgetragen.

Dabei ist deutlich erkennbar, dass die Streuung der Werte zwischen den Bewehrungsmaterialien für die Biegung am geringsten ist und für das Treibhauspotenzial am größten. Für den Biege- und Durchbiegungswiderstand liegen die optimalen Werte der statischen Nutzhöhe im Bereich von 330 bis 375 mm, viel

größer sind hier die Unterschiede in der jeweiligen Bewehrungsfläche, was die unterschiedlichen Zugfestigkeiten deutlich macht. Mit 280 mm^2 benötigt Carbon am wenigsten, gefolgt von Stahl mit 580 mm^2 und Basalt mit 650 mm^2 . Die größte Fläche benötigt AR-Glas mit 750 mm^2 .

Bei den Werten der Durchbiegung wird deutlich, was neben den Zugfestigkeiten die unterschiedlichen Elastizitätsmodule für eine Auswirkung haben. Der Querschnitt mit Betonstahl, der den größten Elastizitätsmodul aufweist, benötigt im Vergleich die geringste statische Nutzhöhe mit 500 mm , gefolgt von AR-Glas mit 650 mm und Carbon mit 700 mm . Basalt benötigt mit 770 mm hier die größte statische Nutzhöhe. Noch unterschiedlicher sind die Bewehrungsflächen, die bei Carbon bei 550 mm^2 , bei Stahl bei 900 mm^2 , bei Basalt bei 1350 mm^2 und bei AR-Glas bei dem ca. dreifachen Wert von Carbon mit 1500 mm^2 liegen.

Die ökologisch optimalen Werte, die sich aus der Begrenzung der Verformungen ergeben, weisen für Basalt und AR-Glas deutlich größere Mengen Bewehrung auf als für Carbon und Stahl, die eine tendenziell größere statische Nutzhöhe benötigen. Die Ergebnisse in Abbildung 4.9 zeigen jedoch auch, dass die Kurven für das Treibhauspotenzial für Basalt und AR-Glas sehr flach sind und die Werte sich damit wenig unterscheiden. Deutlich kleinere Bewehrungsflächen (ca. -1000 mm^2) sind dadurch mit nur minimal größerem Treibhauspotenzial verbunden. Die optimalen Werte von Carbon und Betonstahl sind aufgrund der deutlich steileren Kurven dezidiert.

Die hineingelegte Gerade, die ein 1:1 Verhältnis von Bewehrungsfläche zu statischer Nutzhöhe darstellt, verdeutlicht außerdem, dass nur die Werte für Carbon unter diesem Verhältnis liegen. Hier ist die Größe der Bewehrungsfläche in einem Verhältnis 4:5 geringer als die statische Nutzhöhe. Bei allen anderen Bewehrungen ist die Bewehrungsfläche im Verhältnis deutlich größer. Je weiter sich die Werte von der Gerade entfernen, desto unausgeglichener wird das Verhältnis dieser Größen.

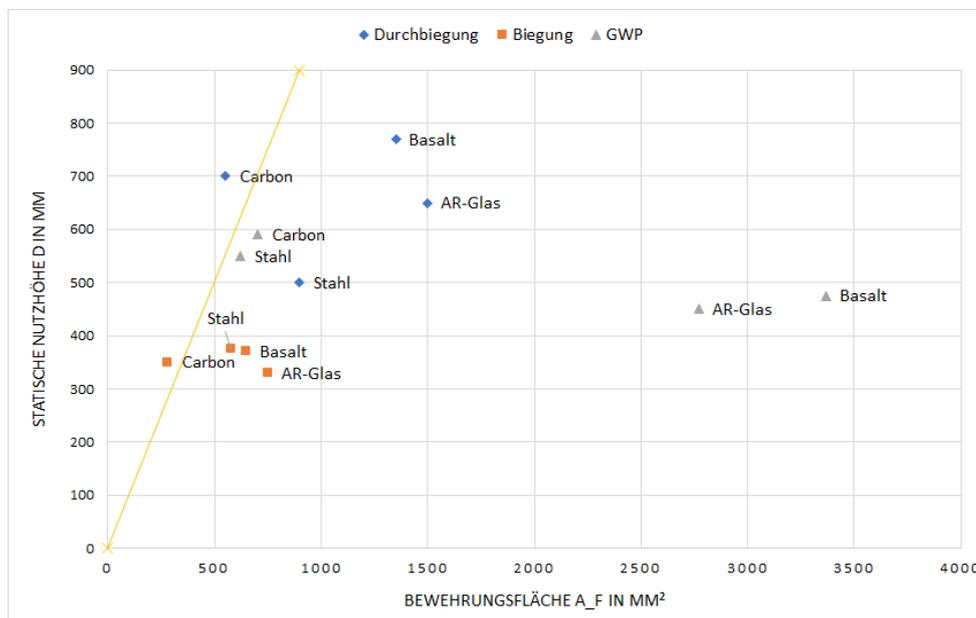


Abb. 4.11: Vergleich markanter Punkte aus den Ergebnissen der Parameterstudie für 10 m Trägerlänge

In Abbildung 4.12 sind zusätzlich die markanten Ergebnisse aller Längen von Carbon und AR-Glas dargestellt. Dabei wird deutlich, dass das Verhältnis von A_f zu d mit steigender Länge näherungsweise linear wächst. Die Steigung der Geraden ist dabei für den Biege widerstand und die Durchbiegung des jeweiligen Materials gleich. Diese sind für Carbon am steilsten, womit

nochmals zu erkennen ist, dass das Verhältnis von Bewehrungsfläche zu statischer Nutzhöhe am geringsten ist. Entsprechend wird hier anteilig am wenigsten Bewehrungsfläche benötigt. Für die optimalen Werte des Treibhauspotenzials wird dieses Verhältnis für Carbon etwas größer, gefolgt von den Geraden des Biege widerstands und der Durchbiegung von AR-Glas. Das Verhältnis von Bewehrungsfläche zu statischer Nutzhöhe ist für den Wertebereich des geringsten Treibhauspotenzials für AR-Glas am größten.

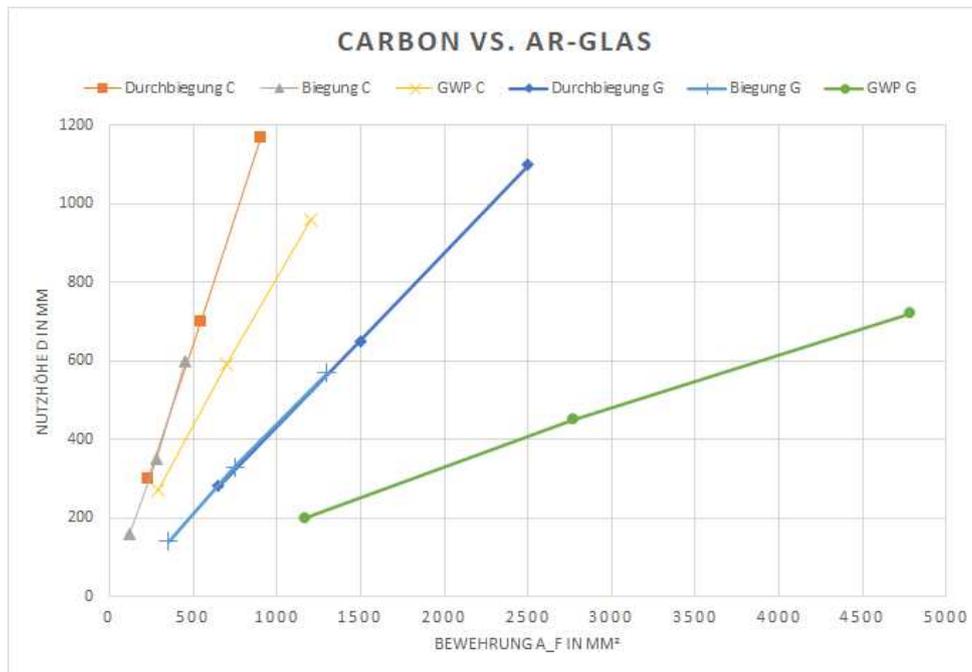


Abb. 4.12: Vergleich der Ergebnisse von Carbon - AR-Glas aller Trägerlängen

4.4.6 Interpretation und Optimierungsansätze

Obwohl die hohen Zugfestigkeiten von FRP-Bewehrung ein großes Potenzial besitzen, konnte bezogen auf die Bemessung kein wesentlicher Vorteil gegenüber Betonstahl erzielt werden. Dies ist einerseits auf die geringen Elastizitätsmodule, andererseits auf die Sicherheitsbeiwerte des ACI 440 2015 zurückzuführen. Mit der Durchbiegung als maßgebenden Nachweis für alle Bewehrungsmaterialien findet keine Materialausnutzung statt. Die Querschnittsabmessungen müssen größer sein, als für die Tragfähigkeit notwendig. Um diese Problematik zu lösen, kann eine Vorspannung der Träger erfolgen. Durch einen Mehrfeldträger kann ebenso bei langen Trägern die Durchbiegung verringert werden. Dabei ist zu beachten, dass keine Umverteilung der Schnittgrößen wie im Stahlbetonbau erfolgen kann. Durch eine Querschnittsoptimierung hin zu einem T-Querschnitt kann außerdem Material und Gewicht eingespart werden, was sich sowohl auf die Durchbiegung, als auch auf das Ressourcensparen und Treibhauspotenzial positiv auswirkt. Wenn die Durchbiegung einen geringeren Einfluss auf die Bemessung hat, ergibt sich ein größeres Potenzial für die schwächeren Bewehrungen AR-Glas und Basalt, die bei dem Biege widerstand näher an den Werten von Carbon und Stahl liegen. Aufgrund ihres geringeren Treibhauspotenzials kann die größere Menge Bewehrung, die hier benötigt wird, gerechtfertigt werden. Weiterhin sind die Kurven des Biege widerstands auf der Seite des Betonversagens flacher als die für die Durchbiegung. Damit besitzen die optimalen Querschnittswerte für die Biegebemessung eine größere Spannbreite. Kurze Trägerlängen haben ebenso einen positiven

Einfluss auf die Querschnittswerte. Mit der Trägerlänge steigen die benötigten Abmessungen linear an.

Der Beitrag des Betons zum entstehenden Treibhauspotenzial ist deutlich größer als der Beitrag der Bewehrung. Da die FRP-Bewehrungen inert sind und somit kein basisches Milieu zum Schutz vor Korrosion notwendig ist, kann weiterhin die Betonzusammensetzung dahingehend optimiert werden, dass der Klinkeranteil, der größtenteils für die hohen Treibhausgas-Emissionen verantwortlich ist, reduziert wird.

Carbon hat einerseits durch seine hohe Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul das größte Potenzial auf Seiten der Tragfähigkeit, bringt gleichzeitig aber auch das größte Treibhauspotenzial mit sich. Hier kann die Untersuchung gemäß Abbildung 4.5 eine große Unterstützung zur optimalen Auswahl der Nutzhöhe sowie der Bewehrungsfläche sein.

AR-Glas und Basalt hingegen haben ein geringeres Treibhauspotenzial, sodass recht große Mengen Bewehrung mit einer verhältnismäßig kleinen Nutzhöhe (Zementersparung) vorteilhaft sind. Aufgrund ihrer im Vergleich zu Carbon geringeren Dauerhaftigkeit wurden ihre ohnehin geringeren Zugfestigkeiten nach den Vorschriften des ACI 440 2015 stärker abgemindert (mit C'_E), was eine Materialausnutzung schwierig macht.

Kapitel 5

Zusammenfassung

Nichtmetallische Faserverbundkunststoffe bestehen in der Regel aus Hochleistungsfasern wie z.B. Carbon-, AR-Glas, Basalt- oder Aramidfasern umgeben von einer Kunststoffmatrix. Sie sind weitestgehend beständig gegen Korrosion, besitzen hohe Zugfestigkeiten und haben materialabhängig weitere vorteilhafte Eigenschaften.

International gibt es verschiedene Regelwerke zum Einsatz nichtmetallischer Faserverbundkunststoffe als Bewehrung im Betonbau (Kapitel 2), die unterschiedlich aktuell und differenziert sind. Vor allem die US-amerikanischen (ACI 440 2015; AASHTO 2018) und kanadischen Regelwerke (CSA 2012; CSA 2019) binden den Stand der Kenntnisse in neue Auflagen mit ein. Die Bemessungsvorschriften haben Ähnlichkeiten zum Eurocode und unterscheiden sich hauptsächlich bei empirischen Formeln und Grenz- bzw. Sicherheitsbeiwerten. Bei der Bemessung ist zu beachten, dass nichtmetallische Bewehrungen nicht fließen sondern spröde brechen. Daher wird empfohlen, die Bauteile auf Betonversagen auszulegen. Außerdem kann eine Umlagerung wie im Stahlbeton nicht erfolgen, was bei der Bemessung und Wahl des statischen Systems zu beachten ist. Hohe Sicherheitsbeiwerte sollen diese Besonderheiten einbeziehen. Das kann allerdings unwirtschaftliche Ergebnisse liefern oder zu anderem Bauteilverhalten führen als ausgelegt.

In Kapitel 3 wird anhand eines einfachen Beispiels eines Einfeldträgers mit rechteckigem Querschnitt die Bemessung nach dem ACI 440 2015 aufgezeigt, da diese in Kapitel 4 als Grundlage für die Parameterstudie dient. Damit wird das Einsatzpotenzial ausschließlich für balkenartige Träger untersucht. In der Parameterstudie werden der Biege- und Torsionswiderstand, die Durchbiegung und das Treibhauspotenzial in Abhängigkeit von Bewehrungsfläche und zugehöriger statischer Nutzhöhe sowie der Trägerlänge untersucht. Dafür werden Carbon, AR-Glas, Basalt und Betonstahl als Bewehrungsmaterial eingesetzt. Für alle Materialien und Trägerlängen ergibt sich, dass die Begrenzung der Verformung den maßgebenden Nachweis darstellt. Damit ist rechnerisch keine vollständige Materialausnutzung gegeben. Mit der Länge steigen die mindestens benötigten Abmessungen der Bewehrungsfläche und statischen Nutzhöhe linear an.

Carbon bringt für die Nachweise der Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit mit einer viermal größeren Zugfestigkeit als Betonstahl die besten Eigenschaften mit. Dementsprechend sind die notwendigen Bewehrungsflächen und Nutzhöhen am geringsten. Gleichzeitig ist es das Bewehrungsmaterial mit dem größten Treibhauspotenzial. Die optimalen Querschnittswerte mit dem geringsten Treibhauspotenzial weisen tendenziell größere Bewehrungsflächen und kleinere statische Nutzhöhen auf, als die Querschnittswerte, die eine vollständige Materialausnutzung von Beton und Bewehrung darstellen.

Dem entgegen stehen die etwa vergleichbaren Materialien AR-Glas und Basalt, wobei letzteres umweltfreundlicher ist, die deutlich geringere Zugfestigkeiten und Elastizitätsmodule als Carbon aufweisen sowie über die Zeit weniger dauerhaft sind. Damit sind für die Nachweise größere Mengen Bewehrung und eine größere statische Nutzhöhe notwendig. Der wesentliche Vorteil dieser Bewehrungen liegt in ihrem weitaus kleineren Treibhauspotenzial. Trotz größerer benötigter Bewehrungsmengen ist dieses geringer als bei Carbon. Außerdem sind sie preiswerter und besitzen eine höhere Verfügbarkeit, was für die Einsatzwahl ebenso eine Rolle spielt.

Damit stehen sich zwei wesentliche Komponenten gegenüber: Die Leistung und das ökologische Wirken. Grundsätzlich vereinen die nichtmetallischen Bewehrungen ihre Beständigkeit gegen Korrosion. Alle besitzen das Potenzial, als tragfähige Bewehrungen einsetzbar zu sein. Als Hochleistungsmaterial ist Carbon am besten geeignet, hier genügen geringe Mengen und kleine Bauteilhöhen für starke Träger aus. AR-Glas und Basalt können mit entsprechenden Mengen Bewehrung genauso einsetzbar sein.

Darüber hinaus können verschiedene Optimierungsansätze aus den bestehenden Ergebnissen zu noch größerem Einsatzpotenzial führen. Dazu gehören eine Querschnittsoptimierung hin zu einem schlanken T- oder I-Querschnitt, der eine gewisse statische Nutzhöhe mitbringt, durch weniger Material und Gewicht Lastvorteile aufweist sowie Ressourcen und damit Treibhauspotenzial einspart. Dass die Durchbiegung maßgebend für die Bemessung ist, zeigt außerdem, dass das Material in seiner Tragfähigkeit nicht ausgenutzt wird. Durch eine Vorspannung kann dem entgegengewirkt werden. Die Wahl eines Durchlaufträgers als statisches System kann bei großen Längen für die Durchbiegung ebenfalls vorteilhaft sein. Dabei ist lediglich zu beachten, dass keine Umlagerung stattfinden kann. Außerdem ist zu bedenken, dass die Bemessung nach den Regeln des ACI 440 2015 erfolgte, der Sicherheitsbeiwerte konservativer als vergleichbare Richtlinien auslegt. Diese sind weiterhin nicht für Vorspannung gedacht. Regelungen zu vorgespannten nichtmetallischen Bewehrungen finden sich beispielsweise in CSA 2012.

Der Anteil des Betons an den Treibhausgas-Emissionen der untersuchten Träger ist deutlich größer als der Anteil der Bewehrung. Aufgrund der inerten Eigenschaften der nichtmetallischen FRP-Bewehrungen könnte außerdem die Betonzusammensetzung hinsichtlich des Klinkeranteils optimiert werden.

Schlussendlich ist der große Vorteil der nichtmetallischen Bewehrungen gegenüber Betonstahl ihre Beständigkeit gegen Korrosion, sowie andere Eigenschaften wie z.B. nicht leitfähig zu sein. Auf Seiten der Bemessung weist Carbon leichte Vorteile gegenüber dem gängigen Betonstahl auf, jedoch werden diese durch das höhere Treibhauspotenzial relativiert. Die Ergebnisse zeigen das Potenzial, dass die FRP-Bewehrungen mitbringen, jedoch sind Optimierungen notwendig, um ihre Vorteile auszunutzen und eine große ökologische Wirkung mit dem Einsparen von Treibhausgasemissionen und Ressourcen hervorzurufen.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Anhang A

Berechnungen der Parameterstudie mit MATLAB

Parameterstudie für FRP-Bewehrung

```

clear all
clc
close all
% Berechnung mit Brute-Force-Methode
% Berechnung nach ACI 440

%% Eingangsparameter

%Beton
f_c = 50; % charakt. Betondruckfestigkeit in N/mm2 (C50/60)
epsilon_cu = 0.003; % max. Betonstauchung nach ACI
beta_1 = 0.65; % Faktor zur Abmind. des ausgeglichenen
% Bewehrungsgrad, abhängig von Betonfestigkeit

E_c = 37000; % E-Modul Beton in N/mm2
gwp_c = 335; % kg CO2-Äq. pro m3 Beton

%FRP Bewehrung (längs) Carbon Werte solidian
f_ful = 2100; % charakt. Zugfestigkeit (längs) in N/mm2
epsilon_f = 0.018; % charakt. Bruchdehnung
E_f = 162000; % E-Modul FRP in MPa
r_b = 6; % Biegeradius der FRP-Bewehrung in mm
d_b = 10; % Durchmesser der Bewehrungsstäbe in mm
rho_frp = 2.2*10^-6; % Rohdichte in kg/mm3 von 2200 kg/m3
gwp_frp = 18.16; % kg CO2-Äq pro kg Bewehrung

%FRP Bewehrung (längs) AR-Glas solidian Matte (DM4) -10%
f_ful = 990; % charakt. Zugfestigkeit (längs) in N/mm2
epsilon_f = 0.041; % charakt. Bruchdehnung
E_f = 65700; % E-Modul FRP in MPa
r_b = 6; % Biegeradius der FRP-Bewehrung in mm
d_b = 10; % Durchmesser der Bewehrungsstäbe in mm
rho_frp = 2.2*10^-6; % Rohdichte in kg/mm3 von 2200 kg/m3 (*10^-9)
gwp_frp = 3.1; % kg CO2-Äq pro kg Bewehrung

%FRP Bewehrung (längs) Basalt Werte solidian DM 10
f_ful = 1050; % charakt. Zugfestigkeit (längs) in N/mm2
epsilon_f = 0.024; % charakt. Bruchdehnung
E_f = 55000; % E-Modul FRP in N/mm2
r_b = 6; % Biegeradius der FRP-Bewehrung in mm
d_b = 10; % Durchmesser der Bewehrungsstäbe in mm
rho_frp = 2.2*10^-6; % Rohdichte in kg/mm3 von 2200 kg/m3 (*10^-9)
gwp_frp = 2.5; % kg CO2-Äq pro kg Bewehrung

%Querschnitt
b = 250; %Breite in mm
c_c = 38; %Betondeckung in mm, Umrechnung von 1,5 in. aus Bsp. 1 ACI

%statisches System: Einfeldträger
l = 15; % Länge in m

% Rissbreitenbeschränkung
w = 0.7; % max. Rissbreite in mm
k_b = 1.4; % Verbundverhalten

%% Sicherheitsbeiwerte

C_E = 0.9; % C_E ist der Umweltreduktionsfaktor,
% Carbon Erde und Wetter ausgesetzt: 0.9
% AR-Glas (Basalt) Erde und Wetter ausgesetzt: 0.7

```

```

f_fu = C_E*f_fu1;           %Design-Bruchfestigkeit
epsilon_fu = C_E*epsilon_f; %Design-Bruchdehnung

%% Berechnungen Biegung

% Eingangswerte für Schleifen
n = 1;           % Schrittweite
mn = 35;        % C:(35 bei 5m, 111 bei 10m, 250 bei 15m)
                % B: 75 bei 5m, 290 bei 10m, 645 bei 15m
                % G: 80 bei 5m, 300 bei 10m, 670 bei 15m
m = 5000;       % Max Bewehrungsfläche
tx = (m-mn)/n;  % Anzahl Schritte

% Initialisieren der Vektoren
d_vekt = zeros(tx+1,1); %Initialisieren der stat. Nutzhöhe
d_rho = zeros(tx+1,1);  %Initialisieren des Vektors,
                        %d für ausgeglichenen Bewehrungsgrad rho_fb

A_fv = mn:n:m;        % Initialisieren der Bewehrungsfläche
A_fv = A_fv';         % Transponieren
Ve = zeros(tx+1,1);  % Initialisieren, Vektor zum Eintragen der Versagensart
Vel = zeros(tx+1,1);

rho_fb = 0.85 * beta_1 * (f_c/f_fu) * (E_f*epsilon_cu)/ ...
        (E_f*epsilon_cu + f_fu); % ausgeglichener Bewehrungsgrad

for j = 1:tx % Bewehrungsfläche variabel

    A_f = A_fv(j,1); % Zuordnung Bewehrungsfläche

% d variabel

% Eingangswerte Schleife d
d_v = 1:1:2600; % Schrittweite und max. d
d_v = d_v';    % Transponieren
o = 2600/1;    % Schritte

% Initialisieren
phi_M_n1 = zeros(o,1); % abgeminderter Momentenwiderstand
M_d1 = zeros(o,1);    % Design-Moment

%Berechnung
d_rho(j) = A_f ./ (b .* rho_fb); % Gerade für ausgeglichenen
                                % Bewehrungsgrad

% innere for-Schleife
for i = 1:o % d variieren

    d = d_v(i,1); % d zuordnen

    h = d + c_c + 12.5 + d_b/2 ; % Höhe des Querschnitts in mm

% Einwirkung (ULS und SLS)

g1_ck = b.*h.*10.^-6 .* 25; % charakt. Eigengewicht in kN/m
q1_ck = 10 * b * 10.^-3;   % charakt. Nutzlast (Linienlast)
                            % mit 10 kN/m² in kN/m

```

```

g1_d = 1.2*g1_ck;           % Design Eigengewicht in kN/m
q1_d = 1.6*q1_ck;           % Design Nutzlast in kN/m
M_d = (g1_d + q1_d) * l.^2 / 8; % einwirkendes Designmoment in kNm

M_d1(i)= M_d;

rho_f = A_f / (b*d);        % vorhandener Bewehrungsgrad

% Biege widerstand berechnen - abhängig von Bewehrungsgrad

if rho_f > rho_fb           % Betonversagen
    Ve(i) = 2;              % Zuordnung Versagensart Nr. 2
    % Spannung in Längsbewehrung
    f_f = ( ( E_f*epsilon_cu)^2 / 4 + 0.85*beta_1*f_c/rho_f * E_f ...
    * epsilon_cu )^0.5 - 0.5 * E_f * epsilon_cu ); % <= f_fu

    a = A_f * f_f / (0.85*f_c*b);           %Druckzonenhöhe
    M_n = A_f*f_f * (d- a/2 ) *10^-6;       % Momentenwiderstand in kNm
end

if rho_f < rho_fb          % FRP-Versagen
    Ve(i) = 1;             % Zuordnung Versagensart Nr. 1
    c_b = (epsilon_cu / (epsilon_cu + epsilon_fu) ) *d;
    M_n = A_f*f_fu*(d - beta_1 * c_b/2 )*10^-6; % Momentenwiderstand
end

% Teilsicherheitsbeiwert phi
rho_fb_14 = 1.4* rho_fb;

if rho_f < rho_fb
    phi = 0.55;
elseif rho_f > rho_fb_14
    phi = 0.65;
else
    phi = 0.3 + 0.25 * rho_f / rho_fb;
end

phi_M_n = phi * M_n; % abgeminderter Momentenwiderstand
phi_M_n1(i) = phi_M_n;

end

phi_Mn_id = min(abs(phi_M_n1 - M_d1 )); % Minimales Widerstandsmoment
[~, Zeile]= min(abs(phi_M_n1 - M_d1 )); % Zeile des min. M_n abrufen

d_M_id = d_v(Zeile); % Wert d aus Zeile abrufen
d_vekt(j)= d_M_id; % d speichern
Vel(j) = Ve(Zeile); % Versagensart speichern

end

%% Berechnungen Durchbiegung

% Eingangswerte Schleifen
nx = 1; % Schrittweite
mx = 5000; % Max Bewehrungsfläche
mnx = 35; % Min Bewehrungsfläche
t = (mx-mnx)/nx; % Anzahl Schritte

```

```

% Initialisieren von Vektoren
d_vektor = zeros(t+1,1); % statische Nutzhöhe
CO2_aeq = zeros(t+1,1); % Treibhauspotenzial

A_fv1 = mx:nx:mx; % Bewehrungsfläche
A_fv1 = A_fv1'; % Transponieren

for j = 1:t % Bewehrungsfläche variabel

    A_f = A_fv1(j,1); % Zuordnung Bewehrungsfläche

    % Randbedingungen für innere Schleife d

    d1 = 0:1:2600;
    d1 = d1';
    o = 2600/1;

    w_vorh = zeros(o+1,1); % Initialisieren der Durchbiegung

    for i = 1:o % d variabel

        d = d1(i,1); % d zuordnen

        h = d + c_c + 12.5 + d_b/2; % Querschnittshöhe h
        rho_f = A_f ./ (b.*d); % vorhandener Bewehrungsgrad
        n_f = E_f ./ E_c;
        k = sqrt(2.*rho_f .* n_f + (rho_f .* n_f).^2 ) - (rho_f .* n_f);
        I_cr = b.*d.^3 ./ 3 .* k.^3 + n_f.*A_f.*d.^2 .* (1-k).^2; % mm^4
        % Trägheitsmoment gerissener Querschnitt
        I_g = b.*h.^3 ./ 12; % Trägheitsmoment ungerissen, mm^4
        y_t = 0.5 .* b.*h;
        M_cr = 0.62 .* sqrt(f_c).*I_g ./ y_t ; % Rissmoment in Nmm
        M_cr2 = M_cr .* 10.^-6 ; % Rissmoment in kNm

        % Einwirkungen SLS
        g1_ck = b.*h.*10.^-6 .* 25; % charakt. Eigengewicht in kN/m
        q1_ck = 10 * b * 10.^-3; % charakt. Nutzlast 10 kN/m^2 in kN/m
        M_ck = (g1_ck + q1_ck) * 1.^2 / 8; % einwirkendes SLS-Moment in kNm

        % effektives Trägheitsmoment je nach Rissmoment
        if M_ck > M_cr2
            gamma = 1.72 - 0.72 .* (M_cr ./ (M_ck.*10.^6));
            I_e = I_cr ./ ( 1- gamma .* (M_cr ./ (M_ck.*10.^6)).^2 .* ...
                (1-I_cr./I_g) ); % effektives Trägheitsmoment in mm^4
        elseif M_ck < M_cr2
            I_e = I_g;
        end

        K = 1; % für "simple spans" einfach gespannt

        % Berechnung Durchbiegung
        w_vor = (K.*5.*M_ck.*10.^6 .* (1.*1000).^2 ) ./ (48.* E_c .* I_e );
        % sofortige Durchbiegung in mm
        xi = 2; % zeitabhängiger Faktor für Langzeitbelastung, Größtwert

        delta_cpsh = 0.6* xi *w_vor; % Durchbiegung in mm nach 5 Jahren
        w_vorh(i) = delta_cpsh; % Zuordnung Vektoreintrag- Durchbiegung
    end
end

```

```

w_zul = 1.*1000./300;           % zulässige Durchbiegung L/300

w_id = min(abs(w_vorh-w_zul)); % ideale Durchbiegung bei L/300
[~, Zeile]= min(abs(w_vorh-w_zul)) ; % Zeile für Durchbiegung abrufen

d_id = d1(Zeile);             % d aus Zeile abrufen
d_vektor(j)= d_id;           % d speichern

%Umweltfaktor GWP: Bewehrung pro kg + Beton pro m^3
CO2_aeq(j) = gwp_frp*(rho_frp*A_f*1*10^3)+ b*1* ...
(d_vektor(j)+c_c + 12.5 + d_b/2)*10^-6 * gwp_c; % kg CO2-Äq (Beton+FRP)

end

lCO2 = length(CO2_aeq)-1;

GWP_min = min(abs(CO2_aeq(1:lCO2,1)))           % minimales GWP
[~, Zeile]= min(abs(CO2_aeq(1:lCO2,1))) ;      % Zeile minimales GWP
A_f_GWP_min = A_fv1(Zeile);                    % Bewehrung min. GWP speichern

GWP_frp = gwp_frp*(rho_frp*A_f_GWP_min*1*10^3) % Anteil FRP an min. GWP
GWP_c = GWP_min - GWP_frp                     % Anteil Beton an min. GWP

%% Abbildung

% Bildgrößeneinstellungen
w=22; % Legende EastOutside: 21, ohne Legende 14
h=11;

% Achsenfarben
left_color = [0 0 0];
right_color = [0 .5 .5];

% Schriftgröße
f=10;

x1 = A_fv;
y1 = d;

% Bildeinstellungen
figure_header
set(fig , 'Units', 'centimeters', 'PaperUnits', 'centimeters', 'PaperSize', ...
[w h], 'PaperPosition', [0,0,w,h], 'Position', [10 10,w,h]);

% Plot
hold on
yyaxis left                               % linke y-Achse: d in mm
plot(A_fv, d_vekt, 'k', 'Linewidth', 1)   % Biege­wider­stand
plot(A_fv, d_rho, 'k--', 'Linewidth', 1)  % ausgeglichener Bewehrungsgrad
plot(A_fv1, d_vektor, 'k:', 'Linewidth', 1) % Durchbiegung

%txt = {'Betonversagen'};                % Text im Bild
%text(2000,1000,txt)
%txt2 = {'FRP-Versagen'};                % Text im Bild
%text(220,1500,txt2)

```

```

yyaxis right % rechte y-Achse GWP
plot(A_fv, CO2_aeq, '-.', 'Linewidth',1, 'Color', right_color) % GWP
xline(A_f_GWP_min) % vertikale Linie bei minimalem GWP

%plot(num2str(A_f_GWP_min),num2str(GWP_min),'s');
%text(A_f_GWP_min,GWP_min,num2str(A_f_GWP_min),...
% 'HorizontalAlignment','right',...
% 'VerticalAlignment','top');
%text(A_f_GWP_min,GWP_min,num2str(GWP_min),...
% 'HorizontalAlignment','left',...
% 'VerticalAlignment','top');
%plot(A_fv, d_CO2, 'k-.','Linewidth',1)

% Einstellung der Achsen
% axis([0 3000 0 1600])
% ax = gca
%set(ax,'Units','centimeter','FontSize',f)
%set(ax,'Position', p)
%ax.YAxis.Exponent = 2;

legend({'Biegung','ausgeglicherer Bewehrungsgrad', 'Durchbiegung','GWP' ...
}, 'Location','EastOutside'); % Legende

xlabel(['$A_{f}$ $[mm^2]$ ']); % x-Achsenbeschriftung

% linke y-Achse mit d in mm
yyaxis left
axis([0 4000 0 1600])
ax = gca;
set(ax,'Units','centimeter','FontSize',f, 'YColor', left_color)
ylabel('$d$ $[mm]$');

% rechte y-Achse mit GWP in kg CO2 äq
yyaxis right
axis([0 4000 0 3000])
ax = gca;
set(ax,'Units','centimeter','FontSize',f, 'YColor', right_color)
ylabel('GWP [kg $CO_{2}$ \ "aq.]');

% Abbildung Speichern

% fname = strcat('Kurve_l=5_B');
% fpath = 'D:\SOSE20\Diplomarbeit\Berechnungen_matlab\variable Größen';
% saveas(fig,fullfile(fpath, fname),'pdf');

```

Berechnungen der Parameterstudie für Betonstahl

```

clear all
clc
close all
% Berechnung mit Brute-Force-Methode
% Stahlbewehrung mit EC2

%% Eingangsparameter

% Beton
f_c = 50; % charakt. Betondruckfestigkeit in N/mm2
epsilon_cu = 0.0035; % max. Betonstauchung nach ACI
E_c = 37000; % E-Modul Beton in N/mm2
epsilon_cs = 2.9*10^-4; % Schwinddehnung
phi = 2; % Endkriechzahl
E_c_eff = E_c/(1+phi); % wirksames E-Modul (für Kriechverformung)
gwp_c = 335; % kg CO2-Äq. pro m3 Beton

% zur Berechnung des Spannungsblocks
lambda = 0.8;
nu = 1.0;

% Stahlbewehrung
f_yk = 550; % charakt. Zugfestigkeit in N/mm2
epsilon_f = 0.025; % max. Stahldehnung
E_f = 200000; % E-Modul Betonstahl in N/mm2
d_b = 10; % Durchmesser Bewehrungsstäbe in mm
rho_bs = 7850*10^-9; % Dichte in kg/mm3
gwp_bs = 2.3; % kg CO2-Äq pro kg Bewehrung

% Querschnitt
b = 250; % Breite in mm
c_nom = 40; % Betondeckung in mm, c_nom = 30 + 10

% statisches System: Einfeldträger
l = 15000; % Länge in mm

%% Sicherheitsbeiwerte

gamma_s = 1.15; % Teilsicherheitsbeiwert Betonstahl EC2
f_yd = f_yk/gamma_s; % Design-Zugfestigkeit

gamma_c = 1.5; % Teilsicherheitsbeiwert Beton EC2
f_cd = f_c/gamma_c; % Design-Bruchfestigkeit

%% Berechnungen Biegung

% Eingangswerte Schleife
n = 1; % Schrittweite
mn = 60; % min Bewehrungsfläche (60 f. 5m, 250 f. 10m, 500 f. 15m)
m = 5000; % Max Bewehrungsfläche
tx = (m-mn)/n; % Anzahl Schritte

% Initialisieren Vektoren
d_vekt = zeros(tx+1,1); % statische Nutzhöhe
d_nl = zeros(tx+1,1); % d für ausgeglichenen Bewehrungsgrad

```

```

CO2_aeq = zeros(tx+1,1);    % Treibhauspotenzial
CO2_aeq2 = zeros(tx+1,1);

A_fv = mn:n:m;            % Bewehrungsfläche
A_fv = A_fv';            % Transponieren

for j = 1:tx % Bewehrungsfläche variabel

    A_f = A_fv(j,1);      % Zuordnung Bewehrungsfläche

    % Eingangswerte innere Schleife d

    d_v = 1:1:1600;
    d_v = d_v';
    o = 1600/1;

    % Initialisieren
    M_Rd1 = zeros(o,1); % Design-Momentenwiderstand
    M_Ed1 = zeros(o,1); % Design-Momenteneinwirkung

    % Berechnung Gerade für ausgeglichenen Bewehrungsgrad
    d_n1(j) = ((A_f * f_yd) / (lambda*b*nu*f_cd)) * ...
        ((epsilon_cu + epsilon_f) / epsilon_cu );

    for i = 1:o % d variabel

        d = d_v(i,1);      % Zuordnung statische Nutzhöhe

        h = d + c_nom + d_b/2 ; % Querschnittshöhe h

        % Einwirkung (ULS und SLS)

        g1_ck = b.*h.*10.^-6 .* 25; % charakt. Eigengewicht in kN/m
        q1_ck = 10 * b * 10.^-3; % charakt. Nutzlast mit 10 kN/m² in kN/m

        g1_d = 1.35*g1_ck; % Design Eigengewicht in kN/m
        q1_d = 1.5*q1_ck; % Design Nutzlast in kN/m
        M_Ed = (g1_d + q1_d)*(1*10.^-3).^2 /8; % einwirkendes Designmoment
            % in kNm
        M_Ed1(i) = M_Ed; % Vektoreintrag mit M_Ed

        rho_f = A_f / (b*d); % vorhandener Bewehrungsgrad

    % Biegewiderstand berechnen

    % Stahlzugkraft
    F_s1 = f_yd*A_f; % in N

    % Gleichgewicht der Kräfte
    F_cd = F_s1; % in N

    x = F_cd / (b*lambda*nu*f_cd); % Druckzonenhöhe in mm

    %x = d*( epsilon_cu/ (epsilon_cu + epsilon_f));
    %F_cd = x*b*lambda*nu*f_cd;

    lambda_x = lambda * x; % abgeminderte Druckzonenhöhe in mm

    %innerer Hebelarm

```

```

z = d - lambda_x/2;          % in mm

%Widerstandsmoment
M_Rd = z*F_cd*10^-6;        % in kNm
M_Rd1(i) = M_Rd;

end

M_Rd_id = min(abs(M_Rd1 - M_Ed1 )); % minimales Widerstandsmoment
[~, Zeile]= min(abs(M_Rd1 - M_Ed1 )); % Zeile abrufen

d_M_id = d_v(Zeile); % Wert d aus Zeile abrufen
d_vekt(j)= d_M_id; % d speichern

end

%% Berechnungen zur Durchbiegung

% Eingangswerte Schleife
nx = 1; % Schrittweite
mnx = 60; % Min Bewehrungsfläche
mx = 5000; % Max Bewehrungsfläche
t = (mx-mnx)/nx; % Anzahl Schritte

% Initialisieren Vektoren
d_vektor = zeros(t+1,1); % statische Nutzhöhe
A_fv1 = mnx:nx:mx; % Bewehrungsfläche
A_fv1 = A_fv1'; % Transponieren

for j = 1:t % Bewehrungsfläche variabel

    A_f = A_fv1(j,1); % Zuordnung Bewehrungsfläche

    % Eingangswerte innere Schleife

    d1 = 0:2:1600; % min und max Wert
    d1 = d1'; % Transponieren
    o = 1600/2; % Schritte

    % Initialisieren Vektoren
    w_vorh = zeros(o+1,1); % Durchbiegung

    for i = 1:o % d variabel

        d = d1(i,1); % Zuordnung d

        h = d + c_nom + d_b/2 ; % Querschnittshöhe in mm
        W = b*(h^2)/6; % Widerstandsmoment
        f_ctm = 4.1; % Zugfestigkeit Beton in N/mm^2 bei C50/60
        M_cr = W*f_ctm; % Rissmoment

        % SLS Einwirkung
        g1_ck = b.*h .* 2.5 * 10.^(-5); % charakt. Eigengewicht in N/mm
        q1_ck = 0.01 *b; % charakt. Nutzlast mit 10kN/m^2=0.01N/mm^2 in N/mm
        M_ck = (g1_ck + q1_ck) * l.^2 / 8; % einwirkendes SLS-Moment in Nmm

        % Berechnung Durchbiegung

```

```

beta = 0.5;      % für Dauerbelastung/zahlreiche Lastwechsel
zeta = 1- beta * (M_cr / M_ck )^2; %Verteilungsbeiwert

% Zustand I
rho_1 = A_f ./ (b.*h);      % vorhandener Bewehrungsgrad
alpha_e = E_f ./ E_c_eff;

A_I = alpha_e * rho_1 * d/h;
B_I = alpha_e * rho_1;
k_x1 = ( 0.5 + A_I) / (1 + B_I);
x_1 = k_x1 * h;
k_1 = 1 + 12* (0.5 - k_x1)^2 +12* alpha_e* rho_1* (d/h * k_x1)^2;
I_1 = k_1*b.*h.^3 ./ 12;
S_1 = A_f * (h-x_1);

% Zustand II
rho_2 = A_f ./ (b.*d);      % vorhandener Bewehrungsgrad

A_II = alpha_e * rho_2;
B_II = alpha_e * rho_2;
k_x2 = - B_II + sqrt(B_II^2 + 2*A_II);
x_2 = k_x2 * d;
k_2 = 4 * k_x2^3 + 12 * alpha_e * rho_2 * (1 - k_x2)^2;
I_2 = k_2*b.*d.^3 ./ 12;
S_2 = A_f * (h-x_2);

% Krümmungen mit Kriechen und schwinden
kappa_1 = M_ck / ( E_c_eff* I_1) + epsilon_cs* alpha_e* (S_1/I_1);
kappa_2 = M_ck / ( E_c_eff* I_2) + epsilon_cs* alpha_e* (S_2/I_2);
kappa_m = zeta * kappa_2 + (1-zeta) * kappa_1;

w_vor = 5/48 * (l)^2 * kappa_m; % Langzeit-Durchbiegung in mm t
w_vorh(i) = w_vor; % Zuordnung Durchbiegung zu Vektor

end

w_zul = 1./300; % zulässige Durchbiegung in mm

w_id = min(abs(w_vorh-w_zul)); % ideale Durchbiegung bei L/300
[~, Zeile]= min(abs(w_vorh-w_zul)) ; % Zeile ideale Durchbiegung

d_id = d1(Zeile); % d aus Zeile abrufen
d_vektor(j)= d_id; % d speichern

% Umweltfaktor GWP auf Basis Querschnittswerte Durchbiegung
CO2_aeq(j) = gwp_bs*(rho_bs*A_f*1)+ b*1*(d_vektor(j)+c_nom+ d_b/2)...
*10^-9 *gwp_c; % kg CO2-Äq (Beton+Stahl)

end

lCO2 = length(CO2_aeq)-1;

GWP_min = min(abs(CO2_aeq(1:lCO2,1))) % minimales Treibhauspotenzial
[~, Zeile]= min(abs(CO2_aeq(1:lCO2,1))) ; % Zeile min. GWP
A_f_GWP_min = A_fv1(Zeile); % Bewehrungsfläche mit min. GWP

GWP_bs = gwp_bs*(rho_bs*A_f_GWP_min*1) % Anteil Betonstahl an min. GWP
GWP_c = GWP_min - GWP_bs % Anteil Beton an min. GWP

```

```

%% Abbildung

% Bildgrößeneinstellungen
w=22;
h=11;

% Schriftgröße
f=10;

%Achsenfarben
left_color = [0 0 0];
right_color = [0 .5 .5];

x1 = A_fv;
y1 = d;

% Bildeinstellungen
figure_header
set(fig , 'Units','centimeters','PaperUnits','centimeters','PaperSize',...
      [w h], 'PaperPosition',[0,0,w,h], 'Position',[10 10,w,h]);

% Plot
hold on
yyaxis left
plot(A_fv, d_vekt, 'k','Linewidth',1)           % Biege­wider­stand
plot(A_fv, d_n1, 'k--','Linewidth',1)         % ausge­gliche­ner Bewehrungs­grad
plot(A_fv1, d_vektor, 'k:','Linewidth',1)     % Durch­biegung

%txt = {'Betonversagen'};           % Text im Bild
%text(2500,1100,txt)
%txt2 = {'Stahlversagen'};         % Text im Bild
%text(1300,1400,txt2)

yyaxis right
plot(A_fv, CO2_aeq, 'k-.','Linewidth',1, 'Color', right_color) % GWP
xline(A_f_GWP_min)           % vertikale Gerade bei min. GWP

% Einstellung der Achsen

legend({'Biegung','ausgegliche­ner Bewehrungs­grad', 'Durch­biegung', ...
      'kg CO2 Äq.'},'Location','EastOutside'); % Legende

xlabel(['$A_{s}$ $[mm^2]$ ']); % Beschriftung x-Achse

% linke y-Achse mit d in mm
yyaxis left
axis([0 4000 0 1600])
ax = gca;
set(ax,'Units','centimeter','FontSize',f, 'YColor', left_color)
ylabel('$d$ $[mm]$');

% rechte y-Achse mit GWP in kg CO2 äq
yyaxis right
axis([0 4000 0 3000])
ax = gca;
set(ax,'Units','centimeter','FontSize',f, 'YColor', right_color)
ylabel('GWP [kg $CO_{2}$ \ "aq.]');

% Speichern der Abbildung

```

```
%fname = strcat('Kurve_l=5_Betonstahl');  
%fpath = 'D:\SOSE20\Diplomarbeit\Berechnungen_matlab\variable Größen';  
%saveas(fig,fullfile(fpath, fname),'pdf');
```

Literatur

- AASHTO (2018). *AASHTO LRFD Bridge Design Guide Specifications for GFRP-Reinforced Concrete*. AASHTO Committee on Bridges and Structures.
- ACI 440 (2015). *ACI 440.1R-15 Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars*. American Concrete Institute.
- baunetzwissen (2020). *Treibhauspotenzial*. abgerufen: 09.09.2020. URL: <https://www.baunetzwissen.de/glossar/t/treibhauspotenzial-6305134>.
- BR (Juni 2019). *Jahr für Jahr bedenklich mehr Treibhausgase*. abgerufen: 08.04.2020. URL: <https://www.br.de/klimawandel/co2-emissionen-steigende-kohlendioxid-100.html>.
- Burgoyne, C. und I. Balafas (2007). „Why is FRP not a financial success“. In: *Proc. 8th Intl. Conf. on FRP Reinforcement for Reinforced Concrete Structures, FRPRCS-8, Univ. of Patras, Patras, Greece*.
- CNR (2007). *CNR-DT 203/2006: Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars*. Hrsg. von A. C. on Technical Recommendations for Construction.
- CSA (2012). *S806-12 Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers*. Canadian Standards Association.
- (2019). *CSA S6:19 Canadian Highway Bridge Design Code*. Canadian Standards Association.
- Ehrenstein, G. W. (2006). *Faserverbundkunststoffe, Werkstoffe – Verarbeitung – Eigenschaften*. : München, , 2006: Carl Hanser Verlag.
- EN 1992-1-1 (2011). *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010*. CEN Europäisches Komitee für Normung.
- FIB Task Group 9.3 (2007). *fib Bulletin 40: FRP reinforcement in RC structures*. International Federation for Structural Concrete (fib).
- Helbig, T., K. Unterer, C. Kulas, S. Rempel und J. Hegger (2016). „Fuß- und Radwegbrücke aus Carbonbeton in Albstadt-Ebingen: Die weltweit erste ausschließlich carbonfaserbewehrte Betonbrücke“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 111.10, S. 676–685.
- Hofmann, S., T. Proske und C.-A. Graubner (2020). „Verbundverhalten besandeter basaltfaserverstärkter Kunststoffbewehrung“. In: *Beton- und Stahlbetonbau*.
- JSCE (1997). *Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures using fiber reinforcing materials (Design)*. Hrsg. von R. S. on Continuous Fiber Reinforcing Materials. Concrete Library of JSCE No. 30.
- Kirsten, M., C. Freudenberg und C. Cherif (2015). „Carbonfasern, der Werkstoff des 21. Jahrhunderts: Textile Ausgangsbasis für filigrane hochtragende Betonbauteile“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 110.S1, S. 8–15.
- Knab, F., A. Weber und J. Schweinfurth (2015). „Sicherer Einsatz von Glasfaserbewehrung im Bauwesen: Hinweise und Anwendungsbeispiele für die Praxis“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 110.12, S. 822–831.
- Kromoser, B., P. Preinstorfer und J. Kollegger (2019). „Building lightweight structures with carbon-fiber-reinforced polymer-reinforced ultra-high-performance concrete: Research approach, construction materials, and conceptual design of three building components“. In: *Structural Concrete* 20.2, S. 730–744.

- Kueres, S., N. Will und J. Hegger (2019). „Flexural design of a modular footbridge system with pretensioned carbon fiber reinforced polymer reinforcement“. In: *Structural Concrete* 20.6, S. 1858–1870.
- Kulas, C. H. (2013). „Zum Tragverhalten getränkter textiler Bewehrungselemente für Betonbauteile“. 1. Auflage Aachen, Eigenverlag, Heft 38 (Schriftenreihe des IMB). Diss. Lehrstuhl und Institut für Massivbau der RWTH Aachen.
- Mast, M. und S. Schmitt (März 2020). *Das Feuerwetter, das der Klimawandel bringt*. abgerufen: 08.04.2020. URL: <https://www.zeit.de/wissen/umwelt/2020-03/klimawandel-auswirkungen-braende-australien-waldbraende-folgen-erderwaermung>.
- Nanni, A., A. De Luca und H. J. Zadeh (2014). *Reinforced Concrete with FRP Bars: Mechanics and design*. Taylor Francis Group. ISBN: 978-0-203-87429-5.
- Niewels, J. (2008). „Zum Tragverhalten von Betonbauteilen mit Faserverbundkunststoff-Bewehrung“. Diss. Lehrstuhl und Institut für Massivbau (RWTH Aachen).
- Rempel, S. (2020). „Ökobilanz der Carbonbetonbrücke in Ebingen“. In: *12 . CARBON- UND TEXTILBETONTAGE*.
- Schlaich, M., B. Zwingmann, Y. Liu und R. Goller (2012). „Zugelemente aus CFK und ihre Verankerungen“. In: *Bautechnik* 89.12, S. 841–850.
- solidian (2017). *Autobrücken in Albstadt aus Carbonbeton*. abgerufen: 08.04.2020. URL: <https://www.solidian.com/unternehmen/referenzen/details/erste-autobruecken-aus-carbonbeton/>.
- (2020). *Technisches Datenblatt Carbon Stab/Basalt Stab/AR-Glas Matte*. abgerufen: 10.09.2020. URL: <https://www.solidian.com/produkte/downloads/>.
- Stark, A. und J. Hegger (2013). „Verbundverhalten von CFK-Spannbewehrungen in UHPFRC“. In: *Beton-und Stahlbetonbau* 108.10, S. 701–710.
- Stoiber, N., M. Hammerl und B. Kromoser (2020). „Cradle-to-gate life cycle assessment of CFRP reinforcement for concrete structures: calculation basis and exemplary application“. In: *Journal of Cleaner Production - Preprint*.
- WWF (2020). *Living Planet Report 2020*. abgerufen am 30.09.2020. URL: <https://f.hubspotusercontent20.net/hubfs/4783129/LPR/PDFs/ENGLISH-SUMMARY.pdf>.
- (12.04.2019). *Zement zerrt am Klima*. abgerufen am 05.10.2020. URL: <https://www.wwf.de/2019/april/zement-zerrt-am-klima/>.
- Younes, A., A. Seidel, S. Rittner, C. Cherif und R. Thyroff (2015). „Innovative textile Bewehrungen für hochbelastbare Betonbauteile“. In: *Beton-und Stahlbetonbau* 110.S1, S. 16–21.