

Diploma Thesis

Studies on graded textile-reinforced concrete elements

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

DIPLOMARBEIT

Untersuchungen zu gradierten textildbewehrten Betonbauteilen

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

von

Barbara Schubert, BSc

Matr.Nr.: 01225744

unter der Anleitung von

O.Univ.Prof. Dr.-Ing. **Johann Kolleger**
Dipl.-Ing. Dr.techn. **Philipp Preinstorfer**

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

Wien, im Juni 2021

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich im Rahmen der Diplomarbeit und während der gesamten Studienzeit unterstützt und begleitet haben.

Ich möchte dabei ganz besonders Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Philipp Preinstorfer für das Bereitstellen dieses interessanten Themas meiner Diplomarbeit und die freundliche Hilfsbereitschaft danken.

Großer Dank geht auch an Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Kirnbauer für seinen Einsatz und Mithilfe im Labor.

Das größte Dankeschön geht an meine Familie und insbesondere an meine Eltern für die Unterstützung während meiner Studienzeit. Ihr Rückhalt und ihre Unterstützung haben mir die Möglichkeit gegeben, das aufwendige Bauingenieursstudium zu meistern.

Weiters danke ich auch all meinen Freunden, Studienkollegen und Wegbegleitern, welche meine Studienzeit bereichert und zu einem besonderen Lebensabschnitt gemacht haben.

Schließlich danke ich auch Herrn Dr. Markus Gahler. Danke, dass du an mich geglaubt hast.

Kurzfassung

Der Klimawandel gibt Anlass bewährte Strukturen zu überdenken und bezüglich der Umweltwirkungen zu optimieren. In Hinsicht auf die Baubranche, vor allem den Betonsektor, gibt es aufgrund der hohen Treibhausgasemissionen die bei der Zementherstellung entstehen, eine dringende Notwendigkeit diese Emissionen durch verschiedene Maßnahmen zu reduzieren. Der innovative Verbundwerkstoff Textilbeton ermöglicht das Herstellen schlanker und dauerhafter Bauteile, da die nichtmetallischen Hochleistungsfasern nicht vor Korrosion geschützt werden müssen und deswegen auch keine hohen Betondeckungen benötigt werden. Durch die Verwendung dieses Hochleistungsmaterials kann eine beachtliche Menge an Beton und somit Zement eingespart werden, weswegen dieser Ansatz als eine Lösungsstrategie in diese Arbeit eingeht. Ein weiterer Ansatz Zement und somit die schädlichen Umweltwirkungen dieses Baustoffs zu minimieren, ist die Verwendung von speziell entwickelten zementreduzierten Betonen – sogenannten Ökobetonen – bei deren Herstellung Zement durch andere Zusatzstoffe wie Flugasche oder Kalksteinmehl substituiert werden. Speziell in Hinblick auf textilbewehrte Bauteile ergibt sich hier großes Potential, da die Bewehrung nicht durch das alkalische Milieu im Beton vor Korrosion geschützt werden muss und demnach größere Mengen an Zement durch Zusatzstoffe ersetzt werden können ohne die Dauerhaftigkeit zu gefährden. Ziel dieser Arbeit ist es, durch diese Lösungsansätze ein Bauteil aus Textilbeton zu kreieren, welches trotz seiner im Vergleich zu herkömmlichem Stahlbeton geringeren Kubatur und reduziertem Zementanteil eine hohe Leistungsfähigkeit besitzt.

Im Zuge dieser wissenschaftlichen Arbeit wurde ein Träger aus einem Forschungsprojekt hinsichtlich Materialverbrauch und Treibhausgasemissionen optimiert. Es wurde untersucht, ob der Träger, der aufgrund der verwendeten Materialien Textilbewehrung und ultrahochfestem Beton bereits eine im Vergleich zu herkömmlichem Stahlbeton verbesserte Umweltwirkung aufweist, noch weiter optimiert werden kann. Dazu wurde der Träger mit verschiedenen Ökobetonen hergestellt, die über die Länge und dem Querschnitt lokal abgestuft wurden, um die Leistungsfähigkeit an die Anforderung bestmöglich anzupassen. Durch eine optimale Ausnutzung der Betoneigenschaften ist es möglich, große Mengen an Zement einzusparen.

Zur Überprüfung der Machbarkeit der Optimierungsstrategien wurden zementreduzierte Betone hergestellt und deren Festigkeiten geprüft. Weiters wurde untersucht, ob und wie eine lokale Abstufung über die Länge durchführbar ist und wie sich die Fugen zwischen den Betonsorten verhalten.

Anhand einer Gegenüberstellung der Treibhausgasemissionen in Form einer Ökobilanz kann gezeigt werden, dass diese durch die gewählten Optimierungsstrategien des Textilbetons deutlich reduziert werden können. Abschließend konnte auch die prinzipielle Realisierbarkeit einer vertikalen Gradierung durch Einsatz einer vertikal verschieblichen Platte zum Trennen der Betonschichten ohne Auftreten von Instabilitäten gezeigt werden.

Abstract

Climate change gives reason to rethink proven structures and to optimize them with regard to their environmental impact. With regard to the construction industry, especially the concrete sector, there is an urgent need to reduce these emissions through various measures due to the high greenhouse gas emissions generated during cement production. The innovative composite material textile concrete enables the production of slim and durable building components, as the non-metallic high-performance fibers do not need to be protected against corrosion and therefore do not require high concrete decks. By using this high-performance material, a considerable amount of concrete and thus cement can be saved, which is why this approach is included in this work as a solution strategy. Another approach to minimize cement and thus the harmful environmental effects of this building material is the use of specially developed, cement-reduced concretes - so-called eco-concretes - in the production of which cement is substituted by other additives such as fly ash or limestone powder. Particularly with regard to textile-reinforced components, there is great potential here, since the reinforcement does not have to be protected against corrosion by the alkaline environment in the concrete and therefore larger quantities of cement can be replaced by additives without endangering durability. The aim of this work is to use these solutions to create a structural component made of textile concrete which, despite its smaller cubature and reduced cement content compared to conventional reinforced concrete, has a high level of performance.

In the course of this scientific work, a beam from a research project was optimized with regard to material consumption and greenhouse gas emissions. It was investigated whether the beam, which has already an improved environmental impact compared to conventional reinforced concrete due to the materials used, textile reinforcement and ultra-high strength concrete, could be further optimized. For this purpose, the beam was manufactured with different eco-concretes, which were locally graded over the length and the cross-section in order to adapt the performance to the requirement in the best possible way. Optimum utilization of the concrete properties makes it possible to save large quantities of cement.

To verify the feasibility of the optimization strategies, cement-reduced concretes were produced and their strengths tested. Furthermore, it was investigated whether and how a local gradation over the length is possible and how the joints between the concrete types behave.

On the basis of a comparison of the greenhouse gas emissions in the form of a life cycle assessment, it can be shown that these can be significantly reduced by the selected optimization strategies for the textile concrete. Finally, it was also possible to demonstrate the feasibility in principle of vertical grading by using a vertically movable plate to separate the concrete layers without the occurrence of instabilities.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation.....	1
1.2	Problemstellung.....	2
1.3	Zielsetzung und wissenschaftliche Methodik	3
1.4	Abgrenzung	4
2	State of the Art	5
2.1	Gradientenbeton	5
2.2	Textile Bewehrung	9
2.2.1	Allgemeines	9
2.2.2	Fasermaterialien	11
2.2.3	Konstruieren mit Textilbeton	11
2.3	Zementreduzierte Betone	12
3	Optimierung von profilierten Tragwerken	17
3.1	Ausgangssituation.....	17
3.1.1	Strukturoptimierung	17
3.1.2	Materialien	19
3.2	Optimierungsstrategie	21
3.3	Bestimmung der Tragfähigkeit.....	22
3.3.1	Materialeigenschaften und Sicherheitskonzept	23
3.3.2	Modellierung	26
3.3.3	Biegenachweis in Feldmitte.....	27
3.3.4	Querkraftnachweis am Auflager	30
3.4	Bereichsweise Festlegung der Betonsorten	32
3.5	Ökobilanzierung.....	34
4	Proof of concept	38
4.1	Abgestufte Betonsorten.....	38
4.1.1	Gewählte Betonmischungen	39
4.1.2	Realisierte Betonmischungen.....	41
4.2	Materialprüfungen	43
4.3	Gradierung	46

4.3.1	Eigenschaften des Interface nach Erhärten des Betons.....	47
4.4	Textilbewehrter gradierter Beton.....	51
5	Auswertung	54

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

<i>FRP</i>	Faserverbundkunststoff
<i>CFRP</i>	Carbonfaserverbundkunststoff
<i>CFK</i>	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
<i>GWP</i>	Global Warming Potential, Treibhauspotenzial
<i>UHPC</i>	Ultra-high-performance concrete, Ultrahochleistungsbeton
<i>E-Modul</i>	Elastizitätsmodul

Lateinische Buchstaben

<i>A</i>	Fläche
<i>E</i>	Elastizitätsmodul
<i>F</i>	Kraft, Einwirkung
<i>M</i>	Biegemoment
<i>N</i>	Normalkraft
<i>V</i>	Querkraft
<i>b_f</i>	Breite des Flansches
<i>b_s</i>	Breite des Gurtes
<i>h_f</i>	Höhe des Flansches
<i>d</i>	statische Nutzhöhe
<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 Motivation

Die globalen Klimaveränderungen und der dadurch hervorgerufene Temperaturanstieg, der seit der Mitte des 19. Jahrhunderts zu beobachten ist, ist uns Menschen und unserer Lebensweise zu verschulden. Hauptursache dabei ist der Ausstoß von Treibhausgasen wie z.B. Kohlendioxid (CO₂) in die Atmosphäre. Dadurch wird der von Natur aus bestehende Treibhauseffekt verstärkt, was zur Folge hat, dass sich die Erde stetig erwärmt [1]. Laut dem Deutschen Klima-Konsortium [2] lag 2019 die Konzentration von CO₂ in der Erdatmosphäre durchschnittlich bei 411 ppm (Teilchen pro Million Luftmoleküle) was einen Anstieg von ca. 50 Prozent gegenüber dem Niveau vor Beginn der Industrialisierung am Ende des 18. Jahrhunderts bedeutet.

In Österreich bestehen die Treibhausgase zu 86 % aus CO₂. Diese 86 % können nach Verursacher aufgeteilt werden in 31 % Industrie und Gewerbe, 26 % Verkehr, 17 % Energiewirtschaft, 13 % Heizungen und 9 % Landwirtschaft. Die restlichen 2 % sind fluoridierten Gasen und der Abfallwirtschaft zuzuschreiben [1].

Der Umweltschutz und der Schutz des Klimas sind besondere Herausforderungen im 21. Jahrhundert. Es werden nationale und internationale Bemühungen zum Klimaschutz angestellt, mit dem großen Ziel der Reduzierung des Ausstoßes von Treibhausgasen [3]. 2015 haben fast 190 Länder ein Abkommen zur globalen Bekämpfung des Klimawandels unterzeichnet, mit dem Ziel den globalen Temperaturanstieg auf 1,5 °C zu begrenzen. Um das Ziel dieser rechtsverbindlichen Vereinbarung, auch Pariser Klimaabkommen genannt, zu erreichen, müssen die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2030 um ca. 55 % im Vergleich zu 2017 reduziert werden [4].

Global gesehen ist der Bausektor, vor allem der Betonbau aufgrund der Produktion von Zement, für etwa 8 % des CO₂-Ausstoßes verantwortlich [5]. Das sind rund viermal soviel CO₂-Emissionen wie durch den gesamten weltweiten Flugverkehr ausgestoßen werden [6]. Zur Veranschaulichung zeigt Abb. 1.1 anhand einer Beispielrezeptur die Anteile des Betons am Treibhauspotenzial [7]. Diese eindeutigen Zahlen geben Anlass zum Handeln und zum Entwickeln neuartiger, innovativer und nachhaltigerer Technologien im Bauwesen. Auf mögliche Ansätze zur Reduzierung des CO₂- Ausstoßes in der Betonindustrie wird im Rahmen dieser Arbeit eingegangen.

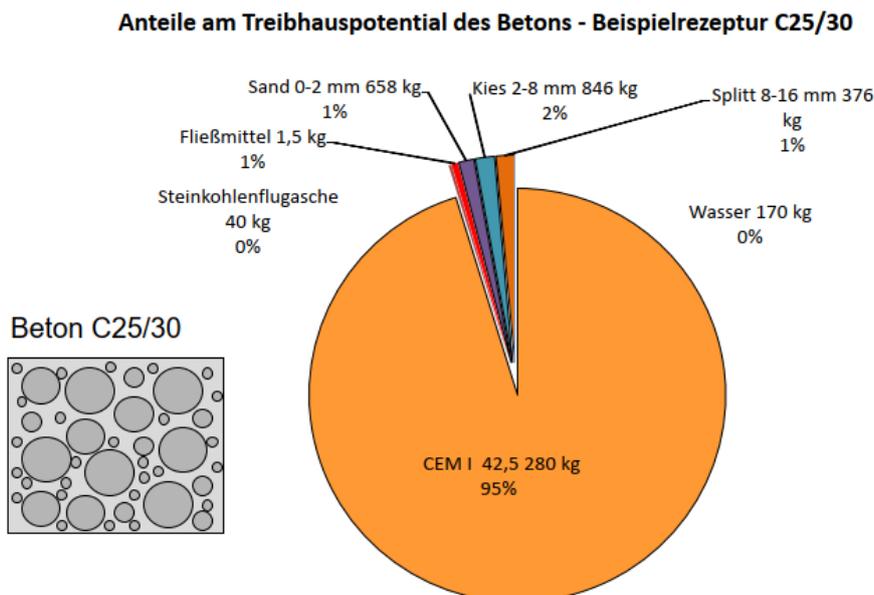


Abb. 1.1: Anteil am Treibhauspotential des Betons [7]

1.2 Problemstellung

Neben Kies, Sand und Wasser ist vor allem Zement als Bindemittel für die Herstellung von Beton von zentraler Bedeutung [4]. Der Beton erhält seine typischen Eigenschaften hauptsächlich durch die verwendete Zementart bzw. Zementfestigkeitsklasse. Zement selbst ist ein fein gemahlene, hydraulisches, anorganisches, nichtmetallisches Bindemittel, das mit Wasser vermischt zu Zementleim wird, der die Gesteinskörnungen verklebt und durch Hydratation erstarrt und erhärtet [8]. Der weltweite Verbrauch von Zement ist im letzten Jahrzehnt von 2,22 auf 4,10 Gt/Jahr gestiegen, während die gesamten jährlichen Treibhausgasemissionen 2017 ein Rekordhoch von 53,5 Gt CO₂ erreicht haben [4]. Da Beton der überragende Massenbaustoff der Gegenwart ist und in Zukunft auch bleiben wird, ist eine Änderung bzw. Anpassung hinsichtlich Nachhaltigkeit dringend nötig.

Bei der Zementherstellung muss der Kalkstein entsäuert werden, was unabdingbar mit einem hohen CO₂-Ausstoß verbunden ist, der primär für die schlechte Ökobilanz von Beton verantwortlich ist [9]. Doch nicht nur die Entsäuerung des Kalksteins, sondern auch das Beheizen des Drehrohrofens zur Herstellung des Zementklinkers ist mit hohen Emissionen verbunden [10]. Ca. 0,8 bis 1,0 Tonnen CO₂ werden bei der Herstellung von einer Tonne Portlandzementklinker emittiert. Im Vergleich zum Wert der spezifischen CO₂-Emissionen pro Tonne Zement im Jahr 1990, konnte dieser um ca. 22 % durch Verbesserungen in der Ofentechnik und bei den Filteranlagen reduziert werden. Im Jahr 2018 wurden als Brennmaterial ca. 30 % fossile und 70 % alternative Ausgangsstoffe eingesetzt. Als alternative Ausgangsstoffe kommen neben Müll und Klärschlamm auch Tiermehle zum Einsatz [10]. Da die Zementindustrie bereits alle Produktionsprozesse hinsichtlich der hohen Emissionsrate optimiert hat, müssen andere Wege gefunden werden, um den Beton umweltfreundlicher zu gestalten [9]. Hierzu können verschiedene Lösungsansätze verfolgt werden:

- Entwicklung von neuartigen Zementen oder Reduzierung des Zement-/ Bindemittelgehalts je m^3 Beton [9].
Da der Portlandzementklinker hauptverantwortlich für die schlechte Umweltbilanz ist, wird bei der Entwicklung neuer Bindemittel die Substitution mit inerten mineralischen Füllstoffen und ergänzenden zementhaltigen Materialien versucht. Eine Herausforderung beim Entwickeln neuer Bindemittel ist, dass diese keine geringere Leistungsfähigkeit als Normzemente besitzen sollen [11].
- Reduzierung des Betonvolumens durch Verwendung und Kombination von Hochleistungsmaterialien wie z.B. Faserverbundkunststoffe zusammen mit Ultrahochleistungsbeton (UHPC). Durch diese Methode können schlankere Bauteile entwickelt werden, die einen geringeren Materialverbrauch zur Folge haben [12].
- Massenreduzierung durch funktional abgestufte Materialien, in diesem Fall Beton, zur gezielten Ausnutzung innerhalb eines Bauteils [13]. Durch die gezielte Anpassung der Leistungsfähigkeit des Betons an die Anforderung, kann dieser über die Länge bzw. Breite des Bauteils abgestuft werden, um einen maximalen Ausnutzungsgrad zu erhalten.

Um überhaupt Vergleichswerte hinsichtlich der Nachhaltigkeit von Bauteilen bzw. Baustoffen zu erhalten, muss mit Hilfe des Life-Cycle-Assessment (LCA) -Ansatzes, auch Ökobilanz genannt, die Umweltleistung von Zement- und Betonprodukten bewertet werden [11]. Auf die Ökobilanz wird in Kap. 3.5 näher eingegangen.

1.3 Zielsetzung und wissenschaftliche Methodik

Die Motivation hinter dieser Arbeit ist, Bauteile aus Beton mit den vorher genannten Optimierungsstrategien so zu verbessern, dass diese weniger Masse und insbesondere weniger Zement benötigen und sich dadurch eine bessere Ökobilanz ergibt. Für dieses Vorhaben eignet sich besonders die Verwendung von textilbewehrtem Beton, einem innovativen Verbundwerkstoff aus nichtmetallischen Hochleistungsfasern, der aus konstruktiver Sicht neue Möglichkeiten eröffnet.

Der Einsatz von textiler Bewehrung hat nicht nur den Vorteil der hohen Festigkeit bei gleichzeitig geringem Gewicht der Bewehrung, sondern es ist auch eine Mindestbetondeckung zum Schutz vor Korrosion hinfällig, wodurch geringere Querschnittsdicken ermöglicht werden können. Geringeres Gewicht und dünnere Bauteile ergeben einen verminderten Materialverbrauch und damit einhergehend einen reduzierten CO_2 -Ausstoß. Da die Fasern aus nichtmetallischen Materialien bestehen, müssen sie zudem nicht durch das alkalische Milieu im Beton vor Korrosion geschützt werden. Dies eröffnet Möglichkeiten in der Optimierung der Betonzusammensetzung. Die genaue Vorgehensweise und Gliederung der Diplomarbeit sind wie folgt:

Stand der Technik (Kap. 2): In einer umfangreichen Literaturstudie wird der Stand der Technik zu den Themen Gradientenbeton, textiler Bewehrung und zementreduzierter Betone abgebildet. Dabei werden Erkenntnisse aus ersten Forschungen der vertikalen und horizontalen Gradierung an Bauteilen beschrieben und auf die verschiedenen Materialien der textilen Bewehrung eingegangen. Außerdem wird das Prinzip der Zementreduzierung von Betonen vorgestellt und

anhand von Grafiken ein Vergleich der Betonbestandteile von klassischen und zementreduzierten Betonen abgebildet.

Optimierung von profilierten Tragwerken (Kap. 3): Bezugnehmend auf einen in Kromoser et al. [12] bereits untersuchten I-Träger aus UHPC mit Textilbewehrung wird dieser hinsichtlich Materialzusammensetzung, Ausnutzungsgrad des Querschnitts und lokaler Abstufung optimiert, um geringere Emissionen zu erhalten. Der untersuchte Träger wurde durch die Querschnittswahl und Verwendung von Textilbewehrung in Kombination mit UHPC bereits gegenüber klassischen Betonträgern optimiert, jedoch wird mit zementreduzierten Betonen und einer lokalen Abstufung versucht die Ökobilanz weiter zu verbessern. Damit die Ergebnisse vergleichbar sind wird darauf Wert gelegt, dass der in dieser Arbeit optimierte Träger die gleiche Tragfähigkeit aufweist wie der originale. Dazu werden anhand der maximal aufnehmbaren Belastung des Originalträgers ein Querkraftnachweis und ein Biegenachweis geführt. Die Umweltwirkungen werden anhand einer Ökobilanz dargestellt, bei der vor allem der Wert des Treibhauspotenzials (GWP) und der Anteil an primären Energieträgern von großer Bedeutung ist.

Experiment (Kap. 4): Im experimentellen Bereich werden zuerst die Betonrezepturen vorgestellt, die für die Optimierung des Trägers in Kapitel 4.1.1 ausgewählt wurden. Aufgrund der nicht regionalen Verfügbarkeit mancher Bestandteile konnten die drei Betonmischungen nicht exakt wie in der Literatur hergestellt werden. Um ein ähnliches Leistungsprofil und eine gute Verarbeitbarkeit zu erreichen, wurde ausreichend an der Zusammensetzung getüfelt. Die schlussendlich gut verarbeitbaren Betonmischungen wurden in Würfeln mit 15 cm Seitenlänge gegossen und dann die Festigkeit nach einem Tag, sieben und 28 Tagen ermittelt. Es ist eine gute Abstufung der Druckfestigkeiten und die Erzielung ähnlicher Festigkeitsklassen, verglichen mit den Betonsorten der Literatur, gelungen.

Zudem wurde das Verbundverhalten von frisch-auf-frisch gegossenen, gradierten Betonen untersucht. In einem Würfel mit 15 cm Seitenlänge wurden mit Hilfe einer vertikal verschieblichen Platte jeweils zwei der drei Betonmischungen nebeneinander gegossen und die Platte danach gezogen. An diesen Würfeln wurden Spaltzugversuche gemacht.

Abschließend wurde die Machbarkeit der lokalen Abstufung mit den zementreduzierten Betonen anhand eines mit textiler Bewehrung versehenen Trägers untersucht. Dabei wird die Herstellbarkeit der Optimierungsstrategien bewiesen.

Auswertung (Kap. 5): Aus den Untersuchungen werden die Ergebnisse zusammengefasst und im Hinblick auf eine zukünftige Realisierung Schlussfolgerungen getroffen.

1.4 Abgrenzung

In dieser Arbeit wird auf die Optimierung von textilbewehrten Bauteilen eingegangen. Dabei werden Optimierungsstrategien aufgezählt und erläutert und die grundsätzliche Herstellbarkeit überprüft. Auf eine genauere Berechnung bzw. Untersuchung des Tragverhaltens oder des Verbundverhaltens wird nicht eingegangen. Außerdem werden Nachweise des Trägers nur im Grenzzustand der Tragfähigkeit geführt, auf eine Untersuchung in Bezug auf Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit wird nicht Rücksicht genommen.

Kapitel 2

State of the Art

2.1 Gradientenbeton

Wenn sich im Beton die Materialzusammensetzung räumlich verändert, um bestimmte Leistungsanforderungen für verschiedene Abschnitte des Bauteils zu erfüllen, spricht man von funktional gradiertem Beton [15]. Funktional gradiertes Beton kann entweder durch eine Abstufung der Dichte bzw. Porosität oder durch eine stufenweise Änderung der Materialzusammensetzung und somit der Eigenschaften erfolgen [16], siehe Abb. 2.1. Die Idee einer funktionalen Gradierung beruht in der Natur, die eine Gradierung in Materialien wie Bambus, Knochen, Zähne und Holz aufweist [17]. Gradientenwerkstoffe sind nicht einer neuen Werkstoffklasse zuzuschreiben, sondern bilden ein Hilfsmittel zur systematischen Gliederung oder Kombination von Materialien [16]. Das Interesse an funktional gradiertem Beton ist aufgrund der Notwendigkeit der Reduzierung der globalen Kohlenstoffemissionen und der fortschreitenden automatisierten Fertigung stetig am Wachsen [15].

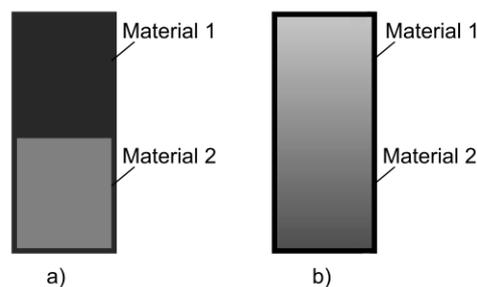


Abb. 2.1: Schematische Darstellung von (a) geschichtetem und (b) kontinuierlich gestuftem Beton [15]

Übliche Verbundwerkstoffe sind entweder homogene Mischungen, bei denen ein Kompromiss aus den jeweiligen Eigenschaften der Materialien gefunden wird oder eine Zusammensetzung verschiedener Materialien, die miteinander verbunden werden wie zum Beispiel bei Laminatverbundwerkstoffen. Das technisch fortschrittlich funktional gradierte Material ist auf unterschiedliche Funktionalitäten ausgelegt und unterscheidet sich somit völlig von diesen üblichen Verbundwerkstoffen [17].

Aktuelle Konstruktionsvorschriften und Herstellungsmethoden sehen Beton als homogenes Material an, deswegen werden normalerweise Bauteile zur Gänze mit einer homogenen Mischung betoniert. Bei der Bemessung von Bauteilen wird ausgehend von der maximalen Beanspruchung eine passende Betonfestigkeitsklasse gewählt, die die Anforderungen der Festigkeit und Dauerhaftigkeit erfüllt. Mit dieser Betonklasse wird dann der ganze Bauteil hergestellt. Die-

se Betonmischung ist ausgelegt für die höchstbeanspruchte/n Zone/n und wird somit an den meisten Stellen nicht ansatzweise ausgereizt. Die funktionale Abstufung ermöglicht eine Optimierung des Einsatzes des Betons und damit einhergehend eine deutliche Reduktion des Zementverbrauchs. Dies kann anhand folgender zwei Methoden geschehen: Zum einen durch eine höhere Effizienz durch gut durchdachten Einsatz von Betonmischungen mit hohem Zementgehalt lediglich in Abschnitten, die eine hohe Festigkeit verlangen. In Bereichen mit niedrigeren Festigkeitsanforderungen kann der Zementgehalt reduziert, oder auf alternative Bindemittel ausgewichen werden. Zum anderen durch Einsatz von Leichtgewichtsmischungen und dadurch Minimierung des Gesamtgewichts. Werden Leichtgewichtsmischungen dort angewendet wo keine Normalgewichtsmischungen notwendig sind, werden die Eigenlasten minimiert und folglich können erheblich schlankere Bauteile entworfen werden, die einen geringeren Materialverbrauch haben [15].

Die Einteilung der Schichtbetonelemente erfolgt nach der Anordnung der Gießvorgänge in zwei Gruppen: frisch-auf-frisch (oder nass-in-nass) und frisch-auf-gehärtet. Damit man eine gute Bindung an der Grenzfläche erhält, wird normalerweise ein frisch-auf-frisch Gießen verwendet. Dabei werden die einzelnen Betonmischungen gleichzeitig hergestellt und in die Schalung gegossen wohingegen beim frisch-auf-gehärtet Verfahren erst nach dem Abbinden und Aushärten der bereits gegossenen Schicht eine neue hinzugefügt wird [15].

In der Vergangenheit wurde zur Minimierung des Eigengewichts und des Zementgehalts vorrangig die Materialeigenschaften in vertikaler Richtung abgestuft. Dies erhält man durch aufeinanderfolgendes Gießen horizontaler Schichten verschiedener Betonmischungen [16]. Torelli et al. [15] beschäftigten sich mit stufenweise geschichteten und kontinuierlich abgestuften Betonsystemen. Dabei untersuchten sie Betonmischungskombinationen zur Erzielung gewisser Festigkeitseigenschaften mit dem Ziel der Kosteneinsparung, Verbesserung des Energiegehalts und Gewichtsreduzierung. Es wurden vor allem zweischichtige horizontal gegossene prismatische Elemente für die Forschung der funktionalen Vorteile von Schichtbeton herangezogen, siehe Abb. 2.2. Untersuchungen haben gezeigt, dass bei geschichteten Betonträgern Zement- und Gewichtsreduzierungen aufgrund einer Optimierung und Kombination von Mischungen erreicht werden können [16].

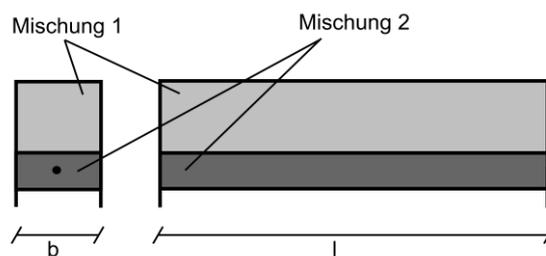


Abb. 2.2: Typische Geometrie von zweischichtig horizontal gegossenen prismatischen Elementen [16]

Zur Reduzierung des Zementgehalts und des Eigengewichts forschten Heinz et al. [16] an der Möglichkeit auf Scherung und Biegung beanspruchte Betonbalken aus Stahlbeton mit mehreren horizontalen und vertikalen Lagen unterschiedlicher Mischungen herzustellen, siehe Abb. 2.3. Zur Minimierung der Masse des Elements wurden in Bereichen mit erwartungsgemäß geringen Spannungen Betonmischungen mit hoher Porosität und schlechten mechanischen Eigenschaften eingesetzt [16].

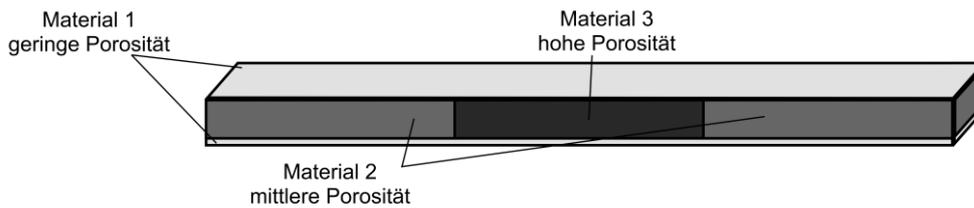


Abb. 2.3: Mehrschichtiger Träger nach Heinz et al. [16]

Während bereits mehr Untersuchungen zum horizontalen Schichten von Beton angestellt wurden, wurde bis dato der vertikalen Schichtung mit frisch-auf-frisch-Technik wenig Aufmerksamkeit geschenkt obwohl gerade diese die Möglichkeit der Zementminimierung und Optimierung von Dauerhaftigkeit und Feuerwiderstand bietet [15].

In Heinz et al. [16] wurden Versuche zum vertikalen Gießen durchgeführt. Dabei kamen vertikal verschiebbliche Platten zum Einsatz, die die verschiedenen Mischungen während des Gießens abgrenzten. Vor dem Verdichten wurden diese dann entfernt, um einen guten Verbund zwischen den Schichten zu erhalten. Die Schwierigkeit bei dieser Gradierung liegt in der Instabilität bei Entfernen der Platte wenn die Mischungen noch in frischem Zustand sind. Materialien auf Zementbasis sind Fließspannungsflüssigkeiten, d.h. bei niedrigen Schubspannungen weisen sie ein viskoelastisches Festkörperverhalten auf und bei Schubspannungen die höher sind als ihre Fließspannung, beginnen sie zu fließen. Betoniert man geschichtete Elemente mit verschiedenen Materialien und mit Hilfe einer herausziehbaren Platte, entsteht durch das Herausziehen ein Hohlraum, der normalerweise höhere Schubspannungen induziert als die Fließspannungen der Materialien. Durch die erzeugte Schergeschwindigkeit fließen die Materialien ein, um den Hohlraum zu füllen. Zu dem Zeitpunkt wo sich die Materialien berühren und sich gegenseitig in horizontale Richtung eingrenzen, reduzieren sich die Scherspannungen der beiden Mischungen. Haben die Mischungen das gleiche Eigengewicht, hört das Fließen auf, weil die Scherspannungen unter die Fließspannungen sinken. Wenn jedoch die Dichteunterschiede der aufeinandertreffenden Mischungen ausreichend hoch sind kann es sein, dass die Scherspannungen die Fließspannungen übersteigen. Dadurch kommt es zu globalen Instabilitäten des Systems. Bis zum Erreichen eines Spannungszustands, der die Fließspannungen der Mischungen nicht übersteigt, kommt es zum weiteren Fließen [4].

Diese Instabilitäten hängen ab von den unterschiedlichen Mischungsdichten, den rheologischen Parametern der Mischungen und von Höhenunterschieden [15]. Die endgültige Geometrie der Schichten kann beim frisch-auf-frisch-Gießen von vertikalen Schichten genauso wie bei horizontalen Schichten durch das Fließen des Betons im frischen Zustand stark beeinflusst werden, siehe dazu Abb. 2.4. Das Fließen kann erhebliche Verformungen verursachen, wodurch sich die zuvor durch die Trennplatte festgelegte Schichtgeometrie ändert. Dadurch kann es passieren, dass die Eigenschaften nicht dem ursprünglichen Entwurf entsprechen und sich die Leistungsfähigkeit ändert [4].

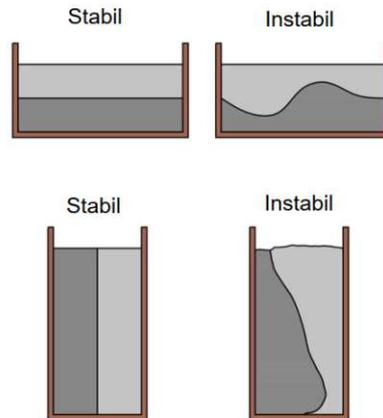


Abb. 2.4: Schematische Darstellung von stabilem und instabilem geschichteten Beton [15].

Um das Fließen zu vermeiden ist laut Torelli et al. [15] sowohl auf eine Auswahl geeigneter Betonmischungen zu achten als auch auf ein genaues Verständnis der rheologischen Eigenschaften, der Materialdichte, der Geometrie und deren Beziehung zueinander. Instabilitäten kann man entgegenwirken, indem man die Rheologie der Mischung so auslegt, dass das System im nassen Zustand während des gesamten Gießvorgangs stabil ist. Die Nassverformung der Schichten konnte bei einem Versuch von Torelli et al. [15] unter Kontrolle gebracht werden, indem Mischungen mit ausreichender innerer Stabilität und Steifigkeit im frischen Zustand ausgewählt wurden. Aufgrund fehlender Rahmenwerke zur Vorhersage der Auswirkungen von Materialeigenschaften auf die Stabilität von Betonschichten ist weitere Forschung erforderlich, um ein gutes Verständnis und Modellierungsfähigkeiten der Mechanismen zu erreichen. Ein Nachteil des frisch-auf-frisch Gießens ergibt sich zudem in der Baulogistik, da durch das Gießen in einer begrenzten Zeitspanne der Einsatz mehrerer Betonmischer nötig ist [15].

Bezüglich der Materialeigenschaften gradierter Bauteile haben Han et al. [18] Forschungen angestellt. Sie untersuchten unbewehrte Betonzylinder, bestehend aus zwei Schichten unterschiedlichen Materials, hinsichtlich mechanischem Verhalten unter axialer Belastung. Die Forschungen ergaben, dass die Druckfestigkeit des Verbundzylinders in etwa der Festigkeit des schwächeren Materials entspricht. Die Steifigkeit des Verbundzylinders liegt dagegen zwischen den Steifigkeiten der einzelnen Mischungen [18].

Durch die funktionale Gradierung der Betonbauteile können erheblich schlankere Bauteile hergestellt werden. Da schlankere Bauteile eine geringere Betondeckung mit sich bringen, ist es schwierig einen ausreichenden Korrosionsschutz für die Stahlbewehrung zu gewähren, weil diese ausreichend gegen Sauerstoff und Wasser geschützt werden muss. Textile Betonbewehrung ist nicht korrosionsgefährdet und benötigt keinen Korrosionsschutz. Dadurch sind keine hohen Betondeckungen erforderlich, wodurch sich der Einsatz in schlanken Bauteilen eignet. Die am häufigsten verwendeten textilen Bewehrungen sind jene aus alkaliresistentem Glas und Carbon, die als Multifilamentgarne, sogenannten Rovings, in den Betonquerschnitt eingebaut werden [16]. In Kap. 2.2 werden textile Bewehrungen aus Glas- und Carbonfasern näher untersucht.

2.2 Textile Bewehrung

2.2.1 Allgemeines

Der am häufigsten verwendete Baustoff zur Aufnahme von Druckkräften ist Beton, der jedoch durch seine relativ niedrige Zugfestigkeit nur eingeschränkt eingesetzt werden kann. Im Normalfall wird Beton deswegen mit Stahlbewehrung versehen, um einen Verbundwerkstoff zu kreieren der sowohl hohen Druck- als auch Zugkräften standhält. Ein großer Nachteil von stahlbewehrten Betonbauteilen ist die Gefahr der Korrosion, die nur durch eine dementsprechend hohe Betondeckung verhindert werden kann. In gängigen Normen liegt die vorgeschriebene Mindestbetondeckung, abhängig von der jeweiligen Expositionsklasse, zwischen 10 und 40 mm. Da sich deswegen Bauteil-Mindestdicken von 7-10 cm ergeben [19], ist es nicht möglich schlanke, filigrane Bauwerke aus Stahlbeton herzustellen [20].

Die Erfindung bzw. Entwicklung von Textilbeton soll das Realisieren von filigranen Elementen aus bewehrtem Beton ermöglichen, da vor allem Carbonfasern unter normalen Umweltbedingungen nicht korrodieren [19], [20]. Textilbewehrter Beton hat jedoch neben seiner Korrosionsbeständigkeit auch den Vorteil des niedrigen Gewichts und der hohen Festigkeit, was den Einsatz im Leichtbau und bei Sanierungs- und Instandsetzungsarbeiten begünstigt [19].

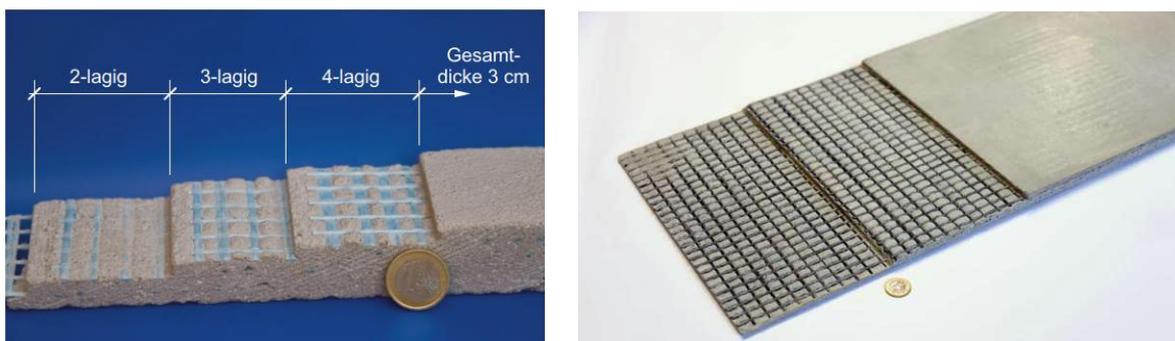


Abb. 2.5: Textilbeton mit typischen Abmessungen [21], [22]

Ausgangsprodukt für die Herstellung von textilen Bewehrungen bilden Faserstoffe, die in Form von Filamenten (Endlosfasern) entweder aus organischen oder anorganischen Materialien hergestellt werden. Die Eigenschaften der Faserstoffe bestimmen maßgeblich die Eigenschaften der Textilbewehrung. Das Fasermaterial muss für den Einsatz als Textilbewehrung folgende Eigenschaften aufweisen [14]:

- Hohe Korrosionsbeständigkeit
- Hohe Dehnsteifigkeit
- Wirtschaftlichkeit
- Textile Bearbeitbarkeit
- Hohe Bruchdehnung
- Hohe Ermüdungsfestigkeit

Fasern können grundsätzlich in die Gruppen Chemiefasern und Naturfasern eingeteilt werden. Bei den Naturfasern gibt es tierische, pflanzliche und mineralische Fasern. Bei den Chemiefasern kann man weiter unterteilen in chemische Fasern aus natürlichen oder synthetischen Polyme-

ren und aus anorganischen Rohstoffen. Aufgrund der vielen Anforderungen an die Bewehrung wie eine hohe Zugfestigkeit, ein hoher Elastizitätsmodul, eine ausreichend große Bruchdehnung und geringe Kosten eignen sich besonders alkali-resistente (AR-) Glasfasern, Carbonfasern, Aramidfasern und Basaltfasern [23]. Da Aramidfasern und Basaltfasern im alkalischen Milieu nicht dauerhaft sind, haben sich Carbon- und Glasfasern als Ausgangsmaterial durchgesetzt [14]. Um das Verbundverhalten zwischen dem Multifilamentgarn und dem Beton und das Verbundverhalten zwischen den Filamenten zu verbessern, werden die textilen Strukturen in den meisten Fällen imprägniert. Diese Imprägnierung verbessert auch die Formstabilität der Bewehrung und das Verlegen in die Schalung [12]. Folgende Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über die Eigenschaften verschiedener Fasermaterialien.

Tab. 2.1: Mechanische Eigenschaften verschiedener Fasermaterialien [14]

Faser	Dichte [g/cm ³]	E-Modul [GPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Bruchdehnung [mm/m]
AR-Glas	2,7	76	2000	26
Carbon	1,73 – 1,96	200 – 500	1750 – 7000	3,5 – 24
Aramid	1,39 – 1,47	58 – 186	2760 – 3620	19 – 44
Basalt	2,75	89	2000 – 4840	3,15
B550	7,86	200	550	20

Zur Herstellung von Textilbewehrung werden zuerst die entsprechenden Fasern zu Verstärkungselementen gebündelt, mittels textilen Verarbeitungstechniken zu flächigen Gitterstrukturen verarbeitet und danach mit Epoxidharz, Styrol-Butadien oder Vinylesterharz getränkt. Die Wahl des Fasermaterials und der Tränkung hat großen Einfluss auf die Eigenschaften und das Tragverhalten des Verbundwerkstoffes. Verglichen mit Betonstahl, der eine Streckgrenze von 550 MPa aufweist, erreichen die Elemente abhängig von ihrem Ausgangsmaterial Zugfestigkeiten von bis zu 300 MPa bei Verwendung von Naturfasern, bis zu 1600 MPa bei Verwendung von AR-Glasfasern, bis zu 2500 MPa bei Verwendung von Basaltfasern und bis zu 3500 MPa bei Verwendung von Carbonfasern [12]. Da für den Betonbau vor allem AR-Glasfasern und Carbonfasern geeignet sind, wird im Folgenden nur auf diese eingegangen.

Aufgrund der Wirtschaftlichkeit ist die bewährteste Herstellungsmethode für flächige Textilien das Kettenwirken, bei dem Kettbahnen oder Gewebe mit Hilfe von Maschen oder Stricksystemen miteinander verbunden werden [12].

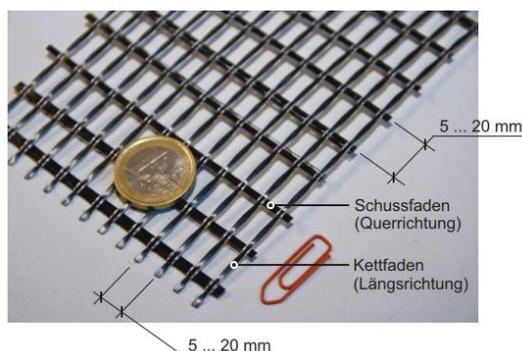


Abb. 2.6: Beispiel einer textilen Bewehrung [21]

2.2.2 Fasermaterialien

AR-Glas

Zur Herstellung von Glasfasern werden Quarzmehl, Kalkstein, Tongesteine und Colemanit bei etwa 1440 °C aufgeschmolzen. Durch Variierung der Ausgangsmaterialien und weiteren Additiven können verschiedene Glasfasertypen produziert werden. Zuzufolge des hohen Zirkonoxidanteils im AR-Glas weist dies eine hohe Beständigkeit im alkalischen Milieu auf und wird deshalb als Bewehrung in Betonbauteilen verwendet. Die Herstellung von Glasfasern erfolgt im Düsenziehverfahren, bei der die Schmelze in einer Wanne bei 1200 °C gehalten wird. Die Glasfäden werden durch ein Platinblech, das am Boden der Wanne liegt und kleine Öffnungen hat, herausgezogen. Der Faserdurchmesser, der zwischen 13 und 27 µm beträgt, kann durch die Herausziehggeschwindigkeit bestimmt werden. Beim Düsenziehverfahren werden vor allem Endlosfasern hergestellt. Sobald die Filamente ausgekühlt sind, werden sie mit einer Schlichte versehen und zu Multifilamentgarnen – sogenannten Rovings – zusammengefasst. Die Schlichte hat einen großen Einfluss auf die Verbundeigenschaften der Filamente und ermöglicht die Weiterverarbeitung der Glasfasern.

Die Glasfasern haben eine Zugfestigkeit von bis zu 1700 N/mm² bei einer Dichte von etwa 2,7 g/cm³ und einem E-Modul von 70-80 kN/mm². Die Anzahl der Filamente eines Rovings variiert abhängig vom Titer, der das Maß für die Feinheit darstellt und in tex angegeben wird (1 tex = 1 g/km) [23].

Carbonfasern

Das Ausgangsmaterial für Carbonfasern bildet hauptsächlich synthetisches Polymer-Polyacrylnitril (PAN). Die Herstellung gliedert sich in Stabilisierung (Oxidation), Carbonisierung und Graphitierung der Fasern, die im Nassspinnverfahren gewonnen werden. Die Carbonisierung erfolgt bei 1200 bis 1700 °C und bewirkt, dass fast alle Nichtkohlenstoffatome abgespalten werden. Die Zugfestigkeit von HT-Fasern (HT = High Tenacity) liegt zwischen 3000 und 5000 N/mm² bei einem E-Modul von 200 bis 250 kN/mm². Durch die Graphitierung bei Temperaturen von 1800 bis 3000 °C nach der Carbonisierung ergeben sich HM-Fasern (HM = High Modulus), die einen E-Modul von 350 bis 450 kN/mm² besitzen. Carbonfasern weisen anisotrope Eigenschaften mit hohen Festigkeiten und Steifigkeiten in Faserrichtung auf. Weiters sind die Fasern hydrophob und widerstandsfähig gegenüber Säuren sowie alkalischen und organischen Lösungen.

Die Nachfrage nach Carbonfasern steigt durch zunehmende Substitution üblicher Materialien an und findet im Baubereich vor allem in Form von CFK-Lamellen ihre Anwendung. Die Luft- und Raumfahrtindustrie sowie die Automobilindustrie und der Hochleistungssport setzen schon länger auf die speziellen Eigenschaften der Carbonfasern und setzen diese vor allem in Faserverbundwerkstoffen ein.

Absolut betrachtet sind die Carbonfasern im Vergleich zu Glasfasern teurer, das Kosten/Nutzen-Verhältnis verschiebt sich jedoch unter Berücksichtigung der geringeren Dichte (1,78 g/cm³), der besseren Dauerhaftigkeit und der besseren mechanischen Eigenschaften [23].

2.2.3 Konstruieren mit Textilbeton

Da Textilbeton und Stahlbeton wesentliche Konstruktionsmerkmale teilen, ist Textilbeton wie miniaturisierter Stahlbeton zu betrachten. Bei beiden werden die Druckkräfte durch den Beton abgetragen und die auftretenden Zugkräfte bei Erreichen der Betonzugfestigkeit durch die Bewehrung [21]. Ein großer Vorteil ist, dass es durch die Herstellung dreidimensionaler Textilien

möglich ist, die Zugbewehrung genau dort zu platzieren wo sie gebraucht wird. Der Wirkungsgrad der eingelegten textilen Fasern kann durch eine passgenaue Anordnung in Zugspannungsrichtung gesteigert werden [19]. Die Bewehrung muss im Stande sein, die freiwerdende Betonzugkraft aufzunehmen, wenn es zur Rissbildung kommt. Dazu wird die Bewehrung entsprechend dem Kraftfluss parallel und in Nähe zur Oberfläche in erforderlicher Menge eingebaut [21].

Ein wesentliches Merkmal, das Textilbeton von Stahlbeton unterscheidet, ist der Maßstab. Vereinfacht ausgedrückt sind alle Dimensionen beim Textilbeton um eine Größenordnung kleiner als bei Stahlbeton. Der Durchmesser von Stab- und Mattenstahl beträgt statt 6 bis 32 mm bei Textilbewehrung nur 0,6 bis 2,5 mm. Das Größtkorn reduziert sich von 8 bis 32 mm auf 1 bis 4 mm und die Stababstände betragen bei Verwendung von Textilien 5 bis 25 cm. Durch diese kleinere Größenordnung ergeben sich typische Bauteildicken von Textilbeton im Bereich 10 bis 30, maximal 50 mm [21]. Durch die besonderen Eigenschaften von textilbewehrtem Beton stellt dieser eine Konkurrenz zum klassisch stahlbewehrten Beton dar und wird diesen in Zukunft sogar in einigen Bereichen ersetzen [19].

Im Vergleich zu kurzfaserbewehrtem Beton ergeben sich bei einer Textilbewehrung aus Glas-, Aramid- oder Carbon-Fasern höhere Festigkeiten bei gleichzeitig duktilerem Verhalten. Durch das im Vergleich zu Stahl geringere plastische Arbeitsvermögen der Glas- und Kohlenstofffasern weist Textilbeton ein sprödes Versagensverhalten auf. Aus bautechnischer Sicht ist dieses Verhalten der Fasern negativ zu beurteilen, da sich ein Versagen nicht wie bei Stahlbeton durch deutlich sichtbare Risse ankündigt. Besonders bei gering bewehrten Bauteilen kommt es zu plötzlichem Versagen ohne Vorankündigung. Trotz des spröden Verhaltens der einzelnen Komponenten des Textilbetons, ergibt sich durch die hohe Bruchdehnung der Bewehrung und der geringen Steifigkeit der Bauteile eine gewisse Verformungskapazität, die eine Versagensankündigung ermöglicht [19]. Neben dem Verbundverhalten zwischen Faserbündel und Feinbetonmatrix ist für das Tragverhalten vor allem die Art, Menge und Orientierung der textilen Bewehrung sowie die Querschnittsform der Bewehrungstextilien von besonderem Interesse [19].

Aufgrund der geringen Dicke und der geringen Maschenweite des textilen Gewebes wird bei Textilbeton meist Feinbeton verwendet. Dieser ist für die Übertragung der Druckkräfte verantwortlich und verhindert das Ausknicken der Bewehrung. Der Beton muss als Matrixmaterial eine möglichst fließfähige Konsistenz für die Herstellung haben sowie bei Verwendung von AR-Glasfilamenten eine geringe Alkalität besitzen [19].

2.3 Zementreduzierte Betone

Seit vielen Jahren nimmt die politisch forcierte Nachhaltigkeitsdebatte auch im Bereich des Bauwesens und speziell im Betonbau einen breiten Raum ein. Bei der Herstellung von Baustoffen, in diesem Fall besonders bei Beton, werden Treibhausgase ausgestoßen wobei bei Beton vor allem die Produktion von Zement für diese Emissionen verantwortlich ist [3].

Zement ist ein anorganisches, nichtmetallisches, fein gemahlene, hydraulisches Bindemittel, das die Eigenschaften von Beton im Wesentlichen bestimmt. Mischt man Zement mit Wasser, entsteht Zementleim. Der Zementleim, der die zugefügten Gesteinskörnungen zu Beton verklebt, erstarrt durch Hydratation und erhärtet. Dieser erhärtete Zementleim, der selbst im Wasser fest und raumbeständig bleibt, wird Zementstein genannt. Portlandzementklinker, der in einem chemisch-mineralogischen Umwandlungsprozess erzeugt wird, bildet den Hauptbestandteil von

Zement. Die Zementherstellung unterliegt hohen Umweltstandards und bietet vielfältige Möglichkeiten zur Verwertung von passenden Sekundärstoffen.

Um die Herstellung von Zement nachhaltiger und ressourceneffizienter zu gestalten, bieten sich grundsätzlich drei Strategien an [8]:

- Ersetzen von primären Energieträgern durch Sekundärbrennstoffe
- Verwendung von Sekundärrohstoffen aus anderen Industrien anstelle der primären Rohstoffe
- Substitution von Portlandzementklinker

Letztere findet bereits in großem Umfang statt – Portlandzementklinker wird beispielsweise durch Hüttensand, Flugasche oder auch Kalksteinmehl substituiert. Dieser Austausch erschwert die Beherrschung der Frischbetoneigenschaften und hat eine veränderte Festigkeitsentwicklung sowie veränderte Verformungseigenschaften zur Folge [24].

Die Norm EN 197-1 [25] regelt europaweit die Zusammensetzung, die Eigenschaften und die Anforderungen bei Normalzementen. Der Norm entsprechend gibt es fünf Hauptzementarten: CEM I (Portlandzement), CEM II (Portlandkompositzement), CEM III (Hochofenzement), CEM IV (Puzzolanzement) und CEM V (Kompositzement). Je nach Anforderung können die Zementarten in den Festigkeitsklassen 32,5, 42,5, und 52,5 mit jeweils schneller (R) und normaler (N) Festigkeitsentwicklung produziert werden [26].

Um Betone besonders nachhaltig herzustellen, stehen dem Betontechnologen dafür zwei Möglichkeiten zur Verfügung: entweder Herstellen von hochfesten Betonen oder Herstellen von niederfesten und gleichzeitig bindemittelarmen Betonen. Erstere weisen zwar einen hohen Bindemittelgehalt auf, haben jedoch bezogen auf ihre Leistungsfähigkeit eine geringere Umweltwirkung, solange ihre Leistungsfähigkeit im Bauwerk auch tatsächlich ausgeschöpft wird. Sind aus statischer oder anderer Sicht keine hohen Druckfestigkeiten im Bauteil zu erwarten, bietet sich die Verwendung von sogenannten Ökobetonen an. Ökobeton zeichnet sich aus durch einen im Vergleich zu Normalbeton deutlich reduzierten Portlandzementklinkergehalt und durch Zugabe von Betonzusatzstoffen wie zum Beispiel Hüttensand oder Flugasche. Durch Substitution des Portlandzementklinkers ergeben sich für Ökobetone andere Eigenschaften wie zum Beispiel eine deutlich reduzierte hydraulische Reaktivität. Um einen äquivalenten w/z -Wert beizubehalten, muss die Menge des Anmachwassers reduziert werden. Die Reduktion des Anmachwassers wirkt sich wiederum auf die Verarbeitbarkeit des Betons aus und somit muss bei der Produktion von Ökobeton eine ausreichende Verarbeitbarkeit bei minimalem Gehalt an Wasser bzw. Zementleim gewährleistet werden [27].

Die Entwicklung von klima- und ressourcenschonenden Ökobetonen hat das primäre Ziel die Ökobilanz des Betons zu verbessern und gleichzeitig die erforderlichen technischen Eigenschaften sicherzustellen. Um die Betone möglichst wirtschaftlich herzustellen ist auf die Ressourcenverfügbarkeit der Ausgangsstoffe zu achten, die jedoch in der Ökobilanz bislang noch keinen Einzug gefunden haben.

Die Vorgehensweise zur Entwicklung eines Ökobetons ist folgende: ausgehend von einer praxiserprobten Standardrezeptur werden im ersten Schritt Zemente mit hoher Festigkeitsklasse gewählt. Diese Zemente haben vorzugsweise neben Portlandzementklinker andere Hauptbestandteile wie zum Beispiel Kalksteinmehl oder Hüttensand. Danach wird der Wassergehalt der Mischung bis zur Verarbeitbarkeitsgrenze gesenkt und das zufolge der Reduzierung des Wassergehalts fehlende Leimvolumen durch geeignete Betonzusatzstoffe ersetzt. Neben den Zusatz-

stoffen ist die Zugabe von Hochleistungsfließmitteln notwendig. Es ist darauf Acht zu geben, dass die gewünschten Eigenschaften der Festigkeit und Dauerhaftigkeit erfüllt werden. Abbildung 2.7 zeigt den schematischen Ablauf der Ökobetonherstellung [3].

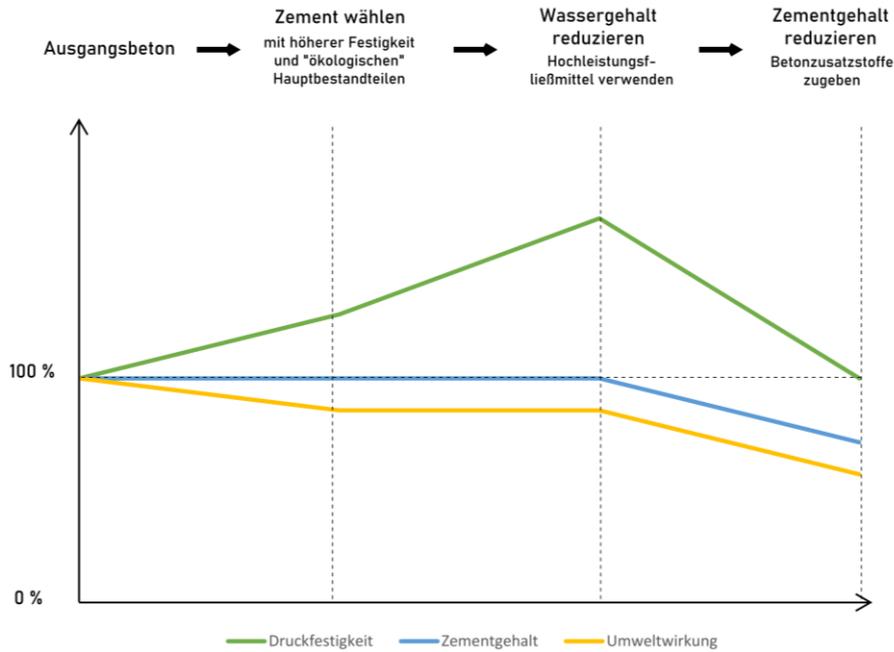


Abb. 2.7: Vorgehensweise bei dem Entwickeln zementreduzierter Ökobetone [3]

Anhand von Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass durch eine gute Anpassung der Betonzusammensetzung auch bei Ökobetonen eine hohe Leistungsfähigkeit möglich ist. Durch den erhöhten Gesteinskorngehalt ergeben sich bei Ökobetonen ein größerer E-Modul als bei Normalbeton, der bei der Bemessung berücksichtigt werden muss [27].

Zur Beurteilung der Nachhaltigkeit eines Betons werden die Umwelteinwirkungen betrachtet, die mit der Betonherstellung einhergehen. Diese Umwelteinwirkungen können nach [28] in Form einer Ökobilanz festgestellt und gegenübergestellt werden. Die reine Gegenüberstellung und der Vergleich der Ökobilanzkennwerte verschiedener Betone sollte jedoch mittels der Leistungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit des Betons normiert werden, da der Vergleich sonst nur bedingt zielführend ist [29]. Im Rahmen dieser Arbeit werden in Kap. 3.5 zur Gegenüberstellung der Betonsorten nur die Ökobilanzkennwerte der Ausgangsmaterialien herangezogen.

Tabelle 2.2 zeigt eine Übersicht und die Zusammensetzung bereits entwickelter Ökobetone für Innenbauteile und zum Vergleich Referenzbetone [3].

Tab. 2.2: Übersicht entwickelter Betone für Innenbauteile [3]

Mischung	Ökobeton I.XC1	Ökobeton II.XC1	Ökobeton III.XC1	Referenzbeton Ref.I.XC1	Werksbeton Werk.I.XC1
Zement	CEM I	CEM II	CEM III	CEM I	CEM I
Expositionsklasse	XC1	XC1	XC1	XC1	XC1
Zement [kg/m ³]	140	140	180	240	260
Kalksteinmehl [kg/m ³]	210	210	160	30	0
Flugasche [kg/m ³]	21	21	27	0	40
Fließmittel [kg/m ³]	3,6	3,9	2,0	1,0	1,3
Gesamtwasser [kg/m ³]	≤135	≤135	≤135	180	175
Festigkeitsklasse	C20/25	C20/25	C20/25	C16/20	C20/25

Wie in Tabelle 2.2 und Abb. 2.8 zu sehen ist, ist eine Reduzierung des Zementgehalts für Ökobetone für Innenbauteile von 260 kg/m³ auf 140 kg/m³ möglich.

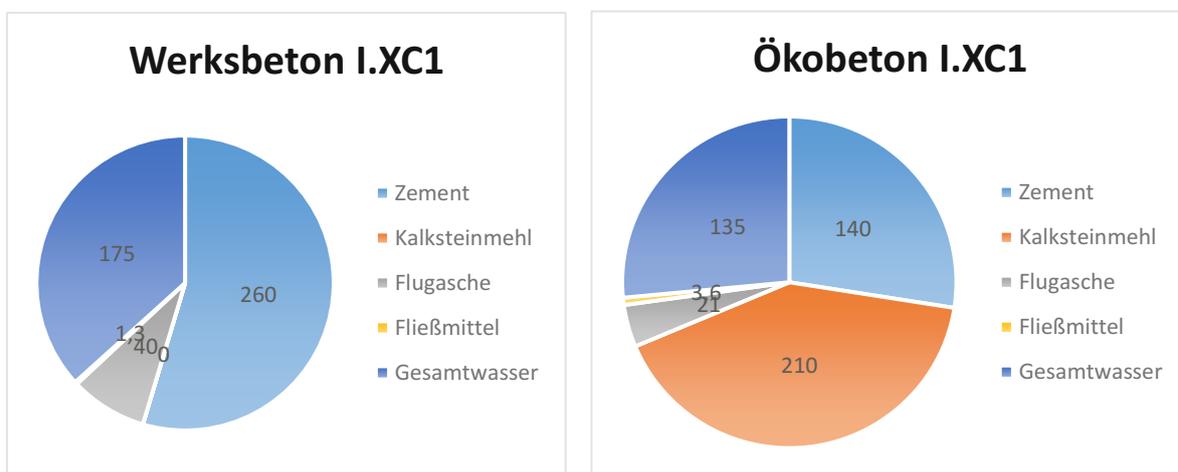


Abb. 2.8: Vergleich der Zusammensetzung Werksbeton und Ökobeton für Expositionsklasse XC1 [3]

Tabelle 2.3 zeigt eine Gegenüberstellung von entwickelten Ökobetonen für Außenbauteile. Dabei ist zu sehen, dass eine Reduzierung des Zementgehalts von 310 kg/m³ auf 180 kg/m³ möglich ist.

Tab. 2.3: Übersicht entwickelter Betone für Außenbauteile [3]

Mischung	Ökobeton I.XC4	Ökobeton II.XC4	Ökobeton III.XC4	Referenzbeton Ref.III.XC4	Werksbeton Werk.I.XC4
Zement	CEM I	CEM II	CEM III	CEM III	CEM I
Expositionsklasse	XC4, XF1, XA1	XC4, XF1, XA1	XC4, XF1, XA1	XC4, XF1, XA1	XC4, XF1, XA1
Zement [kg/m ³]	180	180	220	280	310
Kalksteinmehl [kg/m ³]	140	140	120	0	0
Flugasche [kg/m ³]	50	50	30	0	50
Fließmittel [kg/m ³]	3,8	4,1	2,3	2,0	2,5
Gesamtwasser [kg/m ³]	≤135	≤135	≤135	168	179
Festigkeitsklasse	C30/37	C30/37	C30/37	C25/30	C30/37

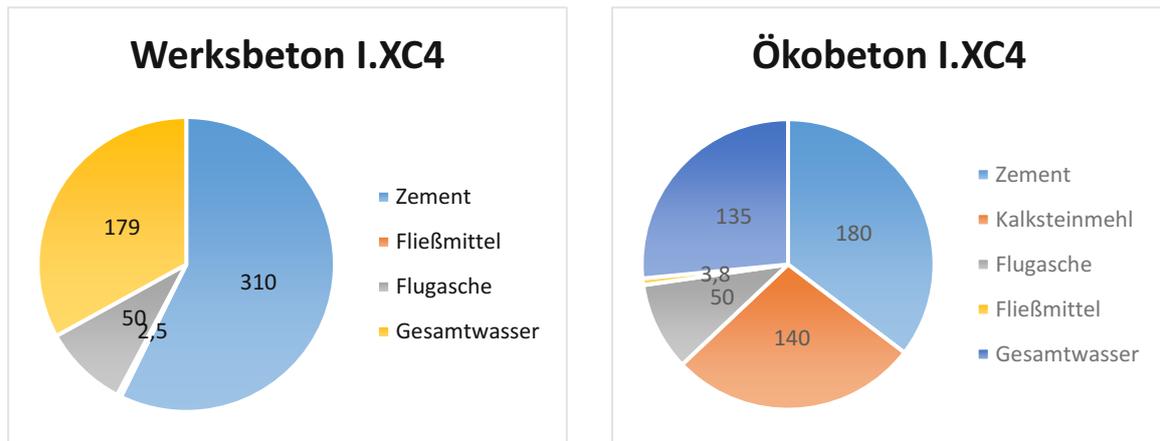


Abb. 2.9: Vergleich der Zusammensetzung Werksbeton und Ökobeton für Expositionsklasse XC4 [3]

Die entwickelten zementreduzierten Betone weisen hinsichtlich der bemessungsrelevanten mechanischen Festbetoneigenschaften ähnliche Festigkeiten wie konventionelle Betone der Festigkeitsklassen C20/25 bis C30/37 auf. Die Zugfestigkeiten und die E-Moduln liegen dabei etwas höher als bei konventionellen Betonen. Durch den geringen Wassergehalt der Ökobetone ergibt sich eine verminderte Schwindneigung, was als besonders vorteilhaft gegenüber konventionellen Betonen anzusehen ist. Außerdem besitzen die Betone eine verringerte Hydratationswärmeentwicklung, was vor allem bei der Herstellung verformungsbehinderter und massiger Bauteile von großem Vorteil ist. Verglichen mit praxisüblichen Werksbetonen bei sonst gleichen Umgebungsbedingungen reduzierte sich der Temperaturanstieg um mindestens 30 % [3].

Kapitel 3

Optimierung von profilierten Tragwerken

Anhand eines von Kromoser et al. [12] entwickelten Betonträgers mit textiler Bewehrung der in Kapitel 3.1 näher beschrieben wird, wird eine Strukturoptimierung mit dem Ziel der Zement einsparung durchgeführt. Der Träger wurde im Original aus Hochleistungsmaterialien wie UHPC und textiler Bewehrung zur Reduzierung des Eigengewichts und des Materialverbrauchs hergestellt. Im Rahmen dieser Arbeit werden ausgehend von diesem Träger verschiedene Ansätze zur Reduzierung der ökologischen Auswirkungen verfolgt. Zuerst wird der Betonquerschnitt im höchstbeanspruchten Bauteilbereich so optimiert, dass er in allen Bereichen maximal ausgenutzt wird und Material eingespart werden kann. In weiterer Folge wird der Ultrahochleistungsbeton (UHPC) mit seinem hohen Zementanteil durch zementärmere Betone ersetzt und über die Länge des Trägers lokal abgestuft. Dadurch wird erzielt, dass die Betonsorten mit höherer Festigkeit und damit einhergehend höherem Zementanteil nur in den Abschnitten eingesetzt werden, wo diese aufgrund der Einwirkung auch benötigt werden. In den gering beanspruchten Regionen kann Beton mit niedrigeren Festigkeiten verwendet werden, wodurch eine Menge Zement eingespart werden kann. Zum Vergleich des Einsparpotenzials des Zements und der daraus resultierenden reduzierten Emissionen, wird in Kapitel 3.5 eine Ökobilanz aufgestellt.

3.1 Ausgangssituation

3.1.1 Strukturoptimierung

In Kromoser et al. [12] wurde ein Träger aus UHPC mit Bewehrung aus kohlenstofffaserverstärkten Polymeren hinsichtlich Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit untersucht. Durch Verwendung von Carbonbewehrung und UHPC ergeben sich sowohl eine hohe Zugfestigkeit (bis zu 3500 MPa) als auch eine hohe Druckfestigkeit (über 150 MPa). Bei einem effizienten Einsatz dieser leistungsstarken Materialien ergibt sich eine wesentliche Reduktion des Baumaterials und damit einhergehend des Bauteilgewichts, woraus ein geringerer Transportaufwand sowie ein leichter Hebevorgang in Vorfertigungsanlagen und auf der Baustelle resultiert.

Faserverbundkunststoffe (FVK) sind bereits seit 25 Jahren bekannt, haben sich aufgrund des hohen Preises bis dato in der Baubranche nicht durchgesetzt. Durch den steigenden Verbrauch natürlicher Ressourcen und den hohen Treibhausgasemissionen wurde jedoch im letzten Jahrzehnt die Forschung wieder aufgenommen. In Kromoser et al. [12] konnte gezeigt werden, dass durch den Einsatz von FVK-Stabbewehrung als Biegebewehrung in Kombination mit flachen, vorgeformten FVK-Textilien als Schub-, Biege- und Strukturbewehrung, trotz des hohen Energiebedarfs für die Herstellung von Carbonfasern und UHPC ein Vorteil gegenüber klassischen Pendants in ökologischer und ökonomischer Hinsicht erzielt werden kann [12].

Ein effizienter Einsatz der Materialien wurde durch eine vorangegangene Strukturoptimierung erzielt. Der Begriff Strukturoptimierung bezeichnet die rechnerische Optimierung von Bauteilen und Tragwerken bezüglich eines oder mehrerer Optimierungsziele. Dabei werden die mechanischen Beanspruchungen und Beanspruchbarkeiten besonders berücksichtigt. Bereits Galilei beschäftigte sich mit dem Thema Strukturoptimierung und hat im Jahr 1638 einen Balken durch einen dem Biegespannungsverlauf angepassten Querschnitt untersucht, um sein Gewicht zu minimieren. Vor allem für den Entwurf und der Auslegung von Bauteilen im Maschinen- und Fahrzeugbau sowie in der Luft- und Raumfahrtindustrie stellt die Strukturoptimierung ein etabliertes Werkzeug dar. Die Strukturoptimierung wird aber auch für den Entwurf von Bauwerken zur Lösung komplexer Aufgabenstellungen angewendet. Durch diese Methode können das mechanische Verhalten von Bauteilen und Tragwerken in vielerlei Hinsicht, je nach Zielsetzung, effektiv verbessert werden. Zweck der Strukturoptimierung ist demnach der optimale Einsatz von Materialien, um in der Regel ein möglichst wirtschaftliches Bauteil herzustellen und um Grenzen der Werkstoffe zu ermitteln und zu erweitern. Vor allem im Leichtbau dient die Strukturoptimierung durch die Reduzierung des Eigengewichts der Einsparung von Rohstoffen. Außerdem kann ein gezielter Einsatz von Werkstoffen eine höhere Steifigkeit bewirken. Eine Möglichkeit, um für bestimmte Anwendungen die optimalen Materialien zu finden, ist die Kombination von verschiedenen Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften. Der bekannteste Vertreter solch einer Kombination ist wohl der Stahlbeton, der heute nicht mehr wegzudenken ist. Beim Stahlbeton werden die Eigenschaften des duktilen Stahls mit denen des spröden, aber kostengünstigen Betons verbunden [19].

Im Rahmen der Forschungstätigkeit wurde das Tragverhalten von zwei strukturoptimierten Betonträgern untersucht, die als I-Träger ausgeführt wurden, um die Vorteile des optimierten Designs von Stahlträgern auszunutzen. Die Träger sollen laut Autoren als Alternative zu Stahlträgern bei der Renovierung von Altbauten und als Stützbalken dienlich sein. Als Grenzwerte wurde eine maximale Höhe von 260 mm und eine Breite von 300 mm vorgesehen. Der kleinere Träger – Konfiguration 1 – weist die produktionsbedingt minimal zulässige Stegdicke von 30 mm auf, während der größere Träger – Konfiguration 2 – eine Stegdicke von 40 mm aufweist. Die Träger wurden auf positive Biegemomente ausgelegt. Zur Aufnahme der Zugkräfte wurden hochfeste CFVK-Stäbe im Zuggurt angeordnet während die hohe Druckfestigkeit des UHPC es ermöglichte einen sehr schlanken Druckgurt auszuführen. Als zusätzliche Spaltzugbewehrung dient der FVK-Textilbewehrungskorb rund um die CFK-Stäbe. Für beide Träger wurde das Verhältnis von Betondeckung zu Durchmesser des CFK-Stabs mit 2,5 gewählt. Die Abmessungen und die Bewehrungsführung der zwei Träger sind in Abbildung 3.1 dargestellt.

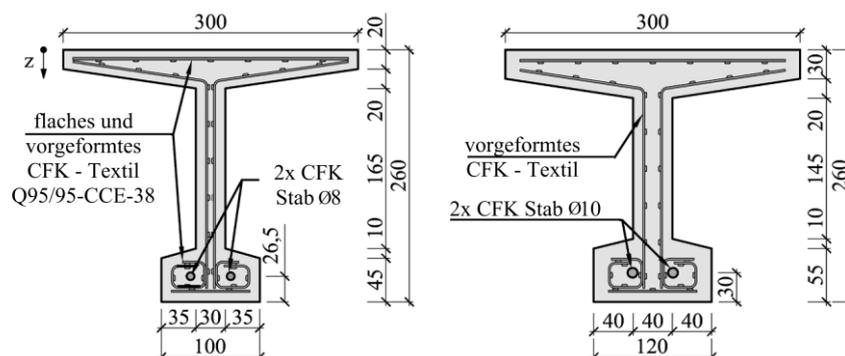


Abb. 3.1: Abmessungen und Bewehrungslayout der zwei Träger [30]

Zur Ermittlung der Biegetragfähigkeit wurden die CFK-Stäbe und die Rovings in der Zugzone herangezogen. Die Ergebnisse der Momententragfähigkeit sind in Tabelle 3.1 angeführt [12].

Tab. 3.1: Maximale Momententragfähigkeit der beiden Träger [12]

	Textil	CFK - Stab	Bemessungswert Biegemoment [kNm]
Konfiguration 1	Q95/95-CCE-38	Ø8	52,28
Konfiguration 2	Q95/95-CCE-38	Ø10	69,25

Im Rahmen der Diplomarbeit werden zur Optimierung des Bauteils die Abmessungen des kleineren Trägers – Konfiguration 1 – mit CFK-Stabdurchmesser Ø8 mm herangezogen. Das größte aufnehmbare Moment wird deshalb mit 52,28 kNm angenommen.

3.1.2 Materialien

Die in der Studie verwendeten Materialien sind nachfolgend kurz beschrieben.

Beton

Als Matrix wurde ein Ultrahochleistungsbeton (engl. ultra-high-performance concrete UHPC) verwendet. UHPC besitzt eine sehr dichte Mikrostruktur, weswegen dieser eine sehr hohe Druckfestigkeit (über 150 MPa) bei einer vergleichsweise geringen Zugfestigkeit (6-15 MPa) aufweist. Außerdem zeichnet UHPC ein sprödes Zug- und Druckbruchverhalten aus. Durch die dichte Mikrostruktur ist Ultrahochleistungsbeton sehr dauerhaft und widerstandsfähig gegen chemische und mechanische Angriffe sowie Umwelteinflüsse. Diese Eigenschaften ermöglichen es, die Betondeckung auf ein Minimum zu reduzieren.

Die dichte Mikrostruktur wird erreicht durch Reduzierung des Wasser-Bindemittel-Verhältnisses (W/B Wert) auf etwa 0,20 und Zugabe feiner inerter und reaktiver Partikel. Um eine dichte räumliche Struktur zu erhalten und die Kapillarbildung zu verhindern wird die Größe der Partikel an die Sieblinie angepasst. Da das Wasser-Bindemittel-Verhältnis so niedrig ist, müssen Fließmittel zugegeben werden damit der Beton gut verarbeitbar ist und eine ausreichende Viskosität aufweist. Zur Darstellung von UHPC wird deswegen das typische Drei-Phasen-Modell (Wasser, Zement, Gesteinskörnung) in ein Fünf-Phasen-Modell (Wasser, Zement, Gesteinskörnung, Fließmittel, Zusatzmittel) ausgeweitet [12].

In Tabelle 3.2 ist die Zusammensetzung des im Forschungsvorhaben gewählten UHPCs dargestellt [12]. Ersichtlich ist, dass UHPCs einen sehr hohen Zementgehalt aufweisen, der sich aus ökologischer Sicht, trotz der hohen Druckfestigkeit, nachteilig auswirken kann.

Tab. 3.2: Bestandteile des UHPC pro m³ [12]

Bestandteil	Menge (kg)
Wasser	10
Fließmittel 1	40
Fließmittel 2	20
Entschäumer	1
Zement (CEM I 52,5 NC3A-frei)	750
Schrumpfkondensator	40
Reaktive Zusatzmittel (Microsilica)	310
Inerte Zusatzmittel (Kalksteinmehl)	200
Quarzsand 0,1-0,5 mm	490
Quarzsand 1,0-1,6 mm	490

Bewehrung

Im Rahmen der Forschungstätigkeit wurden drei verschiedene Typen von mit Epoxidharz getränkten Carbontextilien der Firma Solidian GmbH getestet, die sowohl als Schub-, Biege-, Spaltzug- als auch konstruktive Bewehrung eingesetzt wurden. Es wurden Maschenweiten von 25 und 38 mm gewählt mit einer Verstärkungsfläche von 95 bzw. 142 mm²/m. Für die Parameterstudie, aus der die höchste Bruchkraft resultiert, wurde das Textil Typ 1 – Q95/95-CCE-38 – verwendet. Deswegen wird in dieser Arbeit auch dieser Typ eingesetzt. Die technischen Daten der textilen Bewehrung sind in Tabelle 3.3 gegeben.

Tab. 3.3: Technische Daten der textilen Bewehrung [12]

Beschreibung	Solidian GRID Q95/95-CCE-38
Fasermaterial	Carbon
Tränkungsmaterial	Epoxidharz
Achsabstand Strang [mm]	38
Querschnittsfläche Einzelstrang [mm ²]	3,62
Bewehrungsquerschnittsfläche [mm ² /m]	95
Bruchspannung charakteristisch Längsrichtung [N/mm ²]	2.300
Bruchspannung charakteristisch Querrichtung [N/mm ²]	2.000
E-Modul [N/mm ²]	220.000

Als Zugbewehrung im Untergurt wurden Carbonstäbe mit den Durchmessern 8 und 10 mm eingesetzt. Die technischen Daten zu den Carbonstäben sind in Tabelle 3.4 aufgelistet. Aufgrund der einfachen Produktion entschieden sich die Autoren im Rahmen der Forschung für die Verwendung von sandbeschichteten FVK-Stäben. Durch Aufrauen der Staboberfläche und überziehen mit Epoxidharz und anschließendem Bestreuen mit Quarzsand wurde die Sandbeschichtung hergestellt. UHPC als Matrix zeigt im Hinblick auf das Verbundverhalten zu FVK-Stäben hervorragende Eigenschaften auf. Durch die feine Sieblinie und die dichte Struktur entstehen kaum Kapillaren, die den Verbund zwischen Beton und Stab schwächen würden [12].

Tab. 3.4: Technische Daten der textilen Stabbewehrung [12]

	Carbonstab Ø8mm	Carbonstab Ø10mm
Zugfestigkeit charakteristisch [N/mm ²]	1.680	1.680
Bemessungswert Zugfestigkeit [N/mm ²]	1.344	1.344
Teilsicherheitsbeiwert	1,25	1,25
E-Modul [N/mm ²]	161.000	161.000

3.2 Optimierungsstrategie

Der im vorigen Abschnitt vorgestellte Träger aus Kromoser et al. [12] weist ein geringes Gewicht und eine hohe Leistungsfähigkeit auf. Aufgrund des hohen Zementgehalts des UHPC's ist aber weiteres Optimierungspotenzial in ökologischer Hinsicht gegeben.

Der Träger - Konfiguration 1 - aus Kromoser et al. [12] wird deshalb hinsichtlich des Querschnitts und der Betonzusammensetzung optimiert, um einen geringeren Emissionsausstoß zu bewirken. Dazu wurde der T-Querschnitt des Betonträgers mit dem Programm INCA2 so auf Biegung bemessen, dass die Druckzone im Obergurt bleibt und jeder Teil des Querschnitts möglichst gut ausgenutzt wird. Zu diesem Zweck werden die einzelnen Querschnittsteile – Obergurt, Steg, Untergurt – mit einer jeweils anderen, der Festigkeitsanforderung angepassten Betonsorte versehen. Es werden drei verschiedene Betonmischungen mit unterschiedlichen Festigkeiten ausgewählt, die im Unterschied zu dem in Kromoser et al. [12] verwendeten UHPC geringere Zementmengen und somit eine bessere Ökobilanz haben. Für niedrige Festigkeitsanforderungen wird der Ökobeton ILXC1 [27] mit einer charakteristischen Druckfestigkeit von ca. 30 N/mm² gewählt. Für mittlere Festigkeitsanforderungen der C3-B2-NF-1-150-8 [31], der speziell für das Großprojekt Carbon Concrete Composite C³ entwickelt wurde und eine charakteristische Druckfestigkeit von ca. 70 N/mm² besitzt. Für hohe Festigkeitsanforderungen kommt der C3-B2-HF-2-145-5 [31], ebenso aus dem Projekt C³, mit einer charakteristischen Druckfestigkeit von etwa 120 N/mm² zum Einsatz. Für eine genaue Beschreibung der Betonsorten wird auf Kap. 3.3.2 und 4.1 verwiesen.

Der ursprüngliche Trägerquerschnitt aus Kromoser et al. [12] hat einen breiten Obergurt, der nicht vollständig ausgenutzt wird. Da der Obergurt die größte Druckbeanspruchung erhält wird für diesen der Beton mit der höchsten Druckfestigkeit (C3-B2-HF-2-145-5) verwendet. Unter der Annahme, dass das Bauteil auf Biegung beansprucht wird und die Druckzone im Obergurt bleibt, wird mit Hilfe des Programms INCA2 der Querschnitt so angepasst, dass der Druckgurt maximal ausgenutzt ist (siehe Kap. 3.3.3).

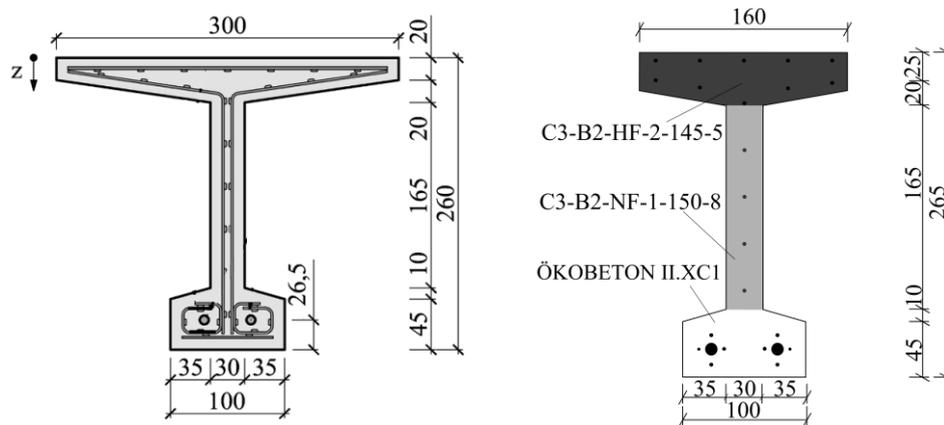


Abb. 3.2: Abmessungen des Originalträgers [12] (links) und des optimierten Trägers in Feldmitte (rechts)

Neben der Optimierung des Querschnitts wird der Träger zur Einsparung des Zements lokal über die Länge abgestuft. Durch eine Gradierung des Trägers mit den unterschiedlichen Betonorten kann eine erhebliche Menge Zement und somit schädliche Emissionen eingespart werden. Eine genaue Veranschaulichung der Gradierung folgt in Kapitel 3.4.

In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass der Träger mit einer Gleichstreckenlast belastet wird. Daraus ergibt sich in Trägermitte eine hohe Druckbeanspruchung im Obergurt und in Auflagernähe eine höhere Beanspruchung des Stags. Da im Untergurt Zugspannungen vorherrschen und diese von der Carbonbewehrung aufgenommen werden, ist die Festigkeit des Betons im Untergurt von geringer Bedeutung. Dies gilt speziell für FVK-bewehrte Bauteile, da hier geringere Anforderungen an die Rissbreiten gestellt werden.

Um die Bauteile bezüglich Emissionen vergleichen zu können, wird für den originalen Querschnitt und für den gradierten Querschnitt eine Ökobilanz aufgestellt. Bei der Ökobilanz werden nur die Werte der Betonausgangsstoffe berücksichtigt, auf die Lebensdauer bzw. Dauerhaftigkeit wird nicht Bezug genommen. Die Ökobilanz ergibt sich aus einigen Parametern, wobei im Rahmen dieser Arbeit der Vergleich des Treibhauspotenzials (GWP) der wichtigste Indikator ist. Der Vergleich der Ökobilanz erfolgt in Kapitel 3.5.

3.3 Bestimmung der Tragfähigkeit

Wie bereits in Kapitel 3 beschrieben, wird der optimierte Träger auf Grundlage von der maximal aufnehmbaren Last des Originalträgers bemessen.

Grundsätzlich ist es das Ziel der Optimierung, die Tragfähigkeit des ursprünglichen Trägers aus Kromoser et al. [12] bei gleichzeitiger Verbesserung des Ausnutzungsgrades und der Ökobilanz beizubehalten. In diesem Kapitel wird die Tragfähigkeit des optimierten Trägers untersucht, um die Annahme der gleichen Belastbarkeit zu bestätigen. Für die Berechnung wird vom statischen System des Einfeldträgers mit einer Spannweite von 6 m und einer Gleichstreckenlast ausgegangen. Für diese Aufgabenstellung wird das maximal aufnehmbare Moment aus Kromoser et al. [12] herangezogen, um eine Querschnittsoptimierung unter Beibehaltung der Biegetragfähigkeit des ursprünglichen Querschnitts zu machen. In weiterer Folge wird die einwirkende Gleichlast rückgerechnet und die maximale Querkraft für den Querkraftnachweis ermittelt. Abbildung 3.3 zeigt das statische System und den Querschnitt des bereits optimierten, zu untersuchenden Trägers.

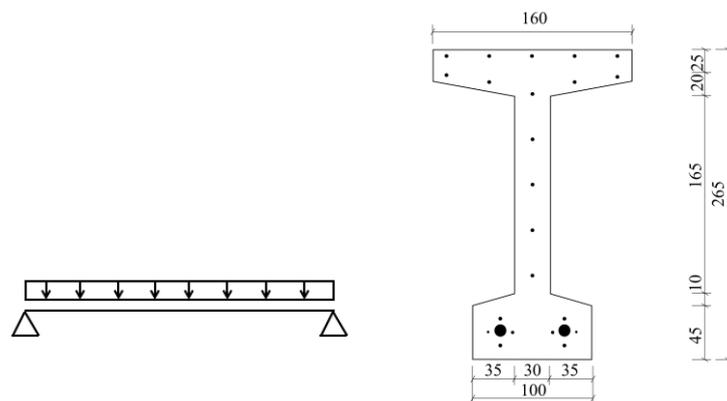


Abb. 3.3: statisches System und optimierter Querschnitt

3.3.1 Materialeigenschaften und Sicherheitskonzept

Der Träger wird mit den Betonsorten Ökobeton II.XC1 [3], C3-B2-NF-1-150-8 [32] und C3-B2-HF-2-145-5 [33] hergestellt und mit dem Textil Solidian GRID Q95/95-CCE-38 [12] und Carbonstäben im Zuggurt als Bewehrung versehen. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird näher auf die Eigenschaften der Ausgangsstoffe eingegangen.

Beton

Die Festigkeit des Ökobetons II [3] ist in der Literatur durch eine mittlere Würfeldruckfestigkeit angegeben. Da für die Tragfähigkeitsnachweise charakteristische Zylinderdruckfestigkeiten erforderlich sind, wird die mittlere Würfeldruckfestigkeit mit den Formeln des EC 2 [34] zuerst in eine charakteristische Würfeldruckfestigkeit umgerechnet und dann anhand Tab. 3.3 des EC 2 [34] einer Festigkeitsklasse zugeordnet.

Die Festigkeiten des C3-B2-NF-1-150-8 und C3-B2-HF-2-145-5 sind an Prismen bestimmt worden, die Ergebnisse in den jeweiligen Datenblättern [32] und [33] sind somit durch charakteristische Prismendruckfestigkeiten angegeben. Da die Würfeldruckfestigkeiten an den Prismenhälften bestimmt werden, können diese der Würfeldruckfestigkeit zugeordnet werden. Für den normalfesten Beton C3-B2-NF-1-150-8 wird anhand Tab. 3.3 des EC 2 [34] die entsprechende Zylinderdruckfestigkeit zugeordnet. Für den hochfesten Beton C3-B2-HF-2-145-5 erfolgt die Zuordnung der Zylinderdruckfestigkeit nach fib model code. Ausgehend von der ermittelten charakteristischen Zylinderdruckfestigkeit, erfolgt die Ermittlung der restlichen relevanten Eigenschaften der Betone unter der Annahme eines Parabel-Rechteck-Diagramms nach EC EN 1992-1-1 [34], siehe Abb. 3.4. Die Materialeigenschaften der drei Betonsorten sind in Tabelle 3.5 zusammengefasst.

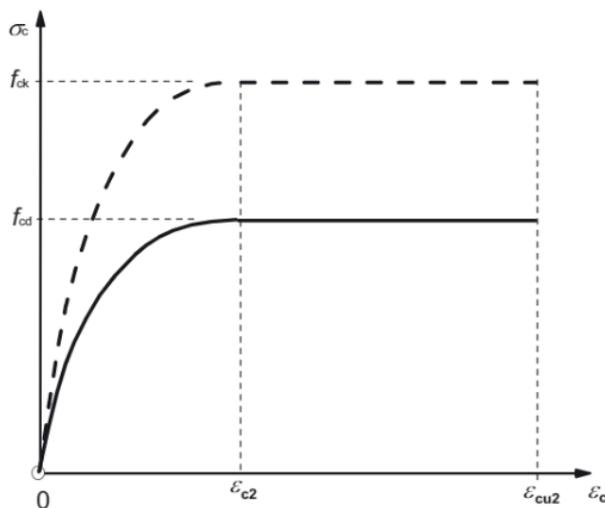


Abb. 3.4: Parabel-Rechteck-Diagramm für Beton unter Druck [34]

Tab. 3.5: Materialeigenschaften der Betone [3], [32], [33]

	gegeben		charakteristisch zugeordnet					Design-Werte	
	$f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	$f_{ck,Prisma}$ [N/mm ²]	$f_{ck,cube}$ [N/mm ²]	$f_{ck,Zyl}$ [N/mm ²]	ϵ_{c2} ‰	ϵ_{cu2} ‰	E_{cm} [GPa]	γ_m	f_{cd} [N/mm ²]
Ökobeton II	44,8		36,8	30	2	3,5	33	1,5	20
Normalfester Beton		85 ¹	85	70	2,4	2,7	41	1,5	46,7
Hochfester Beton		136,7 ¹	140 ²	120 ²	2,8	2,9	47	1,5	80

¹ermittelt an Prismen mit den Abmessungen 40x40x160 mm³

²zugeordnet nach fib model code

Betonfestigkeitsklassen														Analytische Beziehung	
f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm} = f_{ck} + 8$ (MPa)
f_{ctm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	$f_{ctm} = 0,30 \times f_{ck}^{(2/3)} \leq C50/60$ $f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln(1 + (f_{cm}/10)) > C50/60$
$f_{ctk,0,05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	$f_{ctk,0,05} = 0,7 \times f_{ctm}$ 5%-Quantil
$f_{ctk,0,95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6	$f_{ctk,0,95} = 1,3 \times f_{ctm}$ 95%-Quantil
E_{cm} (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44	$E_{cm} = 22 [(f_{cm}/10)^{0,3}]$ (f_{cm} in MPa)
ϵ_{c1} (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8	Siehe Bild 3.2 $\epsilon_{c1}^{(0/100)} = 0,7 f_{cm}^{0,31} \beta 2,8$ (AC)
ϵ_{cu1} (‰)	3,5									3,2	3,0	2,8	2,8	2,8	Siehe Bild 3.2 für $f_{ck} \geq 50$ MPa $\epsilon_{cu1}^{(0/100)} = 2,8 + 27 [(98 - f_{cm})/100]^4$
ϵ_{c2} (‰)	2,0									2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	Siehe Bild 3.3 für $f_{ck} \geq 50$ MPa $\epsilon_{c2}^{(0/100)} = 2,0 + 0,085 (f_{ck} - 50)^{0,53}$
ϵ_{cu2} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	Siehe Bild 3.3 für $f_{ck} \geq 50$ MPa $\epsilon_{cu2}^{(0/100)} = 2,6 + 35 [(90 - f_{ck})/100]^4$
n	2,0									1,75	1,6	1,45	1,4	1,4	für $f_{ck} \geq 50$ MPa $n = 1,4 + 23,4 [(90 - f_{ck})/100]^4$
ϵ_{c3} (‰)	1,75									1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	Siehe Bild 3.4 für $f_{ck} \geq 50$ MPa $\epsilon_{c3}^{(0/100)} = 1,75 + 0,55 [(f_{ck} - 50)/40]$
ϵ_{cu3} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	Siehe Bild 3.4 für $f_{ck} \geq 50$ MPa $\epsilon_{cu3}^{(0/100)} = 2,6 + 35 [(90 - f_{ck})/100]^4$

Abb. 3.5: Spannungs- und Formänderungseigenschaften für Beton [34]

FRP-Bewehrung

Zur Ermittlung der Materialeigenschaften der textilen Bewehrung wird von einer idealisierten linearen Spannungs-Dehnungs-Linie wie in Abb. 3.6 ersichtlich, ausgegangen. Dabei steigt die Dehnung linear mit der Spannung an, der E-Modul bleibt gleich.

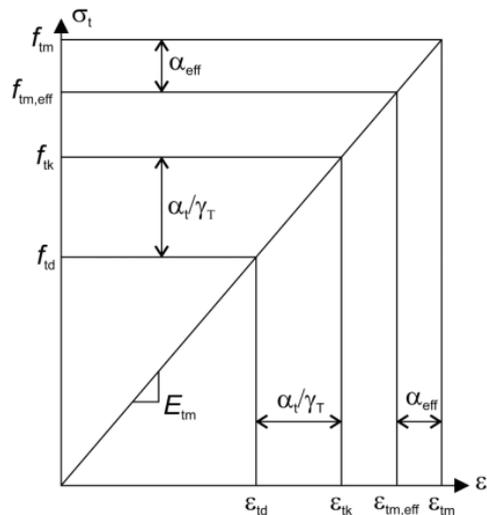


Abb. 3.6: Spannungs-Dehnungs-Linie für textile Bewehrung [35]

Im Diagramm ist sowohl die im standardisierten Faserstrangversuch ermittelte mittlere Bruchspannung f_{tm} als auch die effektive Bruchspannung $f_{tm,eff}$ angegeben. Die effektive Bruch-

spannung berücksichtigt den Einfluss der Anzahl und Länge der Faserstränge auf die Bruchspannung. Diese ist umso geringer, je größer die Anzahl der Faserstränge oder die gezogene Länge ist. Ab einer gezogenen Länge von etwa 1600 mm oder einer Stranganzahl von 10, nimmt jedoch die Bruchspannung nicht weiter ab. Da die erreichte Bruchspannung ca. 85 % der mittleren Bruchspannung f_{tm} aus dem Faserstrangzugversuch entspricht, kann die effektive Bruchspannung $f_{tm,eff}$ mit einem Abminderungsfaktor von $\alpha_{eff} = 0,85$ berechnet werden. Um von diesem Wert auf den charakteristischen Wert f_{tk} zu gelangen, wird die Dichtefunktion der effektiven Bruchspannung verwendet. Eine anschließende Division durch den Teilsicherheitsbeiwert γ_t und Multiplikation mit dem Abminderungsbeiwert α_t infolge einer Dauerstandbelastung für die textile Bewehrung, wird die Bemessungsspannung f_{td} ermittelt. Die Teilsicherheitsbeiwerte erhält man durch probabilistische Berechnungen [35]. Nach aktuellem Stand der Technik beträgt der Teilsicherheitsfaktor für textile Bewehrung 1,3. Um einen besseren Vergleich der Träger zu erhalten, wird jedoch mit den Teilsicherheitsfaktoren aus Kromoser et al. [12] gerechnet, die zu dem Zeitpunkt der Veröffentlichung des Artikels $\gamma_t = 1,25$ für Carbonstäbe und $\gamma_t = 1,2$ für textile Bewehrung waren (siehe Tab. 3.6).

Tab. 3.6: Materialeigenschaften der textilen Bewehrung [12]

	charakteristisch			Design-Werte			
	f_{fk}	E_{fk}	ϵ_{fk}	γ_t	f_{fd}	E_{fd}	ϵ_{fd}
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[‰]		[N/mm ²]	[N/mm ²]	[‰]
Solidian Grid	2.300	230000	13,0	1,2	1917	230.000	10,0
FRP Ø8	1.680	161.000	10,4	1,25	1.344	161.000	8,0
FRP Ø10	1.680	161.000	10,4	1,25	1.344	161.000	8,0

3.3.2 Modellierung

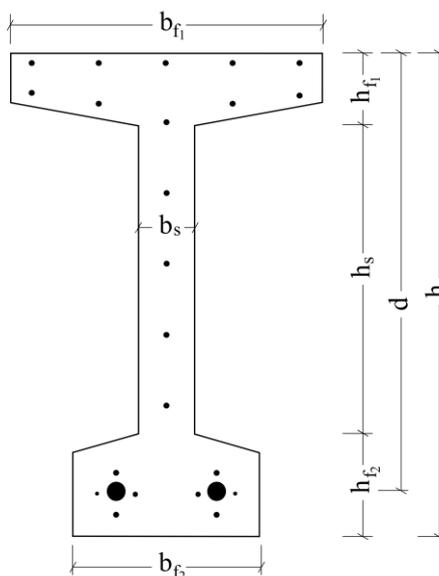


Abb. 3.7: Querschnitt des optimierten Trägers

Abb. 3.7 zeigt die Modellierung in INCA. Die großen Punkte im Untergurt stellen jeweils die Carbon-Bewehrungsstäbe mit $\varnothing 8$ mm dar. Die kleineren Punkte repräsentieren jeweils die Querschnittsfläche eines Faserstrangs des Textils mit $3,64 \text{ mm}^2$, wobei im Untergurt die direkt nebeneinander liegenden Faserstränge aufgrund des geringen Abstandes zueinander als ein Faserstrang mit doppelter Bewehrungsfläche modelliert wurden. Für die wirksame Zugbewehrung zählen somit neben den vier Carbon-Bewehrungsstäben auch insgesamt 14 Einzelstränge des Textils dazu. Der Parameter b in Abb. 3.7 steht für die Breite eines Bauteilbereiches, wobei der Zusatz f für Flansch und der Zusatz s für Steg steht. Das gleiche gilt für die Beschreibung der Höhe der Bauteilbereiche mit dem Parameter h . Die statische Nutzhöhe, gemessen von der oberen Bauteilkante bis zum Schwerpunkt der Zugbewehrung, wird mit dem Parameter d bezeichnet.

3.3.3 Biegnachweis in Feldmitte

Nachweiskonzept

Der Biegnachweis für textilbewehrte Bauteile kann anhand der iterativen Lösung nach Rempel et al. [35] durchgeführt werden. Dabei wird die Biegetragfähigkeit auf Komponentenebene ermittelt. Das Konzept nach Rempel et al. ist für beliebige Querschnitte anwendbar und gleicht dem herkömmlichen Verfahren des Stahlbetonbaus. Das iterative Verfahren kann entweder dazu verwendet werden den Biege widerstand bei gegebener Bewehrung zu berechnen oder die erforderliche Bewehrung aus gegebener Momenten- und Normalkrafteinwirkung zu ermitteln.

Für den Tragfähigkeitsnachweis werden folgende Annahmen getroffen: die Querschnitte bleiben im verformten Zustand eben (Bernoulli-Hypothese) und die Betonzugfestigkeit wird vernachlässigt, d.h. die für das Gleichgewicht erforderlichen Zugkräfte werden nur vom Stahl aufgenommen.

Für die iterative Berechnung der querschnittsbezogenen Biegetragfähigkeit eines gegebenen Textilbetonquerschnitts (Abb. 3.8 (a)) wird eine lineare Dehnungsverteilung über die Querschnittshöhe angenommen. Am oberen Rand beträgt die Dehnung ε_c und für die untersuchte Bewehrung ε_{td} (Abb. 3.8 (b)). Zur Berechnung des Versagemomentes M wird die maximale Zugdehnung ε_{td} unter Annahme von Bewehrungsversagen auf die Bruchdehnung $\varepsilon_{t,u}$ begrenzt, die in Zugversuchen ermittelt wurde.

Der Wert der Betondehnung ε_c an der Oberseite des Querschnitts muss iterativ durch Variation der Dehnungsebene ermittelt werden, bis das Gleichgewicht der inneren Normalkräfte erfüllt ist. Die Spannungsverteilung ergibt sich aus der angenommenen Dehnungsverteilung und den Materialgesetzen (Abb. 3.8 (c)). Das Integral der Druckspannung σ_c über die Druckzonenhöhe x ergibt die Druckkraft F_c (Abb. 3.8 (d)). Die Zugkraft F_t in der Bewehrung (Abb. 3.8 (d)) ergibt sich aus der Bewehrungsfläche A und der Spannung σ_t . Die Druckdehnung wird iterativ ermittelt, wobei das innere Normalkraftgleichgewicht herrschen muss. Das Bemessungsmoment M ergibt sich schließlich aus dem Momentengleichgewicht [35].

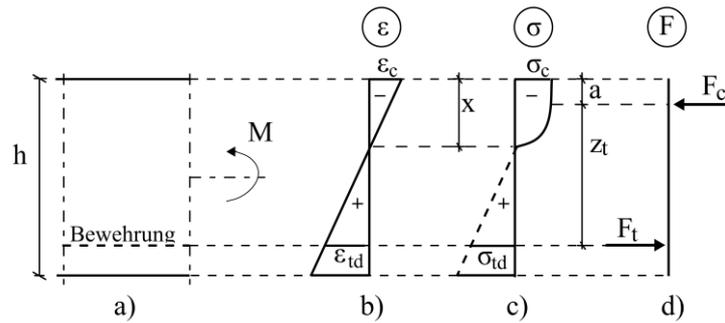


Abb. 3.8: Ablauf der Biegebemessung [35]

Das maximal aufnehmbare Moment aus Kromoser et al. [12] wurde als einwirkendes Moment herangezogen und damit der Trägerquerschnitt und die Bewehrung des Trägers so angepasst, dass dieser die gleiche Tragfähigkeit aufweist. In Feldmitte kommen für den druckbeanspruchten Obergurt der Beton C3-B2-HF-2-145-5 und im Steg sowie im Untergurt der niederfeste Ökobeton II zum Einsatz. Zudem wird der Untergurt des Trägers mit zwei Carbonstäben mit Durchmesser 8 mm zur Aufnahme der Zugkräfte versehen. Für die Zugkrafttragfähigkeit werden neben den Bewehrungsstäben auch die Faserstränge der Textilbewehrung im Bereich des Untergurtes herangezogen. Das sind in Summe 14 Einzelstränge zu je 3,62 mm².

Für den Nachweis und den Vergleich der Biegetragfähigkeit wird zuerst der Originalträger Konfiguration 1 aus Kromoser et al. [12] mit dem Programm INCA 2 bemessen. Dafür werden die Materialien UHPC und textile Bewehrung mit den entsprechenden Materialeigenschaften auf Design-Niveau verwendet. Abb. 3.9 zeigt die maximale Ausnutzung des Trägers und das maximal aufnehmbare Bemessungsmoment.

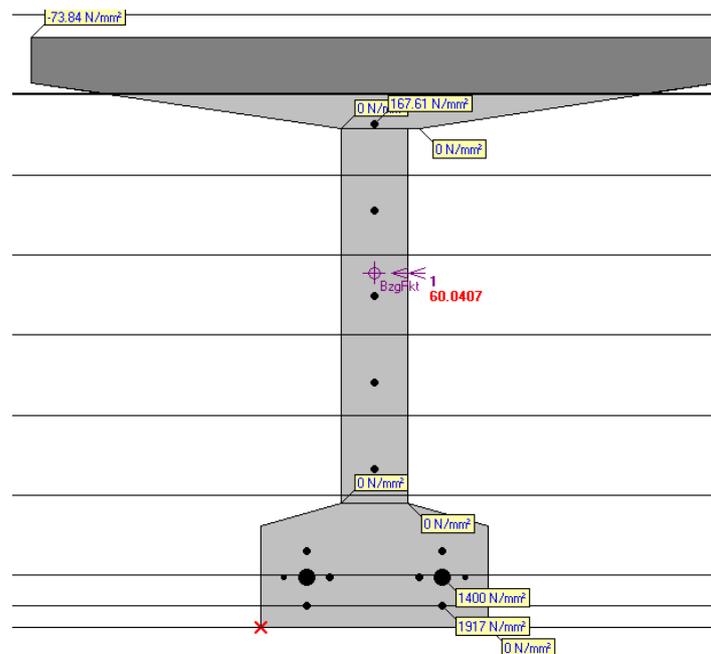


Abb. 3.9: Bemessung Originalträger mit INCA 2

Der Träger kann ein Bemessungsmoment von 60,04 kNm aufnehmen, bevor es zum Versagen in der Bewehrung kommt, was etwas höher als die im paper angegebenen 53 kNm sind. Etwaige

Differenzen können darauf zurückgeführt werden, dass die Berechnungen in Kromoser et al. mit nichtlinearen FE-Programmen erfolgten, wobei davon auszugehen ist, dass nicht die volle Biegetragfähigkeit erzielt werden konnte. Die Druckfestigkeit des UHPC beträgt auf Design-Niveau $103,3 \text{ N/mm}^2$ und wird wie in Abb. 3.9 zu sehen ist, im Obergurt mit $73,84 \text{ N/mm}^2$ nicht annähernd erreicht. Der überdimensionierte Obergurt ist unwirtschaftlich und verbraucht unnötig viel Material. Aus diesem Grund wird zur Optimierung und Effizienzsteigerung der Obergurt verschmälert, siehe Abb. 3.10. Außerdem wird zur besseren Ausnutzung des Druckgurts der Obergurt so geändert, dass die Nulllinie in Feldmitte genau zwischen Steg und Obergurt verläuft.

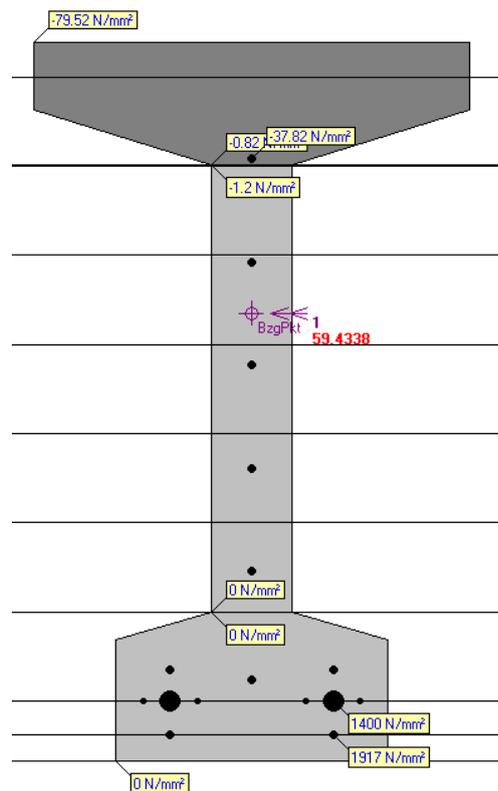


Abb. 3.10: Bemessung optimierter Träger mit INCA 2

Der optimierte Träger (Abb.3.10) wird mit den drei verschiedenen Betonsorten aus Kap. 4.1 abgestuft. Für den Obergurt kommt in Feldmitte der hochfeste Beton C3-B2-HF-2-145-5 mit einer Design-Druckfestigkeit von 80 N/mm^2 zum Einsatz. Durch eine Verschmälerung und leichte Erhöhung des Obergurtes ergibt sich ein Ausnutzungsgrad von 99 % und der Verlauf der Nulllinie ist genau zwischen Obergurt und Steg. Somit ist der Obergurt in Feldmitte überdrückt und maximal ausgereizt. Durch das Optimieren ergibt sich eine Reduzierung der Obergurtfläche von $34,5 \text{ cm}^2$ und somit eine Einsparung des Volumens von $0,0207 \text{ m}^3$ über die gesamte Länge.

Der laut Kromoser et al. [12] maximale Momentwiderstand beträgt $52,28 \text{ kNm}$ (M_{Ed}) auf Design-Niveau. Da der optimierte Träger einen Widerstand von $59,43 \text{ kNm}$ (M_{Rd}) besitzt, gilt der Biegenachweis als erfüllt.

$$M_{Ed} < M_{Rd}$$

Nachweis erfüllt

3.3.4 Querkraftnachweis am Auflager

Nachweiskonzept

Nach EC 2 [34] gilt der Nachweis auf Querkraft im Grenzzustand der Tragfähigkeit als erfüllt, wenn die einwirkende Querkraft kleiner ist als die aufnehmbare Querkraft.

$$V_{Ed} \leq V_{Rd}$$

Dabei hängt die aufnehmbare Querkraft einerseits vom Beton und andererseits von der Bewehrung ab. Die grundsätzliche Vorgehensweise der Querkraftbemessung nach EC2 ist folgende:

In Querschnitten, in denen $V_{Ed} \leq V_{Rd,c}$ ist, ist rechnerisch keine Querkraftbewehrung erforderlich, dennoch ist eine Mindestquerkraftbewehrung vorzusehen. In Querschnitten mit $V_{Ed} > V_{Rd,c}$ ist eine Querkraftbewehrung vorzusehen, die $V_{Ed} \leq V_{Rd}$ genügt. Der Querkraftwiderstand nach EC 2 [34] kann nicht ohne weiteres auf nichtmetallische Bewehrungen umgelegt werden. Für den Querkraftwiderstand ohne Bügelbewehrung ist insbesondere die Dübelwirkung der Längsbewehrung unterschiedlich zu quantifizieren. Untersuchungen dazu finden sich z.B. in Ghadioui et al. [36].

Für die eigenen Berechnungen wird davon ausgegangen, dass eine Querkraftbewehrung erforderlich ist. Der Querkraftwiderstand ergibt sich laut EC 2 [34] als der kleinere Wert aus:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} * z * f_{ywd} * \cot\theta \quad (3.1)$$

und

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} * b_w * z * v_1 * f_{cd} / (\cot\theta + \tan\theta) \quad (3.2)$$

In Gleichung (3.2) stellt v_1 einen Beiwert für die Abminderung der Druckstrebenfestigkeit infolge Querkraft dar. Hierfür wird der empfohlene Wert nach EC 2 [34] verwendet.

Zusätzlich konnte in Preinstorfer et al. [30] gezeigt werden, dass die Textilspannung, die über einen Schubriss übertragen werden kann, zum Teil stark gegenüber der Textiltzugfestigkeit abgemindert werden muss.

$$V_{R,tex} = \rho_w * b_w * (d - c) * \sigma_{tex,eff} * \cot(\beta_{cr}) \quad (3.3)$$

Dabei ist $\sigma_{tex,eff}$ abhängig von der Tränkungsart der Bewehrungsform, der Verankerung und der Betongüte. Unter Annahme einer guten Verankerung der Bewehrung in den Gurten und einem Ausschluss des Versagensmodus Spaltrissbildung wie in Preinstorfer et al. [37] beschrieben, wird die Zugfestigkeit demnach noch von der schiefwinkligen Beanspruchung beeinflusst. Für eine Rissneigung von ungefähr 45 % wird nach Preinstorfer et al. [30] ein Abminderungsfaktor von 0,80 vorgeschlagen, der auch in ähnlicher Form von anderen Wissenschaftlern vorgeschlagen wurde [38]. In Bielak et al. [39] konnte gezeigt werden, dass die Regelung nach EC auch für höherfeste Betone gut geeignet ist, um die Betondruckfestigkeit für unter Querkraft gerissenen Beton zu beschreiben.

Da bei direkter Lagerung des Bauteils die letzte Druckstrebe des Fachwerkmodells von oben direkt ins Auflager abgetragen werden kann und somit die letzte Zugstrebe für die Schubbemessung ein bisschen von der Auflagerkante entfernt liegt, darf die für die Bemessung der Querkraftbewehrung maßgebende Querkraft V_{Ed} im Abstand d vom Auflager ermittelt werden, siehe

Abb. 3.11. Für die Bemessung der Betontragfähigkeit muss jedoch der Widerstand mit der Querkraft direkt am Auflager verglichen werden [40].

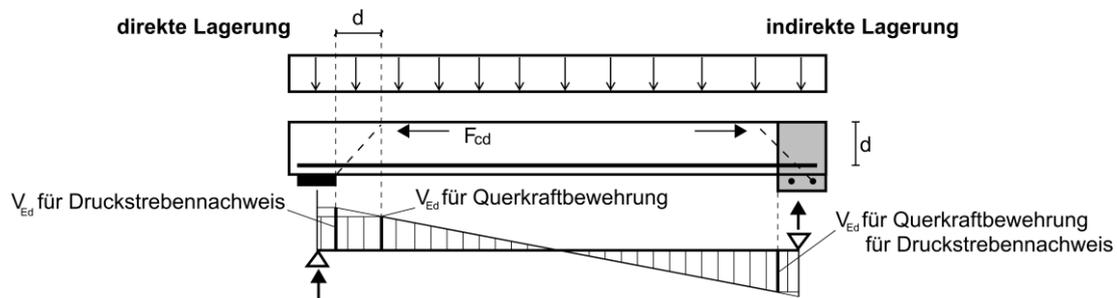


Abb. 3.11: Bemessungsschnitte für die Querkraftnachweise [40]

Der Querkraftnachweis wird unter oben genannten Annahmen geführt. Ausgehend von dem maximal aufnehmbaren Moment aus Kromoser et al. [12] wie bereits in Kapitel 3.3 beschrieben, wurde die Gleichstreckenlast rückgerechnet und damit die Querkraft ermittelt. Die maximale Querkraft ergibt sich bei einer Belastung durch Gleichstreckenlast im Auflagerbereich und beträgt 34,86 kN. Laut EC 2 [34] darf bei vorwiegender Gleichlast der Nachweis im Abstand d vom Auflager geführt werden. Hier beträgt die Querkraft 32,01 kN. Die Einwirkungen sind bereits auf Design-Niveau angegeben. Für den Nachweis im Steg wird der normalfeste Beton mit einer charakteristischen Druckfestigkeit von 70 N/mm^2 verwendet. Da im Steg zwei Textile vorhanden sind, ergibt sich die Bewehrungsquerschnittsfläche zu $190 \text{ mm}^2/\text{m}$.

Einwirkungen

$M_{Ed} = 52,28 \text{ kNm}$	einwirkendes Moment Designniveau
$M_{Ed} = \frac{q \cdot l^2}{8}$	Moment unter Gleichlast
$q_{Ed} = 11,62 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	einwirkende Gleichlast
$V_{Ed} = \frac{q \cdot l}{2} = 34,86 \text{ kN}$	Querkraft am Auflager
$V_{Ed,d} = V_{Ed} - q \cdot d = 32,01 \text{ kN}$	Querkraft im Abstand d vom Auflager

Widerstandsseite

Die Schubkraft des Trägers besteht aus dem Traganteil des Betons und der Bewehrung. Der kleinere der folgenden Werte ist der maßgebende:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta \quad (3.1)$$

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd} \cdot \frac{1}{\cot \theta + \tan \theta} \quad (3.2)$$

Widerstand Bewehrung

$$\rho_w = \frac{A_f}{b_d} = \frac{190}{30} \cdot 10^{-3} = 0,0063 \quad \text{Querkraftbewehrungsgrad}$$

$b_w = 30 \text{ mm}$	Stegbreite
$d = h - c = 245 \text{ mm}$	Statische Nutzhöhe
$d - x = 190 \text{ mm}$	Statische Nutzhöhe - Betondruckzone
$\sigma_{tex,eff} = 0,8 * f_{fd} = 1846,4 \text{ N/mm}^2$	Textilspannung, die über Scherriss übertragen werden kann
$\theta = 45^\circ$	Betondruckstrebenwinkel

$$V_{R,tex} = \rho_w * b_w * (d - c) * \sigma_{tex,eff} * \cot(\beta_{cr}) = 66,30 \text{ kN} \quad (3.3)$$

Widerstand Beton

$\alpha_{cw} = 1$	Beiwert zur Berücksichtigung des Spannungszustandes im Druckgurt
$b_w = 30 \text{ mm}$	Stegbreite
$v_1 = 0,6 * (1,0 - \frac{f_{ck}}{250}) = 0,432$	Festigkeitsabminderungsbeiwert für unter Querkraft gerissenen Beton
$\theta = 45^\circ$	Winkel der Druckstrebe
$z = 0,9 * d = 220,5 \text{ mm}$	innerer Hebelarm
$f_{ck} = 70 \text{ N/mm}^2$	charakteristische Druckfestigkeit normalfester Beton
$f_{cd} = 46,7 \text{ N/mm}^2$	Design Druckfestigkeit normalfester Beton

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} * b_w * z * v_1 * f_{cd} * \frac{1}{\cot\theta + \tan\theta} = 66,73 \text{ kN} \quad (3.2)$$

$$\min\{V\} = V_{R,tex} = 66,30$$

$$V_{Rd} \geq V_{Ed}$$

Querkraftnachweis erfüllt

3.4 Bereichsweise Festlegung der Betonsorten

Die lokale Abstufung des Trägers, wie in Kap. 3.2 beschrieben, erfolgt unter Verwendung der drei zementreduzierten Betonsorten, die in Kap. 4.1 erläutert werden. Diese Betonsorten kommen gezielt in den Bereichen zum Einsatz, wo ihre Eigenschaften vor allem hinsichtlich Festigkeit am meisten ausgenutzt werden. Dadurch ist eine Reduzierung der Zementmenge und somit eine Reduzierung der schädlichen Umweltwirkungen möglich.

Ausgehend von einem Einfeldträger mit einer Spannweite von 6 m der durch eine Gleichlast von 11,62 kN/m belastet wird, werden die Bereiche nach Festigkeitsanforderung unterteilt. Dabei wird nicht nur der Querschnitt in seine Teile Obergurt, Steg und Untergurt, sondern auch der gesamte Träger über die Länge gradiert. Zur Gradierung des Obergurts wird das einwirkende Moment M_{Ed} in 50 cm Abständen berechnet und mit den Widerständen der Träger mit den ver-

schiedenen Betonsorten, ermittelt in INCA (siehe Abb. 3.12), verglichen. Übersteigt das einwirkende Moment den Widerstand des Trägers mit dem geringer festen Beton, wird der nächste Abschnitt mit dem höherfesten Beton ausgeführt usw. Analog wird die Gradierung des Stegs durchgeführt. Somit ergibt sich bei Wahl der beschriebenen Betonsorten und Abstufung dieser in 50 cm Schritten, eine optimale Ausnutzung der Betoneigenschaften. Aufgrund der symmetrischen Belastung werden die Nachweise in Tab. 3.7 nur bis zur Trägermitte angegeben. Die Werte gelten analog für die andere Trägerhälfte. Das einwirkende Moment und die einwirkende Querkraft an Stelle x werden mit folgenden Formeln berechnet:

$$M_x = A_v * x - q * x * \frac{x}{2} \tag{3.4}$$

$$V_x = A_v - q * x \tag{3.5}$$

Tab. 3.7: Nachweise an Stelle x des Trägers

x [m]	M _{Ed} [kNm]	M _{Rd} [kNm]	V _{Ed} [kN]	V _{Rd} [kN]
0	0	31,5	34,86	66,73
0,5	15,98	31,5	29,05	34,93
1	29,05	31,5	23,24	34,93
1,5	39,22	59,43	17,43	34,93
2	46,48	59,43	11,62	34,93
2,5	50,84	59,43	5,81	34,93
3	52,28	59,43	0	34,93

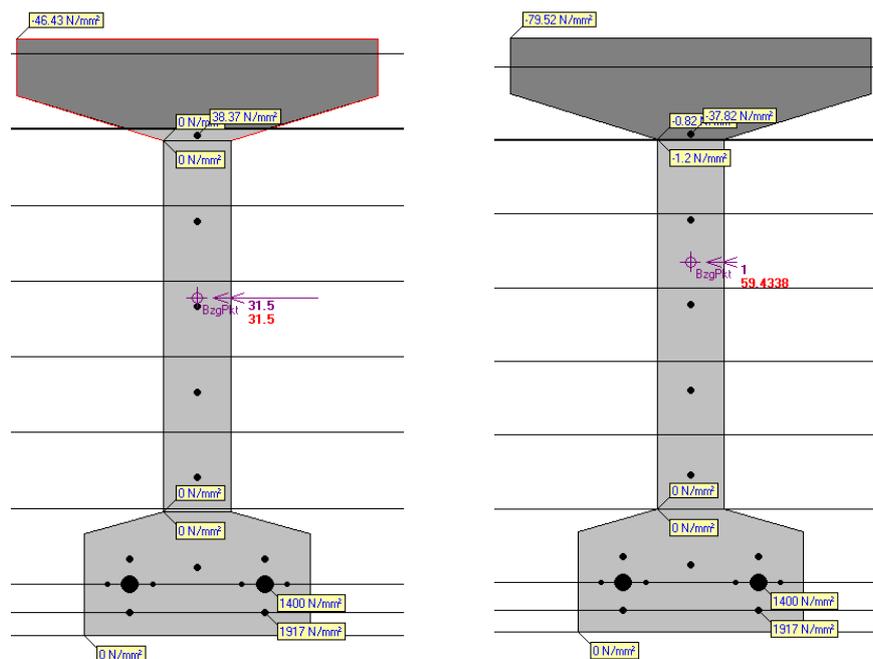


Abb. 3.12: M_{Rd} mit normalfestem Beton im Obergurt (links) und mit hochfestem Beton (rechts)

Die Veranschaulichung der in Tab. 3.7 angeführten Nachweise folgt in Abb. 3.13. Dabei ist zu sehen, dass wie bereits erwähnt der Untergurt aufgrund seiner geringen Anforderung an die Betondruckfestigkeit mit dem Ökobeton (heller Grauton) ausgeführt wird. Weiters ist zu erkennen in welchen Bereichen des Stegs und des Obergurts der mittelfeste (mittlerer Grauton) und der hochfeste (dunkler Grauton) zum Einsatz kommen. Die strichlierten Linien teilen den Träger in gleichmäßige 50 cm Abstände.

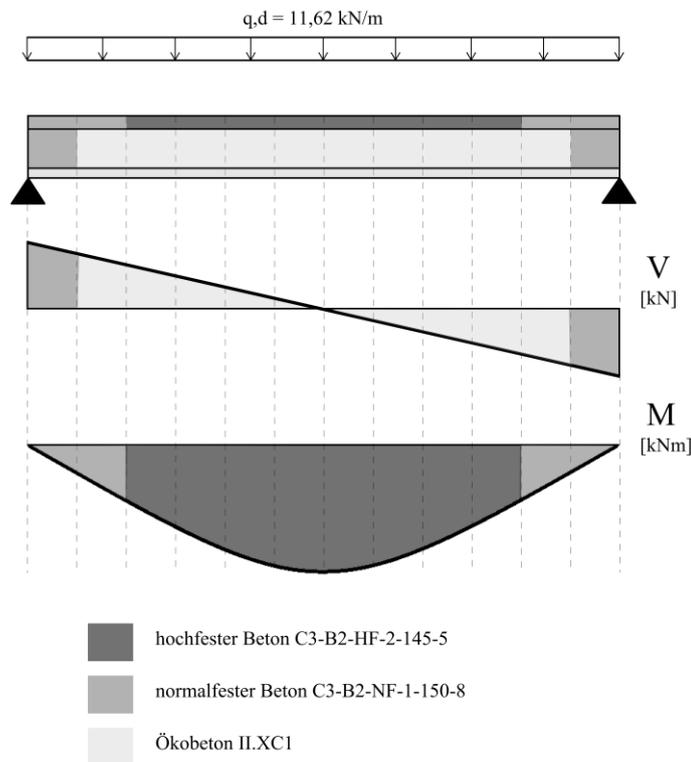


Abb. 3.13: Übersicht der Gradierung des optimierten Trägers in Abschnitten von 50 cm

Mit dem optimierten Träger kann nachweislich die Tragfähigkeit des originalen T-Trägers aus Kromoser et al. [12] beibehalten werden, siehe Kapitel 3.3.3 und 3.3.4, und dabei Beton und somit Zement eingespart werden. Durch die Kombination aus den beschriebenen Optimierungsstrategien können die Ökobilanzkennwerte verbessert werden, wie im nächsten Kapitel gezeigt werden kann.

Abschließend ist zu erwähnen, dass zwischen den unterschiedlichen Betonsorten aufgrund der verschiedenen E-Moduln Schubspannungen entstehen können, die im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht werden.

3.5 Ökobilanzierung

Der Bau und der Betrieb von Gebäuden verursachen beträchtliche Umweltwirkungen, die in Form einer Ökobilanz erfasst werden können. Anhand der gewonnenen Ökobilanz von Bauteilen ist es möglich die ökologischen Qualitäten zu vergleichen und zu bewerten. Das Verfahren der Ökobilanzierung eignet sich zum Vergleich verschiedener Ausführungsvarianten gesamter Bauwerke. Eine direkte Anwendung dieser Methode auf einzelne Baustoffe ist aufgrund der nicht berücksichtigten Leistungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit zwar nur bedingt zielführend. Trotz-

dem ist die Ökobilanzierung eine wichtige Methode, um die Nachhaltigkeit von Beton zu bewerten. Ausgehend von der Ökobilanz der Betonausgangsstoffe kommen noch Umweltwirkungen aus der Herstellung, dem Transport und dem Einbau hinzu.

Alle Einwirkungen auf die Umwelt, die mit der Erschaffung eines Produkts einhergehen, werden bei der Ökobilanzierung erfasst und standardisierten Wirkungsgruppen zugeteilt. Folgende Wirkungsgruppen werden unterschieden [27]:

- Primärenergiebedarf (PE, [J] oder [MJ])
- Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, GWP, [kg CO₂-Äquivalent])
- Ozonabbaupotenzial (Ozone Depletion Potential, ODP, [kg R11-Äquivalent])
- Versauerungspotenzial (Acidification Potential, AP, [kg SO₂ Äquivalent])
- Eutrophierungspotenzial (Eutrophication Potential, EP, [kg PO₄-Äquivalent])
- Bodennahe Ozonbildungspotenzial (Photo Optical Ozone Depletion Potential, POCP, [kg C₂H₄-Äquivalent])

Da die Ermittlung dieser Kennwerte für die Ausgangsstoffe von Beton sehr aufwendig ist, werden vom Ausgangsstoffhersteller die für die Betonoptimierung notwendigen Daten dem planenden Betontechnologen in Form von EPD-Erklärungen (Environmental Product Declaration) zur Verfügung gestellt. Diese EPDs sind seit Einführung der europäischen Bauproduktenverordnung 2013 für alle Baustoffe inklusive Beton verpflichtend [27]. Die Ermittlung der Ökobilanz eines Betons funktioniert folgendermaßen: die angegebenen Daten der Wirkungsgruppe werden mit den Mengenanteilen der Ausgangsstoffe multipliziert und über die Wirkkategorie aufsummiert. Bei einer herkömmlichen Betonzusammensetzung zeigt sich, dass der Gehalt an Zement für die Ökobilanz maßgebend ist. Zementersatzstoffe wie Hüttensand oder Flugasche können als emissionsfrei angesehen werden, wenn sie als Abfallstoffe bewertet werden und haben dadurch keinen negativen Einfluss auf die Ökobilanz des Betons [29]. Tab. 3.8 und 3.9 geben die Ökobilanz des optimierten Trägers und des Originalträgers wieder. Abb. 3.15 veranschaulicht die verbesserte Ökobilanz und das Einsparpotenzial der belastenden Umweltwirkungen. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit der kleinen Wertebereiche des AP, EP und POCP wurde die Skalierung der Werte wie folgt gewählt.

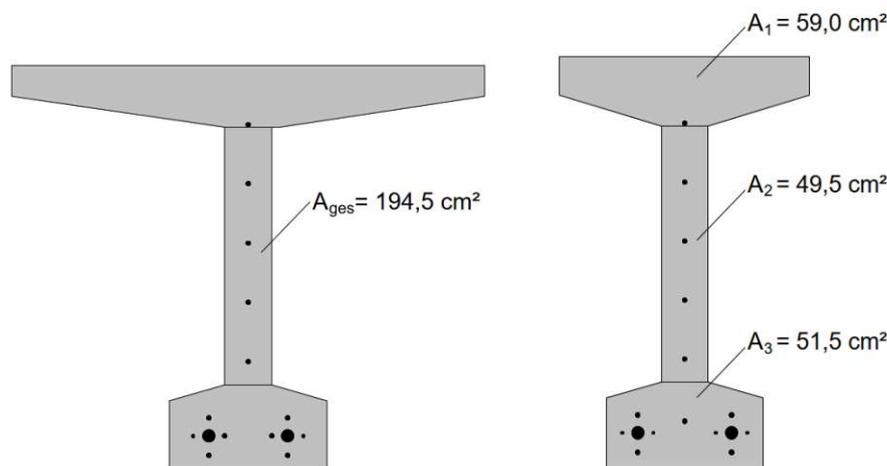


Abb. 3.14: Ursprungsvariante (links) und optimierte (rechts)

Für die Berechnung der Kubatur ergibt sich unter Annahme eines 6 m langen Trägers für die Ursprungsvariante $V_{\text{ursp.}} = 0,1167 \text{ m}^3$. Für den optimierten Träger ergibt sich unter Berücksichtigung der vorhin aufgezeigten Gradierung $V_{\text{ges}} = 0,096 \text{ m}^3$ ($V_{\text{geringfest}} = 0,0557 \text{ m}^3$, $V_{\text{mittel-fest}} = 0,0168 \text{ m}^3$, $V_{\text{hochfest}} = 0,0235 \text{ m}^3$).

Durch Verknüpfung der Kubaturen mit den Werten für die Ökobilanz, die in der Literatur gefunden werden können, ergeben sich die Ökobilanzkennwerte gemäß Tab. 3.8 und Tab. 3.9. Da sich die Bewehrungsart und -menge durch die Optimierung nicht geändert hat, wird auf die ökologischen Auswirkungen dieser nicht eingegangen.

Tab. 3.8: Ökobilanzkennwerte Originalträger

	Primärenergie PE [MJ]	Treibhaus- potenzial GWP [kg/CO ₂]	Versauerungs- potenzial AP [kg/SO ₂]	Eutrophierungs- potenzial EP [kg/PO ₄]	Bodennahes Ozon- bildungspotenzial POCP [kg/C ₂ H ₄]
UHPC ^[41] [1 m ³]	5159	803	1,43	0,27	0,16
UHPC V_{urspr} [0,1167 m ³]	602,06	93,71	0,167	0,032	0,019

Tab. 3.9: Ökobilanzkennwerte optimierter Träger

	Primärenergie PE [MJ]	Treibhaus- potenzial GWP [kg/CO ₂]	Versauerungs- potenzial AP [kg/SO ₂]	Eutrophierungs- potenzial EP [kg/PO ₄]	Bodennahes Ozon- bildungspotenzial POCP [kg/C ₂ H ₄]
Ökobeton ^[3] [1 m ³]	831	123	0,288	0,04	0,021
Normalfest ^[32] [1 m ³]	1730	206	0,34	0,053	0,031
Hochfest ^[33] [1 m ³]	2524	289	0,49	0,077	0,044
Ökobeton [0,0557 m ³]	46,29	6,85	0,016	0,0022	0,0012
Normalfest [0,0168 m ³]	29,06	3,46	0,0057	0,00089	0,0005
Hochfest [0,0235 m ³]	59,31	6,79	0,012	0,0018	0,001
Optimierter Träger V_{ges} [0,0961 m ³]	134,66	17,1	0,0337	0,00489	0,0027

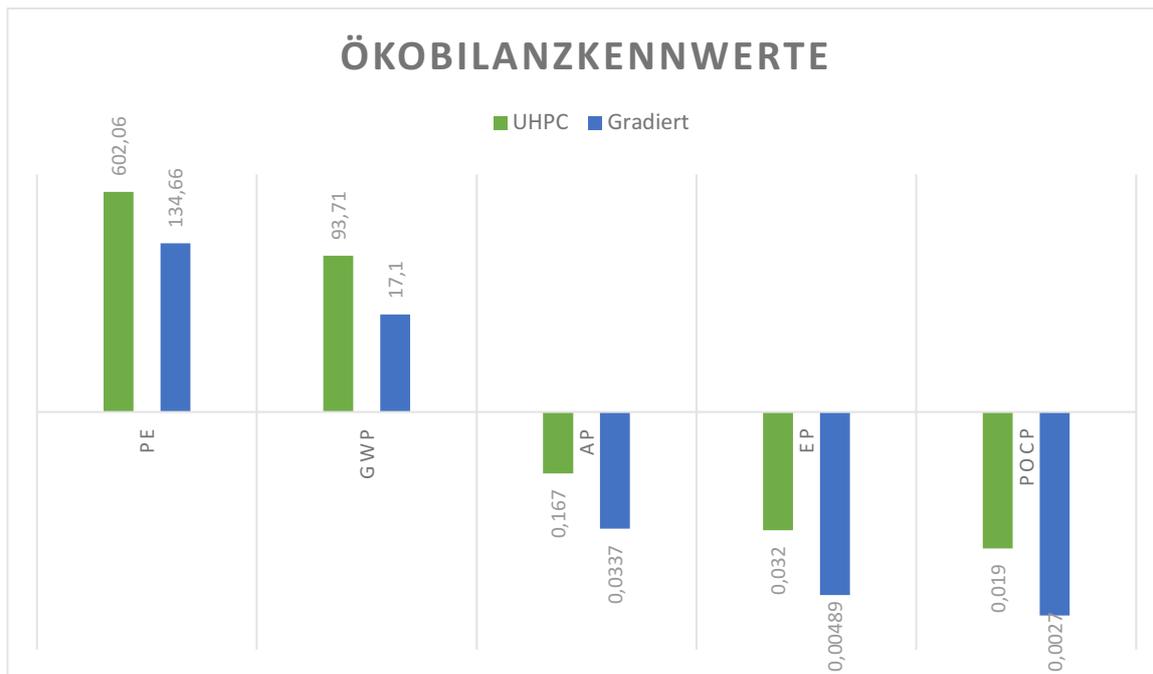


Abb. 3.15: Vergleich der Ökobilanzkennwerte

Wie in Abb. 3.15 dargestellt, ergibt sich durch die Gradierung des Trägers nach Abb. 3.13 eine Einsparung des Treibhauspotenzials GWP von 76,61 kg/CO₂. Weiters ist eine deutliche Reduktion des Primärenergiebedarfs von 467,4 MJ durch Einsparung von UHPC möglich.

Kapitel 4

Proof of concept

In folgendem Kapitel wird die grundsätzliche Realisierbarkeit von gradiertem textildbewehrtem Beton demonstriert. Zuerst wurde die Funktionalität der Mischungen überprüft, indem unter anderem die Festigkeitsabstufung zwischen den einzelnen Proben anhand von Würfeldruckfestigkeiten in verschiedenen Zeitabständen bestimmt wurde. Außerdem konnte die Stabilität der Mischung anhand von Würfeln in denen jeweils zwei Mischungen frisch-auf-frisch eingefüllt wurden, bestätigt werden. Weiters wurde die Tragfähigkeit der Verbundfuge anhand von Spaltzugversuchen an gradierten Betonwürfeln bestimmt.

Zuletzt wurde das Einbringen einer textilen Bewehrung in einen gradierten Betonkörper mittels einer Nachbildung des Stegs der T-Träger, die im vorigen Abschnitt behandelt wurden, demonstriert. Auf die einzelnen Punkte wird im Detail in den nachfolgenden Abschnitten eingegangen.

4.1 Abgestufte Betonsorten

Für die Optimierung des Trägers wurden vorab drei Betonsorten aus der Literatur gewählt, die bereits in den vorigen Kapiteln eingeführt wurden und optimale Eigenschaften für das Vorhaben aufweisen. Alle drei Betonsorten zeichnen sich durch einen geringeren Zementgehalt im Vergleich zum UHPC aus und haben dadurch geringere Umweltwirkungen. Da die Betone mit nicht korrodierender Textilbewehrung versehen werden, bieten sie für eine ökonomische und ökologische Bauweise das Potenzial, den Portlandzementklinkeranteil deutlich zu reduzieren. Die feinen Bewehrungsstrukturen erfordern jedoch ein kleines Größtkorn der Gesteinskörnung, was im Mischungsentwurf unweigerlich zu einer Erhöhung des Leimgehalts des Betons führt. Bei der Entwicklung der Matrix besteht die Herausforderung demnach darin, trotz des erhöhten Leimgehalts und dem kleinen Größtkorn, den Portlandzementklinkeranteil niedrig zu halten, um eine verbesserte Ökobilanz zu erzielen und dennoch hohe Festigkeiten des Betons zu erreichen [31].

Angelehnt an diese Sorten wurden für die Versuche eigene Rezepturen erstellt, mit dem Ziel verfügbare Ressourcen ideal zu verwenden. Weiters war es ein Ziel, die drei Mischungen mit möglichst gleichen Komponenten und dafür unterschiedlichen Mischungsverhältnissen herzustellen. Auf die aus der Literatur gewählten Betonmischungen wird im nächsten Kapitel näher eingegangen.

4.1.1 Gewählte Betonmischungen

Geringfester Beton

Für den Beton mit niedriger Festigkeit wurde der Ökobeton II.XC1 aus Proske et al. [3] gewählt. Da die Ökobilanz eines Betons vor allem durch seinen Gehalt an Portlandzementklinker bestimmt wird, wird beim Ökobeton versucht den Portlandzementklinkeranteil sehr niedrig zu halten und dafür Flugasche und Kalksteinmehl als Substitution einzusetzen. Da diese Zusatzstoffe jedoch eine deutlich reduzierte hydraulische Reaktivität besitzen, muss das Anmachwasser deutlich reduziert werden um einen gleichbleibenden w/z-Wert sicherzustellen. In Tabelle 4.1 ist die Zusammensetzung veranschaulicht und in Tab. 4.2 die Ökobilanz.

Tab. 4.1: Rezeptur Ökobeton [3]

Mischung	Ökobeton II.XC1
Zement	CEM II
Expositionsklasse	XC1
Zement [kg/m ³]	140
Kalksteinmehl [kg/m ³]	210
Flugasche [kg/m ³]	21
Fließmittel [kg/m ³]	3,9
Gesamtwasser [kg/m ³]	≤135

Tab. 4.2: Ökobilanz Ökobeton II.XC1 [3]

	Primärenergie PE [MJ]	Treibhauspotenzial GWP [kg CO ₂ -Äqu.]	Überdüngungspotenzial EP [kg PO ₄ -Äqu.]	Ozonbildungspotenzial POCP [kg C ₂ H ₄ -Äqu.]
Pro m ³	831	123	0,04	0,021

Normalfester Beton

Für den Beton mit mittlerer Festigkeit wurde die Mischung C3-B2-NF-1-150-8 aus dem Projekt C3 (Carbon Concrete Composite) gewählt [32], da diese eine gute mittlere Festigkeit bei verhältnismäßig niedrigem Zementanteil aufweist. Optimierungsziele dieser Betonmischung waren einerseits die Minimierung des Bindemittelgehalts, guter Verbund zur Carbonbewehrung und hinreichende Dauerhaftigkeit. Tab. 4.3 zeigt die Rezeptur für den gewählten normalfesten Beton.

Tab. 4.3: Rezeptur normalfester Beton [32]

Mischung	C3-B2-NF-1-150-8
Zement CEM II [kg/m ³]	353
Easyflow IIa (KSM) [kg/m ³]	172
BCS 0,06/0,2 [kg/m ³]	175
Sand 0/2 [kg/m ³]	625
Kies 2/8 [kg/m ³]	900
Fließmittel [kg/m ³]	8 bis 9
Wasser [kg/m ³]	150

Der Kompositzement CEM II/C-M (S-LL) wurde für das Basisvorhaben B2 entwickelt. Seine Hauptbestandteile sind Portlandzementklinker, Hüttsand und Kalksteinmehl. Der Kompositzement ist hinsichtlich seiner Korngrößenverteilung so optimiert, dass der Zementklinkeranteil um 20 % gegenüber einem üblichen Kompositzement reduziert wurde.

Das Kalksteinmehl Easyflow_IIa hat aufgrund seiner granulometrischen Eigenschaften eine gute Eignung zum Abstufen des Leimgehaltes bei unterschiedlichen Kompositzementgehalten. Der feine Quarzsand BCS 0,06/0,2 weist ein enges Kornband zwischen 0,06 und 0,2 mm auf und eignet sich daher zum Auffüllen der Kornbandlücke zwischen Zement und dem 0/2er Sand. Des Weiteren kamen Ottendorfer Sand und Kies sowie ein spezielles Fließmittel MC-VP-15-0414-01 auf PCE-Basis zum Einsatz [32].

Die Bezeichnung C3-B2-NF-1-150-8 gibt folgendes an [32]:

- C3: Carbon-Concrete-Composite
- B2: Basisvorhaben B2
- NF: Normalfest
- 1: Kodierung für Wasser/Bindemittel-Wert
- 150: Wassergehalt in kg/m^3
- 8: Größtkorn in mm

Bei den Frischbetoneigenschaften des normalfesten Betons ist das Ausbreitmaß von ca. 600 mm und die Frischbetonrohichte von $2,38 \text{ kg}/\text{dm}^3$ zu erwähnen.

Die Ökobilanzkennwerte aus Tabelle 4.4 gelten jeweils für 1 m^3 Frischbeton, wobei der Transport und der Einbau des Betons nicht berücksichtigt werden.

Tab. 4.4: Ökobilanz NF-1-150-8 [32]

	Primärenergie PE [MJ]	Treibhauspotenzial GWP [kg CO ₂ -Äqu.]	Überdüngungspotenzial EP [kg PO ₄ -Äqu.]	Ozonbildungspotenzial POCP [kg C ₂ H ₄ -Äqu.]
Pro m^3	1730	206	0,053	0,031

Hochfester Beton

Für den Beton mit hoher Festigkeit wurde die Mischung C3-B2-HF-2-145-5 aus dem Projekt C3 (Carbon Concrete Composite) gewählt da diese eine hohe Festigkeit bei verhältnismäßig niedrigem Zementanteil aufweist. Ziel bei der Realisierung dieser Betonmischung war ein möglichst geringer Wasseranspruch bei sehr guten Verarbeitungseigenschaften. Dabei soll ein möglichst hoher Ausnutzungsgrad des Bindemittels bei moderaten Schwindverformungen resultieren [33]. Für die hochfesten Betone wurde eine selbstverdichtende Konsistenz angestrebt. Tab. 4.5 zeigt die Rezeptur für den gewählten hochfesten Beton.

Tab. 4.5: Rezeptur hochfester Beton [33]

Mischung	C3-B2-HF-2-145-5
BMK-D5-1 [kg/m ³]	621
BCS 0,06/0,2 [kg/m ³]	250
Sand 0/2 [kg/m ³]	530
Splitt 2/5 [kg/m ³]	837
Fließmittel [kg/m ³]	16
Wasser [kg/m ³]	145

Das speziell entwickelte Bindemittelkonzept BMK-D5-1 basiert auf den drei Hauptbestandteilen Portlandzementklinker, Hüttensand und Kalksteinmehl. Das Konzept ist so optimiert, dass der Zementklinkeranteil um 30 % verglichen mit Hochleistungs-Bindemittel-Compounds reduziert werden kann. Bis auf den Splitt 2/5 sind die weiteren Zutaten der hochfesten Betonmischung die selben wie beim normalfesten Beton [32].

Die Frischbetoneigenschaften des hochfesten Betons weisen ein Ausbreitmaß von ca. 750 mm und eine Frischbetonrohichte von 2,40 kg/dm³ auf. Die Ökobilanzkennwerte aus Tabelle 4.6 gelten jeweils für 1 m³ Frischbeton, wobei der Transport und der Einbau des Betons nicht berücksichtigt werden [33].

Tab. 4.6: Ökobilanz HF-2-145-5 [33]

	Primärenergie PE [MJ]	Treibhauspotenzial GWP [kg CO ₂ -Äqu.]	Überdüngungspotenzial EP [kg PO ₄ -Äqu.]	Ozonbildungspotenzial POCP [kg C ₂ H ₄ -Äqu.]
Pro m ³	2524	289	0,077	0,044

Bewertung

Die gewählten Betonsorten aus der Literatur haben bei deutlich geringerem Zementklinkeranteil im Vergleich zu äquivalenten normalen Betonsorten vielversprechende Festigkeiten. Da jedoch die einzelnen Bestandteile, vor allem jene der speziell für das Basisvorhaben entwickelten Betone, in Deutschland hergestellt werden, wäre die Verwendung dieser nicht mit dem Ziel dieser Arbeit – der Strukturoptimierung zugunsten der Ökobilanz – kompatibel. Deswegen werden eigene Betonrezepturen, die in folgendem Kapitel beschrieben werden, in Anlehnung an die gewählten hergestellt.

4.1.2 Realisierte Betonmischungen

Im Folgenden wurde versucht die Originalrezepturen mit lokal verfügbaren Bestandteilen nachzustellen. Zur einfachen und kostengünstigen Produktion sowie einer leichten Adaptierung der Mischungen bei Herstellung wurden bis auf die unterschiedlichen Betonzusatzmittel die drei Mischungen mit den selben Ausgangsstoffen hergestellt, die sich jeweils nur in ihrem Verhältnis zueinander unterscheiden. Die Herstellung der jeweiligen Mischung erfolgte in einem Mörtelmischer mit Planetenrührwerk. Da die Mischungen zunächst zu wenig weich waren wurde im ersten Schritt versucht durch Variation des Fließmittels eine brauchbare Konsistenz zu erhalten.

Danach wurde durch Erhöhung der Leimmenge bei gleichzeitiger Verringerung des Sandanteils die jeweilige Betonsorte so weit abgeändert, dass die Konsistenz im Bereich sehr weich bis fließfähig resultierte. Aufgrund der Anforderung Betone zu erschaffen, die ohne weitere Verdichtungsmaßnahmen auch für schlanke, textilbewehrte Bauteile eingesetzt werden können, war es wichtig die Konsistenz in diesem Bereich zu erhalten. Nach erfolgreicher Anpassung der Rezepturen wurden die Mischungen jeweils in einem Zwangsmischer gemischt.

Zum besseren Verständnis sind in Tab. 4.7 die Ausgangsmischungen, angelehnt an die Originalmischungen aus Kap. 4.1.1 und die abgeänderten, finalen Betonrezepturen für jeweils 1 m³ Beton zu sehen. Nachfolgend werden die hergestellten Betonsorten als „Low“, „Medium“ und „High“, entsprechend ihrer Festigkeit bezeichnet.

Tab. 4.7: Gegenüberstellung der Betonrezepturen der Erstversuche mit den endgültigen Rezepturen

	Low		Medium		High	
	Erstversuch	Final	Erstversuch	Final	Erstversuch	Final
Wasser [kg/m ³]	130,9	144,5	144,1	161	123,7	149,8
Fließmittel [kg/m ³]	3,6	4,7	10,8	5,4	17,8	21,9
Konsistenzhalter [kg/m ³]	0	2,4	0	3,5	0	12,5
Zement Karawanken [kg/m ³]	143,4	157	361,2	383,4	591,7	624,3
Flugasche [kg/m ³]	21,5	39				
Kalksteinmehl [kg/m ³]	215,1	314	177,0	187,9	59,2	62,4
Microsilika [kg/m ³]					59,2	62,4
QS 0,1-0,5 mm [kg/m ³]	282,2	292,8	254,4	279,3	238,8	256,8
Sand 1-4 mm [kg/m ³]	846,6	704,6	763,1	672,1	715,5	617,9
Sand 4-8 mm [kg/m ³]	788,9	757,4	711,1	722,5	666,7	664,2

Bei allen drei Betonsorten ist deutlich zu erkennen, dass es zu einer Erhöhung der Bindemittelmatrix und zu einer Verringerung der Zuschläge gekommen ist. Prozentual gesehen ergibt sich beim höherfesten Beton eine geringere Feinanteilszunahme im Vergleich zum niederfesten Beton. In den Tabellen Tab. 4.8 bis Tab. 4.10 sind die jeweils aus der Literatur gewählten Betonsorten mit den tatsächlich gemischten gegenübergestellt.

Tab. 4.8: Betonrezeptur Ökobeton [3] und „Low“

	Ökobeton II.XC1	Beton „Low“
Zementart	CEM II	CEM I
Zement [kg/m ³]	140	157
Kalksteinmehl [kg/m ³]	210	314
Flugasche [kg/m ³]	21	39
Fließmittel PCE [kg/m ³]	3,9	4,7
Konsistenzhalter Sky 911 [kg/m ³]		2,4
Wasser [kg/m ³]	≤135	144,5
Sand 0-4 mm [kg/m ³]	721	
Quarzsand 0,1-0,5 mm [kg/m ³]		292,8
Split 4-16 mm [kg/m ³]	1126	
Sand 1-4 mm [kg/m ³]		704,6
Sand 4-8 [kg/m ³]		757,4

Tab. 4.9: Betonrezeptur C3-B2-NF-1-150-8 [32] und „Medium“

	C3-B2-NF-1-150-8	Beton „Medium“
Zementart	CEM II	CEM I
Zement [kg/m ³]	353	383,4
Kalksteinmehl [kg/m ³]	172	187,9
Quarzsand 0,1-0,5 [kg/m ³]	175	279,3
Sand 0-2 mm [kg/m ³]	625	
Sand 1-4 mm [kg/m ³]		672,1
Kies 2-8mm [kg/m ³]	900	
Sand 4-8 mm [kg/m ³]		722,5
Wasser [kg/m ³]	150	161
Fließmittel PCE [kg/m ³]	8	5,4
Konsistenzhalter Sky 911 [kg/m ³]		3,5

Tab. 4.10: Betonrezeptur C3-B2- HF-2-145-5 [33] und „High“

	C3-B2-HF-2-145-4	Beton „High“
Zementart	BMK-D5-1	CEM I
Zement [kg/m ³]	621	624,3
Microsilika [kg/m ³]		62,4
Kalksteinmehl [kg/m ³]		62,4
Quarzsand 0,1-0,5 mm [kg/m ³]	250	256,8
Sand 0-2 mm [kg/m ³]	530	
Sand 1-4 mm [kg/m ³]		617,9
Splitt 2-5mm [kg/m ³]	837	
Sand 4-8 mm [kg/m ³]		664,2
Wasser [kg/m ³]	145	149,8
Fließmittel PCE [kg/m ³]	16	21,9
Konsistenzhalter Sky 911 [kg/m ³]		12,5

4.2 Materialprüfungen

Zur Überprüfung der Herstellbarkeit und der Frisch- sowie Festbetoneigenschaften, wurden die drei optimierten Mischungen im Zwangsmischer hergestellt, in Schalkkörper betoniert und nach entsprechender Trocknungszeit einer Festigkeitsprüfung unterzogen. Für die jeweilige Betonart – eingeteilt in „low“, „medium“ und „high“ – wurden nach einem Tag, sieben Tagen und 28 Tagen die Würfeldruckfestigkeit 150x150x150 mm³ an jeweils drei Proben ermittelt. Die Mittelwerte der Druckfestigkeiten sind in Tabelle 4.11 aufgelistet.

Tab. 4.11: Würfeldruckfestigkeiten der hergestellten Betone

	Druckfestigkeit nach x Tagen [MPa]		
	1	7	28
„Low“	9,0	31,8	44,0
„Medium“	33,4	73,3	77,8
„High“	50,7	106,4	112,2

Es zeigt sich, dass die Mischungen sehr gut abgestuft sind und die Festbetoneigenschaften denen der gewählten Mischungen aus der Literatur sehr nahe kommen. Zur besseren Veranschaulichung ist in Tab. 4.12 eine Gegenüberstellung der Druckfestigkeiten zu sehen.

Tab. 4.12: Gegenüberstellung der Druckfestigkeiten [3], [32], [33]

	Druckfestigkeit nach x Tagen [MPa]		
	1	7	28
Ökobeton II.XC1	12,0	32,4	44,8
„Low“	9,0	31,8	44,0
C3-B2-NF-1-150-8	30,8	57,2	85,0
„Medium“	33,4	73,3	77,8
C3-B2-HF-2-145-5	44,3	105,5	136,7
„High“	50,7	106,4	112,2

Bei der Herstellung der Betonrezepturen im Labor mussten die einzelnen Mischungen wie bereits erwähnt mehrmals angepasst werden, um einen gut verarbeitbaren Beton zu erhalten. Die Erstversuche wurden in einem Mörtelmischer mit einem Füllvolumen von $1,8 \text{ dm}^3$ hergestellt. Dabei wurde folgende automatisierte Mischreihenfolge eingehalten: Einwiegen der trockenen Zutaten, 1 min mischen auf Stufe 1 bei langsamer Wasser- und Fließmittelzugabe (ca. 30 s). Danach 1 min mischen auf Stufe 2, gefolgt von 1 min Mischpause und abschließend wieder 1 min mischen auf Stufe 2. Insgesamt betrug die Dauer des Mischens 3 min.

Für die Herstellung der Probekörper erfolgte das Mischen von jeweils 50 dm^3 in einem Zwangsmischer. Dabei war die Mischreihenfolge wie folgt: 90 s Trockenmischen, danach Zugabe von Wasser und Fließmittel (ca. 30 s) und weitere 2,5-3 min mischen. Das ergibt eine Gesamt-mischzeit von ca. 5 min. Die Mischungen im Zwangsmischer sind im Vergleich zu denen aus dem Mörtelmischer bei gleicher Zusammensetzung deutlich flüssiger geworden. Das liegt zum einen an der Mischleistung der Mischer und zum anderen am Füllgrad. Der Mörtelmischer war mit dem Füllvolumen von $1,8 \text{ dm}^3$ sehr ausgereizt, wohingegen der Zwangsmischer bei 50 dm^3 mengenmäßig ideal gefüllt war. Außerdem spielt die Mischungszusammensetzung eine Rolle wie sensibel der Beton auf Schwankungen reagiert.

Direkt nach dem Mischen im Zwangsmischer wurde bei allen drei Betonsorten ein Ausbreitversuch zur Bestimmung der Ausbreitmaßklasse durchgeführt. Bei Herstellung des geringsten Betons wurde zunächst ein Ausbreitmaß von 65 cm gemessen. Da dieses über dem Soll-

Ausbreitmaß von ca. 55 cm lag, wurde ein viskositätsregelndes Zusatzmittel zugegeben, um das Ausbreitmaß auf 55 cm zu verbessern.

Auch beim ersten Versuch den normalfesten Beton („Medium“) zu mischen, war zu viel Fließmittel in der Mischung, sodass sich der Beton zu stark ausbreitete. Nach Zugabe des viskositätsregelnden Zusatzmittel konnte schlussendlich ein Ausbreitmaß von 52 cm gemessen werden.

Die Menge an Fließmittel der hochfesten Mischung („High“) musste ebenfalls angepasst werden, um am Schluss eine gut verarbeitbare Betonmischung mit einem Ausbreitmaß von 52 cm zu erhalten. Die folgenden Abbildungen zeigen den Prozess der Herstellung.

Das Mischen erfolgte jeweils in einem Zwangsmischer.



Abb. 4.1: Ausgangsstoffe der Mischung „low“ (links) und einfüllen der Betonmischungen in Schalkkörper

Zur Ermittlung der Druckfestigkeit der Würfel wurden jeweils drei Würfel nach einem, nach sieben und nach 28 Tagen im Labor an einer Prüfmaschine geprüft und der Mittelwert berechnet. Die jeweiligen Kraft-Weg-Diagramme sind in Abb. 4.2 dargestellt. Die folgenden Bilder zeigen den Versuchsablauf und die Probekörper verschiedener Festigkeitsklassen bei Versagen.

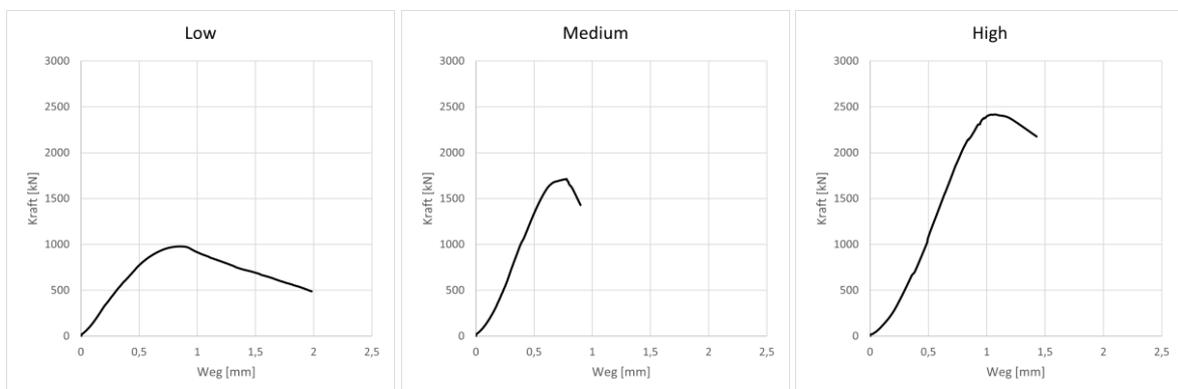


Abb. 4.2: Kraft-Weg-Diagramme der Druckversuche der Betonsorten nach 28d

Anhand der Kraft-Weg-Diagramme ist sehr gut zu sehen, dass zwischen dem geringfesten und den höherfesten Betonen die Sprödigkeit zunimmt. Weiters ist die Abstufung der Festigkeitsklassen sehr gut zu erkennen. Während der Beton „low“ nur etwa 1000 kN standhält bevor es

zum Versagen kommt, liegt die Versagenslast beim Beton „medium“ schon bei etwas mehr als 1500 kN. Der hochfeste Beton „high“ kann fast 2500 kN standhalten bevor er versagt.



Abb. 4.3: Versagensbilder „Low“ (rechts), „Medium“ (Mitte), „High“ (links)



Abb. 4.4: ausgeschaltete Probewürfel von links nach rechts: „Low“, „Medium“, „High“, gradiert

Die unterschiedlichen Farben der Betonwürfel ergeben sich durch die unterschiedlichen Verhältnisse der Bindemittelmatrix. Der hochfeste Beton (2. von rechts) hat aufgrund seines hohen Gehalts an Karawanken- Zement eine dunkle Färbung, während der niederfeste Beton (1. von links) aufgrund des geringen Zementanteils und der Substitution des grauen Zements durch das helle Kalksteinmehl ein sehr helles Grau besitzt.

4.3 Gradierung

Anhand von Probewürfeln wurde die Möglichkeit der Gradierung der Betonsorten untersucht. Je zwei Sorten wurden mit Hilfe einer vertikal verschieblichen Trennplatte nacheinander in einen Würfel gegossen und die Trennplatte danach gezogen, siehe Abb. 4.5.

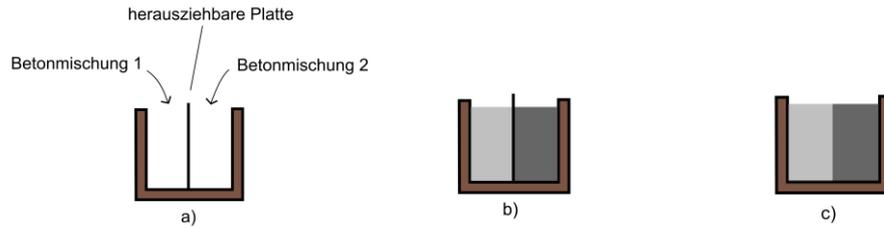


Abb. 4.5: Ablauf Betonieren der gradierten Würfel: (a) anbringen der herausziehbaren Platte, (b) einfüllen der Mischungen, (c) ziehen der Platte

In Abb. 4.6 und 4.7 kann man sehen, dass keine Instabilitäten aufgetreten sind und sich eine gleichmäßige Fuge ausgebildet hat. Instabilitäten würden entstehen, wenn die auftretende Fließspannung nach dem Ziehen der Trennplatte die Scherfestigkeit einer Betonsorte übersteigen würde. Aufgrund der sehr ähnlichen Dichten der jeweiligen Betonsorten war dies nicht zu erwarten, was durch die Versuche bestätigt werden konnte.



Abb. 4.6: Gradierte Betonwürfel in Schalkkörpern (links) und ausgeschalt (rechts)

4.3.1 Eigenschaften des Interface nach Erhärten des Betons

Allgemein

Anschließend wurden weiterführende Untersuchungen zur Bestimmung des Verbundverhaltens an den gradierten Würfeln mit den Abmessungen $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ durchgeführt. Wie zu Beginn in Kap. 4 beschrieben, wurden jeweils zwei der drei Betonmischungen in einen Schalkkörper gefüllt, der in der Mitte durch eine horizontal verschiebliche Platte abgetrennt wurde. Es wurde jeweils ein Probewürfel der Kombination Ökobeton – mittelfester Beton, Ökobeton – hochfester Beton und mittelfester Beton – hochfester Beton hergestellt, siehe Abb. 4.7. Dabei ist der hellgraue Beton der Ökobeton, der rötliche der mittelfeste Beton und der dunkelgraue der hochfeste Beton. Die rötliche Färbung des mittelfesten Betons wurde durch Zugabe von Eisenoxid bewerkstelligt, das bei der kleinen zugegebenen Menge keinen Einfluss auf die Eigenschaften des Betons mit sich bringt. Nach dem Gießen der Betone wurde die Platte gezogen. Wie bereits erwähnt und in Abb. 4.7 zu sehen ist, sind keine bis geringe Instabilitäten zwischen den Betonsorten aufgetreten. Um das Verbundverhalten und die Verbundfestigkeiten der gradierten Betone zu quantifizieren, wurden diese nach Erreichen der 28d Festigkeit einem Spaltzugversuch unterzogen.

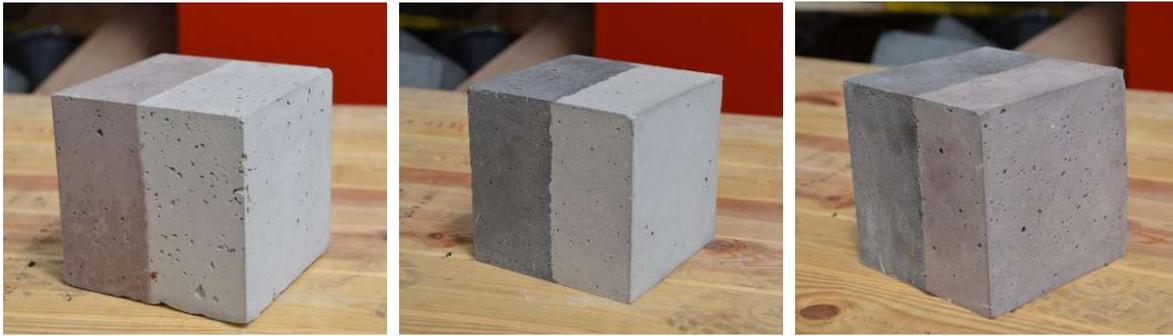


Abb. 4.7: Ökobeton-mittelfester Beton -(links), Ökobeton – hochfester Beton (Mitte), mittelfester Beton – hochfester Beton (rechts)

Ablauf

Die Bestimmung der Spaltzugfestigkeit erfolgt vorzugsweise an Zylindern, kann aber auch an Würfeln oder Prismen erfolgen. Die Zylinder werden entlang zweier gegenüberliegender Mantellinien auf Druck beansprucht. Dadurch entsteht ein zweiachsiger Spannungszustand in der Probe, nämlich Zug rechtwinkelig zur Linienbelastung und Druck in Richtung der Linienbelastung. Die auftretenden Zugspannungen sind über ca. 90 % des Zylinderdurchmesser fast konstant. Das Versagen im Spaltzugversuch tritt im Mittelpunkt des Probekörpers mit einem Verhältnis der maximalen Druck- zur maximalen Zugspannung $\sigma_y/\sigma_x = -3$ auf. Aufgrund der kleineren Zugfestigkeit des Betons im Vergleich zur Druckfestigkeit, ruft die Zugspannung σ_x das Spalten des Zylinders hervor [27]. Die Spaltzugfestigkeit $f_{ct,sp}$ kann für einen Würfel gemäß folgender Gleichung berechnet werden [42]:

$$f_{ct,sp,cube,normal} = \frac{2P_{max}}{\pi a^2}$$

Für klassische Betone liegt die Spaltzugfestigkeit zwischen 2 und 6 N/mm². Sie wird sowohl von der Biegezugfestigkeit als auch von der Betonzusammensetzung in ähnlicher Weise beeinflusst [27].

Zur Bestimmung der Spaltzugfestigkeit an den Probewürfeln, wurden jeweils in der Mitte des Würfels Presspappstreifen an zwei gegenüberliegenden Seiten angebracht, siehe Abb. 4.8. Durch diese Streifen erfolgt eine lineare Lasteinleitung. Die Probewürfel wurden dann so lange einer Laststeigerung unterworfen, bis es zu einem Versagen kam und die Probewürfel aufgespalten wurden.

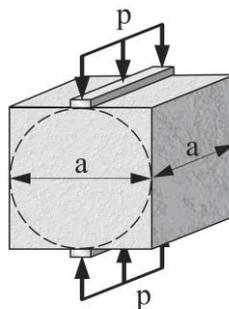


Abb. 4.8: Anordnung zur Prüfung im Spaltzugversuch [42]

Ergebnisse

Abb. 4.9 zeigt die Würfel nach Versuchsdurchführung. Es ist zu erkennen, dass die Bruchfläche immer durch den schwächeren Beton verläuft. Die Ergebnisse der Spaltzugversuche sind in Tab. 4.13 gegeben. Die zugehörigen Kraft-Weg-Diagramme der gradierten Betonwürfel sind in Abb. 4.10 zu sehen.



Abb. 4.9: Würfel nach Spaltzugversuch

Tab. 4.13: Zusammenfassung der Ergebnisse

Würfel	F_{\max} [kN]	$f_{ct,sp}$ [N/mm ²]	ρ [g/cm ³]
Ökobeton - normalfester Beton	84,98	2,40	3,04
Ökobeton - hochfester Beton	108,41	3,07	3,07
Normalfester Beton - hochfester Beton	146,72	4,15	3,1

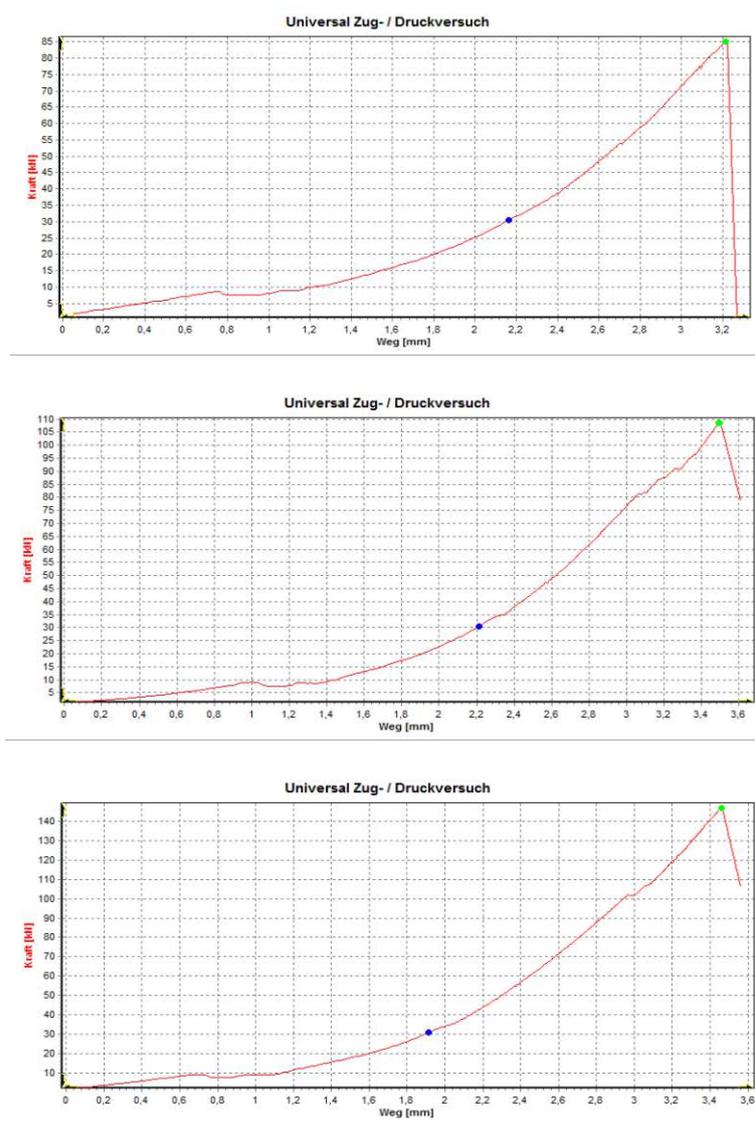


Abb. 4.10: von oben nach unten: Kraft-Weg-Diagramm des Würfels Ökobeton-niederfester Beton, Ökobeton-hochfester Beton, niederfester Beton-hochfester Beton

Fazit

Wie in den Abbildungen 4.9 und 4.11 zu erkennen ist, verläuft die Bruchfläche durch den Beton und nicht durch das Interface. Dies bezeugt einen guten Verbund der Betone. Bei allen drei Versuchskörpern ist eindeutig zu sehen, dass sich der Würfel in der schwächeren Betonmischung spaltet. Bei dem Probewürfel mit der mittel- und hochfesten Mischung ist zudem erkennbar, dass die Bruchfläche durch die Körner verläuft, was einen guten Verbund bestätigt. Durch das frisch-auf-frisch Gießen der Mischungen entstehen nachweislich keine Schwachstellen, die bei einem frisch-auf-gehärtet Gießen auftreten würden.



Abb. 4.11: Bruchflächen der Würfel, von oben nach unten: Ökobeton – mittelfester Beton, Ökobeton – hochfester Beton, mittelfester Beton – hochfester Beton

4.4 Textilbewehrter gradierter Beton

Zur Überprüfung der Durchführbarkeit der Optimierungsstrategien, vor allem der lokalen Abstufung über die Länge des Trägers, wurde ein Proof of Concept durchgeführt. Dieser Proof of Concept erfolgte durch Herstellung des Trägerstegs mit den leicht veränderten Abmessungen von 4 cm Stegbreite und 30 cm Steghöhe und der Verwendung der drei in Kap. 4.1.1 beschriebenen Betonmischungen. Zur Aufnahme der Schubkräfte wurde der Steg mit der Textilbewehrung Solid GRID Q 142/142 – CCE – 25 [43] bewehrt. Der Ablauf der Herstellung des gradierten Trägers ist in Abb. 4.12 dargestellt.

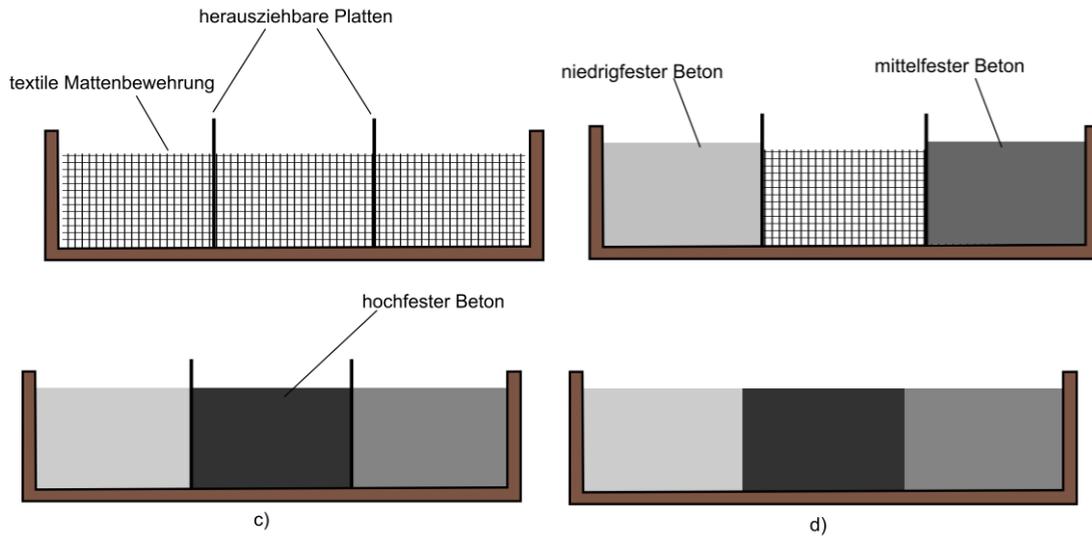


Abb. 4.12: Reihenfolge des Betonierens des gradierten Trägers: (a) anbringen der herausziehbaren Platte und einbringen der Bewehrung, (b) betonieren der äußeren Abschnitte, (c) betonieren des mittleren Abschnitts, (d) ziehen der Platte

Der Steg hat insgesamt eine Länge von 150 cm und wurde in drei Abschnitte zu je 50 cm unterteilt. In jedem dieser Abschnitte wurde eine andere zementreduzierte Betonmischung gegossen. Dafür wurden zur Abtrennung vertikal verschiebliche dünne Streifen, die aus Schaltafeln geschnitten wurden, verwendet, die auch gleichzeitig als Abstandhalter für das Textil dienen. Zuerst wurden die zwei äußeren Felder gegossen, danach das mittlere und schlussendlich die vertikalen Platten herausgezogen (siehe Abb. 4.12). Da das mittlere Feld noch vor dem Abbinden der äußeren betoniert wurde, kann man von einem frisch-auf-frisch Gießen sprechen.



Abb. 4.13: Betonierter Steg in Schalung (rechts), vertikale Fuge (links)

Es zeigte sich deutlich, dass die abgeänderten Betonmischungen aus Kap. 4.1.2 nach mehrmaliger Anpassung der Fließmittelzugabe eine gute Verarbeitbarkeit haben. An Abbildung 4.14 kann man sehen, dass das Trennen der Betonmischungen mit der vertikal verschieblichen Platte gut gelungen ist und keine Instabilitäten beim Ziehen der Platte aufgetreten sind. Die Forderung nach selbstverdichtenden Betonen wurde erfüllt. Dieser Machbarkeitsnachweis zeigt, dass die Umsetzung der Optimierungsstrategien gut gelingen kann.



Abb. 4.14: ausgeschalter Trägersteg

Kapitel 5

Auswertung

Die Strukturoptimierung von Textilbeton zur Erzielung umweltfreundlicherer Bauteile kann auf verschiedene Arten erfolgen. Neben der Entwicklung und Verwendung zementreduzierter Betone, kann durch eine Querschnittsoptimierung erreicht werden, dass die Betoneigenschaften maximal ausgenutzt werden. Allein durch die Optimierung des Querschnittes wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben, kann für einen 6 m langen Träger ein Volumen von $0,0207 \text{ m}^3$ Beton eingespart werden. Das wären bei Verwendung von UHPC für den gesamten Träger 15,53 kg Zement. Des Weiteren kann durch eine lokale Abstufung über die Länge des Bauteils, einer sogenannten Grädierung, eine passgenaue Anordnung der Betonsorten erfolgen, siehe Kapitel 3.4. Durch die abschnittsweise Festlegung unterschiedlicher Betonsorten mit unterschiedlichen Festigkeiten, können diese gezielt an die Einwirkung im jeweiligen Bereich angepasst werden. Dies führt dazu, dass der Beton in jedem Abschnitt des Bauteils möglichst wirtschaftlich eingesetzt wird und keine Verschwendung der Ressourcen erfolgt. Der steigende Grad der Vorfertigung und Automatisierung bei der Herstellung von Bauteilen eröffnet Möglichkeiten, genauestens gradierte Bauteile herzustellen, bei denen an jeder Stelle die Leistungsfähigkeit des Betons an die Anforderung des Bauteils angepasst werden kann.

Die Vorteile bei der Verwendung von Textilbewehrung anstelle herkömmlicher Stahlbewehrung liegen im geringeren Eigengewicht und der Beständigkeit gegen chemische Angriffe. Spezielle Carbonbewehrung ist nicht korrosionsanfällig und im alkalischen Milieu des Betons beständig. Allein durch Verwendung solch textiler Bewehrung kann aufgrund des geringeren Eigengewichts und dem Wegfall der Mindestbetondeckung viel Kubatur und somit Zement eingespart werden.

Die Ansätze der in dieser Arbeit verfolgten Strukturoptimierung verfolgen alle das gleiche Ziel, nämlich die Reduktion von Zement und der durch die Zementproduktion hohen Emissionen. Der Vergleich der Ökobilanzkennwerte in Kapitel 3.5 zeigt, dass durch den Austausch von UHPC mit zementreduzierten Betonen und einer bereichsweisen Abstufung eine Reduzierung des GWP von $93,71 \text{ kg}/\text{CO}_2$ auf $17,1 \text{ kg}/\text{CO}_2$ möglich ist. Außerdem reduziert sich der Primärenergiebedarf von $602,06 \text{ MJ}$ auf $134,66 \text{ MJ}$.

In eigenen experimentellen Untersuchungen wurde versucht zementreduzierte Betone aus der Literatur unter Berücksichtigung lokal verfügbarer Ressourcen selbst herzustellen und die Leistungsfähigkeit zu beurteilen. Die Herausforderungen bei der Erstellung der Betonrezepturen war, eine gut verarbeitbare Konsistenz trotz reduziertem Zementgehalt zu erhalten. Die Substitution des Zements durch Kalksteinmehl erhöhte den Gehalt der Bindemittelmatrix, und gemeinsam mit einer angepassten Menge an Fließmittel konnten die Betone in der Ausbreitklasse sehr weich hergestellt werden.

Die Druckversuche der in Kapitel 4.1.2 beschriebenen Betone bewiesen eine hohe Leistungsfähigkeit trotz reduzierter Zementmenge. Auch konnte eine gute Abstufung der Festigkeiten erzielt werden. Das beweist, dass trotz einer Zement- und dadurch Emissionseinsparung durch eine optimierte Betonrezeptur leistungsstarke Betone hergestellt werden können.

Die grundsätzliche Herstellbarkeit von gradierten Bauteilen wird in Kapitel 4.3 demonstriert. Durch eine gute Versuchsplanung und den Einsatz von vertikal verschieblichen Platten lässt sich die Gradierung über die Länge eines Bauteils ohne Probleme herstellen. Das Verbundverhalten der aneinander treffenden Betone wird in Kapitel 4.2 mittels Spaltzugversuch untersucht und zeigt, dass bei allen drei Kombinationen der Betonmischungen ein guter Verbund vorliegt und die Bruchfläche durch den Beton verläuft. Durch das frisch-auf-frisch Gießen entstehen keine Schwachstellen im Verbund. Wichtig für die Herstellung abgestufter Bauteile ist eine gute Verarbeitbarkeit der Betone und eine gute Abstimmung der rheologischen Parameter damit keine Instabilitäten auftreten.

Generell konnte in dieser Arbeit gezeigt werden, dass die Strategien zur Optimierung des Trägers mit dem Hauptziel der Zement- und somit Emissionseinsparung durchführbar und zielführend sind. Der genaue Vergleich der Ökobilanz des optimierten mit dem originalen Träger aus UHPC in Kapitel 3.5 zeigt eindeutig, dass eine erhebliche Menge an Treibhausgasen und anderen Emissionen eingespart werden können. Weiters konnte die Herstellbarkeit der gradierten Bauteile und der zementreduzierten Betone bewiesen werden.

Durch den logistischen Aufwand beim frisch-auf-frisch Gießen, bei dem mehrere Mischer gleichzeitig zum Einsatz kommen, ist die lokale Gradierung auf den Einsatz im Bereich Fertigteil beschränkt. Durch den steigenden Fertigungsgrad von Bauteilen ist es in Zukunft jedoch sicher einfacher möglich, genau angepasste, gradierte Bauteile herzustellen.

Literatur

- [1] WWF (2021). *Unser Einfluss auf das Klima*. abgerufen am 29.04.2021. URL: <https://www.wwf.at/de/klilmawandel>.
- [2] Deutsches Klima-Konsortium (2020). *Was wir heute übers Klima wissen*. abgerufen am 29.04.2021. URL: <https://www.deutsches-klima-konsortium.de/de/basisfakten/2-mensch>.
- [3] Proske, T., S. Hainer, M. Jakob, H. Garrecht und C.-A. Graubner (2012). „Stahlbetonbauteile aus klima- und ressourcenschonendem Ökobeton“. In: *Beton- und Stahlbetonbau 107*, Heft 6.
- [4] Torelli, G. und J.-M. Lees (2019). „Fresh state stability of vertical layers of concrete“. In: *Cement and Concrete Research 120*, S. 227-243.
- [5] WWF (2019). *Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie*. abgerufen am 07.03.2021. URL: https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_Klimaschutz_in_der_Beton-_und_Zementindustrie_WEB.pdf
- [6] Pramer, P. (Mai 2019). *Böser Beton: Warum Zement der geheime Klimakiller ist*. abgerufen am 28.04.2021. URL: <https://www.derstandard.at/story/2000102411187/boeser-beton-warum-zement-der-geheime-klimakiller-ist>.
- [7] Proske, T., C.-A. Graubner und S. Hainer (2012). „Ökobetone zur Herstellung von Betonfertigteilen“. In: *Darmstädter Betonfertigteiltage 2012*.
- [8] Bender-Graß, S., C. Geisenhanslüke, A. Hahn, A. Paatsch, R. Rösler und H. Uhlig (2015). *Betonhandbuch*. Leipzig: Opterra GmbH
- [9] Bergmeister, K., F. Fingerloos, J.-D. Wörner (2018). *Betonkalender 2018*. Ernst&Sohn.
- [10] Baunetz_Wissen (2021). *Betonherstellung und Klimaschutz*. abgerufen am 28.04.2021. URL: <https://www.baunetzwissen.de/beton/fachwissen/herstellung/betonherstellung-und-klimaschutz-7229519>.
- [11] Juhart, J., David G.-A., M. R. M. Saade, C. Baldermann, A. Passer und F. Mittermayr (2019). „Functional and environmental performance optimization of Portland cement-based materials by combined mineral fillers“. In: *Cement and Concrete Research 122*, S. 157-178.
- [12] 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. DOI: 10.1002/suco.201700225.
- [13] Herrmann, M. und W. Sobek (2016). „Functionally graded concrete: Numerical design methods and experimental tests of mass-optimized structural components“. In: *Structural Concrete 2017*, S. 54-66. DOI: 10.1002/suco.201600011.
- [14] Preinstorfer, P. (2019). „Zur Spaltrissbildung von textilbewehrtem Beton“. Diss. TU Wien
- [15] Torelli, G., M. Gimenez Fernández und J.-M. Lees (2020). „Functionally graded concrete: design objectives, production techniques and analysis methods for layered and continuously graded elements“. Techn. Ber. University of Sheffield

- [16] Heinz, P., M. Herrmann und W. Sobek (2011). „Herstellungsverfahren und Anwendungsbereiche für funktional gradierte Bauteile im Bauwesen“. Fraunhofer IRB Verlag.
- [17] Mahamood, R. M. und E. Titilayo Akinlabi (2017). „Functionally Graded Materials“. Springer Verlag.
- [18] Aylie, H., B. S. Gan und M. M. A. Pratama (2016). „Effects of graded concrete on compressive strengths“. In: *International Journal of Technology* 2016.5, S.530-538. ISSN: 2086-9614.
- [19] Lipka, A. (2007). „Verbesserter Materialeinsatz innovativer Werkstoffe durch die Topologieoptimierung“. Diss. Universität Stuttgart.
- [20] Kang, B.-G. (2011). „Modellierung von Textilbeton auf der Mikroskalenebene“. Diss. RWTH Aachen.
- [21] Curbach, M. und F. Jesse (2009). „Eigenschaften und Anwendung von Textilbeton“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 104, Heft 1. DOI: 10.1002/best.200800653.
- [22] Technische Universität Dresden (2018). „Baustofflösungen heute und morgen. Bauen mit Carbonbeton – Baustoffliche Herausforderungen“. Potsdam: BetonForum
- [23] Voss, S. (2008). „Ingenieurmodelle zum Tragverhalten von textillbewehrtem Beton“. Diss. RWTH Aachen.
- [24] Hais, M., J. S. Moffatt, R. Breiner, M. Vogel und H. S. Müller (2016). „Ansatz zur Quantifizierung der Nachhaltigkeit von Beton auf der Baustoffebene“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 111, Heft 10. DOI: 10.1002/best.201600036.
- [25] ÖNORM EN 197-1 (2018). *Zement - Teil1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.
- [26] Proske, T., M. Rezvani, S. Hainer und C.-A. Graubner (2014). „Mischungszusammensetzung nachhaltigkeitsoptimierter Konstruktionsbetone auf Basis internationaler Regelwerke“. In: *Beton- und Stahlbetonbauteile* 109, Heft 10. DOI: 10.1002/best.201400040.
- [27] Bergmeister, K., F. Fingerloos, J.-D. Wörner (2019). *Betonkalender 2019*. Ernst&Sohn
- [28] ÖNORM EN ISO 14044 (2021). *Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.
- [29] Haist, M., J. S. Moffatt, R. Breiner und H. S. Müller (2014). „Entwicklungsprinzipien und technische Grenzen der Herstellung zementarmer Betone“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 109, Heft 3. DOI: 10.1002/best.201300068.
- [30] Preinstorfer, P., P. Huber, T. Huber, B. Kromoser und J. Kollegger (2021). „Experimental investigation and analytical modelling of shear strength of thin walled textile-reinforced UHPC beams“. In: *Engineering Structures* 231.
- [31] Schneider, K., M. Butler und V. Mechtcherine (2017). „Carbon Concrete Composite C³ - Nachhaltige Bindemittel und Betone für die Zukunft“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 112, Heft 12. DOI: 10.1002/best.201700058.
- [32] Schneider, K. (2016). *Matrix-Datenblatt: C3-B2-NF-1-150-8*. Techn. Ber. TU Dresden.
- [33] Schneider, K. (2016). *Matrix-Datenblatt: C3-B2-HF-2-145-5*. Techn. Ber. TU Dresden.
- [34] ÖNORM EN 1992-1-1 (2015). *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau (konsolidierte Fassung)*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.
- [35] Rempel, S., M. Ricker und J. Hegger (2020). „Biegebemessungsmodell mit einer geschlossenen und iterativen Lösung für Textilbetonbauteile“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 115. DOI: 10.1002/best.201900086.
- [36] Ghadioui, R. E. und C. A. Graubner (2019). „Querkrafttragfähigkeit carbonbewehrter Betonbauteile ohne Querkraftbewehrung“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 114, Heft 11. DOI: 10.1002/best.201900052

- [37] Preinstorfer, P. und J. Kollegger (2020). „New Insights into the Splitting Failure of Textile-Reinforced Concrete“. In: *Composite Structures* 243, S. 1-10. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112203.
- [38] Kulas, C. (2014). „Zum Tragverhalten getränkter textiler Bewehrungselemente für Betonbauteile“. Diss. RWTH Aachen.
- [39] Bielak, J., M. Schmidt, J. Hegger und F. Jesse (2020). „Structural Behavior of Large-Scale I-Beams with Combined Textile and Cfrp Reinforcement“. In: *Applied Sciences* 10, S. 1-26. DOI: 10.3390/app10134625
- [40] Baumgart, R. (2020). *Bemessung für Querkraft*. Skript. Hochschule Darmstadt.
- [41] Kinast, A. (2018). „Vergleich der ökologischen Auswirkungen von carbonbewehrten ultrahochfesten – mit konventionellen Betonbaukonstruktionen“. Diplomarbeit. TU Wien
- [42] Malárics, V. (2010). „Ermittlung der Betonzugfestigkeit aus dem Spaltzugversuch an zylindrischen Betonproben“. Diss. Karlsruher Institut für Technologie.
- [43] Solidian GmbH (April 2021). *Solidian GRID Q142/142-CCE-25*. URL: <https://www.solidian.com/de/products/solidian-grid-de/>.