

Master's Thesis

Life cycle cost analysis of a integral road bridge made of concrete with non-metallic reinforcement

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

Diplomarbeit

Lebenszykluskostenanalyse einer Straßenbrücke in Rahmenbauweise aus Beton mit nichtmetallischer Bewehrung

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

von

Philipp Grasl, BSc

Matr.Nr.: 11802475

unter der Anleitung von

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

Dipl.-Ing. Dr.techn. **Tobias Huber, BSc**

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

Wien, im März 2024

Danksagung

Mein Dank gilt vor allem Herrn O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. M.Eng Johann Kollegger und Herrn Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Tobias Huber, die mir die Möglichkeit zur Bearbeitung dieses Themas gegeben haben. Besonders möchte ich Herrn Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Tobias Huber danken, der mich bereits bei meiner Bachelorarbeit betreut und mich auch während meiner Diplomarbeit unterstützt hat. Seine engagierte Betreuung, fachliche Anleitung und die thematischen Diskussionen haben mein Verständnis für wissenschaftliches Arbeiten vertieft und mich zu neuen Perspektiven angeregt. Für seine Unterstützung möchte ich mich auch bei Herrn Assistent Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Philipp Preinstorfer bedanken.

Ein Dank gebührt auch meinen Freunden und Studienkollegen, die mich während meiner Studienzeit begleitet, unterstützt aber auch motiviert haben. Ohne euch könnte ich nicht, trotz aller Herausforderungen, auf eine so schöne gemeinsame Studienzeit zurückblicken. Vor allem möchte ich meinem Freund Maximilian Gaßner danken, bei dem ich nicht nur einen Studienkollegen, sondern auch einen Freund fürs Leben gefunden habe. Vielen Dank für die unzähligen gemeinsamen produktiven, aber auch lustigen Stunden, in denen wir gemeinsame Projekte umgesetzt und uns Wissen angeeignet haben.

Ein besonderer Dank gebührt auch meinen Eltern und Großeltern, die mich stets bedingungslos unterstützt haben. Ohne ihre Unterstützung wäre ich nicht hier, wo ich heute bin, und nicht die Person, die ich geworden bin. Sie haben mich all die Jahre nicht nur in allen Belangen des täglichen Lebens unterstützt, sondern mich durch ihre Begeisterung für meine Ausbildung immer wieder ermutigt und motiviert.

St.Pölten im März 2024

Philipp Grasl

Kurzfassung

Die Lebenszykluskosten von Bauwerken, sowohl im Tief- als auch im Hochbau, gewinnen bei Investitionsentscheidungen immer mehr an Bedeutung. In dieser wissenschaftlichen Arbeit wird das Einsatzpotential nichtmetallischer Bewehrungen bei einem Infrastrukturbauwerk, genauer einer Straßenbrücke in Rahmenbauweise, analysiert. Hauptkostentreiber bei der Instandhaltung von Infrastrukturbauwerken sind Schäden, die durch Korrosion verursacht werden. Der Einsatz von nichtmetallischer Bewehrung birgt aufgrund ihrer Korrosionsbeständigkeit großes Potential zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit. Potentielle Einsatzfelder von nichtmetallischer Bewehrung sind Bereiche, wo die Verbesserung der Dauerhaftigkeit, Materialeffizienz und Instandhaltung gefordert ist. In dieser Arbeit werden Lebenszyklusanalysen für eine Straßenbrücke in Rahmenbauweise durchgeführt, um das ökonomische Einsatzpotenzial an einem sehr häufig vorkommenden Infrastrukturbauwerk zu bewerten. Die Gegenüberstellung der vier analysierten Bewehrungsmaterialien (Stahl, Glas, Basalt, Carbon) erfolgt unter Berücksichtigung der material-spezifischen Bemessung, der Annahme einer verbesserten Instandhaltung und der Beachtung eines entsprechenden Entsorgungsszenarios. Die Auswirkungen einzelner Parameter werden mithilfe einer Sensitivitätsanalyse quantifiziert, und für die bedeutendsten Parameter werden zusätzliche Szenarien untersucht.

Der erste Abschnitt behandelt grundlegende Aspekte nichtmetallischer Bewehrungen, einschließlich des Entwurfs materialgerechter Bauteile und der Dauerhaftigkeit von Beton mit nichtmetallischer Bewehrung. Es wird auf die Herausforderungen des Stahlbetons eingegangen, welche sich auf Nachhaltigkeit, Instandhaltung und Schäden beziehen. Anschließend werden die Grundlagen der Lebenszykluskostenanalyse erläutert. Der zweite Abschnitt befasst sich mit Lebenszyklusanalysen einer Straßenbrücke in Rahmenbauweise. Dieser umfasst die Beschreibung des Entwurfs, die Bemessung für materialgerechte Bauteile sowie die Methodik zur Berechnung und die Berechnung der Lebenszykluskosten. Im dritten Abschnitt werden die Ergebnisse analysiert, und anschließend wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um die wichtigsten Parameter zu ermitteln. Im nächsten Schritt wird eine Analyse mit verschiedenen Szenarien durchgeführt, um das Einsatzpotenzial von nichtmetallischer Bewehrung besser zu verdeutlichen.

Es wurde gezeigt, dass höhere Investitionskosten der nichtmetallischen Bewehrungen durch geringere Betriebs- und Nutzerkosten kompensiert werden können. Die Kosteneinsparungen werden durch geringere Instandhaltungsarbeiten und zugleich kürzere Maßnahmendauern erzielt. Der Einsatz von Bewehrungen aus Basaltfasern kann basierend auf dem derzeitigen Kenntnisstand bereits ökonomische Vorteile im Vergleich zu Betonstahl bieten. Der Einsatz von Carbon ist aufgrund der hohen Anschaffungskosten, der hohen Lebenszykluskosten und der geringen Nachhaltigkeit noch mit Hindernissen verbunden. Die Sensitivitätsanalyse hat gezeigt, dass die Zinssätze zu den Parametern gehören, die den größten Einfluss auf die Lebenszykluskosten haben. Zusätzlich zu den Zinssätzen haben das Verkehrsaufkommen und die Geschwindigkeitsdifferenz einen signifikanten Einfluss auf die Nutzerkosten. Die untersuchten Szenarien zeigen, dass bei einem hohen Verkehrsaufkommen (JDTV 30.000 bis 40.000) über und/oder unter der Brücke nicht nur für die Basaltfaser, sondern auch für die Glasfaser ökonomisches Einsatzpotenzial besteht.

Abstract

The life cycle costs of structures, both in civil engineering and building construction, are becoming increasingly important in investment decisions. This thesis analyses the potential use of non-metallic reinforcements in an transport infrastructure, more precisely an integral road bridge. The use of non-metallic reinforcement has great potential to improve durability due to the higher corrosion resistance. Potential fields of application for non-metallic reinforcement are areas where the improvement of durability, material efficiency and maintenance is required. The main cost drivers in the maintenance of infrastructure structures are damages caused by corrosion. In this thesis, life cycle analyses are carried out for an integral road bridge in order to investigate the economic potential on a very frequently occurring infrastructure type. The comparison of the four analysed reinforcement materials (steel, glass, basalt, carbon) takes into account the material-specific design, the assumption of improved maintenance and the consideration of a corresponding disposal scenario. The effects of individual parameters are quantified using a sensitivity analysis, and additional scenarios are analysed for the most relevant parameters.

The first section deals with fundamental aspects of non-metallic reinforcement, including the specific design requirements and the durability of reinforcement made out of fibre-reinforced polymers. The challenges of reinforced concrete relating to sustainability, maintenance and deterioration are discussed. Subsequently, the basics of life cycle cost analysis are explained. The second section deals with life cycle analyses of an integral road bridge. This includes the description of the design, the structural design of components with non-metallic reinforcements as well as the methodology for the calculation of the life cycle costs. In the third section, the results are analysed and then a sensitivity analysis is carried out to determine the most relevant parameters. In the next step, an analysis with different scenarios is carried out to better illustrate the ideal application field of non-metallic reinforcement.

It was shown that higher investment costs for non-metallic reinforcements can be compensated for by lower operating and user costs. The cost savings are achieved through less maintenance work and at the same time shorter durations of maintenance measures. Based on current knowledge, the use of basalt fibre reinforcement can already offer economic advantages compared to reinforcing steel. The use of carbon fibre reinforcement is still associated with obstacles due to the high costs, high life cycle costs and lower sustainability. The sensitivity analysis has shown that interest rates are one of the parameters that have the greatest influence on life cycle costs. In addition to interest rates, the volume of traffic and the speed difference have a significant influence on user costs. The scenarios investigated show that with a high volume of traffic (JDTV 30,000 to 40,000) above and/or below the bridge, there is economic potential not only for reinforcement made out of basalt fibre, but also for glass fibre.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
1.1	Ausgangslage	11
1.2	Zielsetzung und Methodik	12
1.3	Abgrenzung	13
2	Grundlagen	14
2.1	Nichtmetallische Bewehrungen	14
2.1.1	Allgemeines	14
2.1.2	Fasermaterial	15
2.1.3	Matrix	16
2.1.4	Bewehrungsarten	16
2.1.5	Anwendungsbeispiele nichtmetallischer Bewehrung im Infrastrukturbau	18
2.1.6	Mechanische Materialeigenschaften	21
2.1.7	Dauerhaftigkeit	21
2.1.8	Bemessung	26
2.1.9	Nachhaltigkeit	32
2.2	Lebenszykluskostenanalyse	36
2.2.1	Allgemeines	36
2.2.2	Lebenszykluskosten einer Straßenbrücke in Rahmenbauweise nach RVS 13.05.11	37
2.2.3	Berechnung der Nutzerkosten nach RVS 02.01.22	39
2.2.4	Kostenwerte für den Einsatz nichtmetallischer Bewehrung	42
3	Lebenszyklusanalyse	46
3.1	Beschreibung des Entwurfs	46
3.1.1	Allgemeine Beschreibung	46
3.1.2	Beschreibung der Berechnung für materialgerechte Bauteile	48
3.2	Allgemeine Methodik zur Berechnung der Lebenszykluskosten von Bauteilen mit nichtmetallischer Bewehrung	56
3.2.1	Errichtungskosten	56
3.2.2	Betriebskosten	57
3.2.3	Nutzerkosten	58
3.2.4	Entsorgungskosten	59
3.3	Berechnung der Lebenszykluskosten	60
3.3.1	Ermittlung der Massen für die Lebenszyklusanalyse	60
3.3.2	Errichtungsphase (A)	62
3.3.3	Betriebsphase (B) - Betriebskosten	63
3.3.4	Nutzen und Belastungen für die Allgemeinheit (D) - Nutzerkosten	63
3.3.5	Entsorgungsphase (C)	64

3.3.6	Ergebnisse	65
4	Diskussion der Ergebnisse	68
4.1	Sensitivitätsanalyse	69
4.1.1	Nutzerkosten	70
4.1.2	Zinssätze	71
4.2	Szenario 1 - Randbalken aus FVK-Beton	72
4.3	Szenario 2 - Kein Verkehrsweg unter Brücke	74
4.4	Szenario 3 - Reduzierung der Geschwindigkeitsdifferenz	76
4.5	Szenario 4 - Erhöhung des JDTV's auf und unter der Brücke um 10.000	78
4.6	Szenario 5 - Erhöhung des JDTV's auf der Brücke um 20.000	80
4.7	Szenario 6 - Erhöhung des JDTV's unter der Brücke um 20.000	82
5	Zusammenfassung	85
5.1	Schlussfolgerung	85
5.2	Ausblick	87
A	Statische Berechnung der Straßenbrücke in Rahmenbauweise	100
B	Sensitivitätsanalyse	102

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Ausgangslage

Stahlbeton gehört zu den weltweit am meisten verwendeten Baustoffen [1], wobei der Einsatz von Beton Jahr zu Jahr weiter zunimmt. Zur Herstellung von Beton werden jedes Jahr über eine Milliarde Tonnen Trinkwasser verbraucht [1]. Stahlbeton ist grundsätzlich sehr langlebig, jedoch muss die Stahlbewehrung vor Umwelteinflüssen geschützt werden, da die Hauptursache der Schäden auf Korrosion der Stahlbewehrung zurückzuführen ist [2]. Etwa 75% der Schadensursachen an Betonoberflächen von Brückenbauwerken sind chloridinduzierte und carbonatisierungsinduzierte Korrosion, wobei chloridinduzierte Korrosion den mit Abstand größten Anteil ausmacht [3]. Der grundsätzliche Schutz vor Korrosion wird hauptsächlich durch eine höhere Betondeckung und damit eine Erhöhung der Dicke erreicht [4]. Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen, ohne unwirtschaftliche Bauteilgeometrien zu erzeugen, besteht darin, die Stahlbewehrung durch ein alternatives, haltbares und vor allem korrosionsbeständiges Material wie faserverstärkte Kunststoffe (FVK) zu ersetzen [5]. Bei FVK-Bewehrungen kommen hauptsächlich die Fasermaterialien Basalt, Glas und Carbon zum Einsatz, wobei diese in eine Matrix aus Kunststoff eingebunden werden [4]. Um ökonomische und ökologische Vorteile durch den Einsatz von nichtmetallischer Bewehrung zu erzielen, sollte diese in Bereichen eingesetzt werden, in den konventionelle Stahlbewehrung Schwächen aufweist, wie z.B. im Infrastrukturbau [6]. FVK-Bewehrungen zeigen hohes Einsatzpotential bei der Verbesserung der Dauerhaftigkeit, Materialeffizienz und Instandhaltung auf. Zusätzlich kann Meerwasser in mariner Umgebung eine hervorragende Alternative für die Betonherstellung darstellen [1]. Bisher ist seine Verwendung aufgrund der Gefahr von Korrosion des Stahls untersagt, welche bei Verwendung von FVK-Bewehrung nicht mehr vorhanden wäre [1].

Die ÖNORM EN 1992-1-1 [7] legt im Rahmen der Dauerhaftigkeit eine Mindestbetondeckung für Stahlbetonbauteile fest. Stahlbetonbauteile, die verschiedenen Arten von chloridhaltigem Wasser (darunter auch Tausalz oder Meerwasser mit Expositionsklasse XD und XS) ausgesetzt sind, erfordern die größten Betondeckungen. Dies gilt insbesondere für Bauteile, die wechselnd nass und trocken sind, beispielsweise aufgrund von Spritzwasser. Dabei sind Konstruktionen wie Bahnsteigkanten (Tausalz), Stützen von Überführungen (Spritzwasser) und Stützmauern (drückendes Wasser) betroffen. Ufermauern sind einer besonders hohen Beanspruchung ausgesetzt, da sie sich in Küstennähe im Spritzwassergebiet befinden [8]. Selbst bei nicht vorhandenem Tausalz kann Bewehrungskorrosion auftreten, die durch Karbonatisierung ausgelöst wird, wenn Stahlbetonbauteile Luft und Feuchtigkeit ausgesetzt sind. Hierbei sind insbesondere Außenbauteile, die direkter Beregnung ausgesetzt sind, anfällig. Falls Bauteile die theoretische Nutzungsdauer von 50 Jahren überschreiten, ist eine zusätzliche Erhöhung der Betondeckung erforderlich [7]. In Anbetracht dieser Fakten und Konstruktionsregeln erfordern Infrastrukturbauwerke eine hohe Betondeckung, um Bewehrungskorrosion zu minimieren. Allerdings kann Korrosion dennoch auftreten.

Die Verwendung von nichtmetallischen Bewehrungen, insbesondere FVK-Bewehrungen, weist im Vergleich zu Stahlbetonbauteilen aufgrund ihrer Korrosionsbeständigkeit eine erheblich längere Lebensdauer auf. Es ist jedoch zu beachten, dass es zurzeit nur wenige Langzeitbeobachtungen (> 30 Jahre) gibt [9, 10]. Das derzeitige Wissen über das Langzeitverhalten von FVK-Bewehrungen beruht hauptsächlich auf beschleunigten Alterungstests (z.B. nach DAfStb-Richtlinie [11]). Generell kommt es zu einer Abnahme der Festigkeit über die Lebensdauer, wobei die Abnahme stark von der verwendeten Faser abhängt. Carbonfasern weisen die höchste Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen auf. In Seifert und Lieboldt [12] wird bei einer ordnungsgemäßen Anwendung von Carbonbeton eine Lebensdauer von bis zu 200 Jahren erwartet.

In Barisic [13] wird die Verbesserung der Materialeffizienz genauer erläutert. In Bauteilen mit nichtmetallischer Bewehrung kann die Betonüberdeckung aus Gründen der Dauerhaftigkeit entfallen. Hierbei hängt die Höhe der Betondeckung lediglich von den Verbundanforderungen ab. Darüber hinaus ermöglichen die guten mechanischen Eigenschaften nichtmetallischer Bewehrungen, vor allem CFVK-Bewehrung, den Einsatz kleinerer Querschnittsflächen, was zu schlankeren Bauteilen führt. Die erlaubt insbesondere die Optimierung von stark bewehrten Bauteilen, wie Stützbereiche und Rahmenecken. Die geringe Dichte der nichtmetallischen Bewehrung führt zu einem effizienteren Transport und Einbau. Jedoch hängt die Optimierung der Querschnittsfläche von mehreren Faktoren ab, darunter die Betonfestigkeit und die Querschnittsform.

In Konstruktionen, bei denen Inspektionen schwer durchführbar sind, können verschiedene Maßnahmen ergriffen werden, um das Auftreten der Korrosion zu verlangsamen. Dennoch wird das Eintreten der Korrosion nicht verhindert. Diese Systeme führen lediglich zu hohen Erhaltungs- und Monitoringkosten [8]. Wenn korrosionsbeständige Bewehrung eingesetzt wird, sind keine zusätzlichen Korrosionsschutzmaßnahmen erforderlich. Dies führt zu weniger Monitoring- und Instandsetzungsmaßnahmen, was zu potentiellen Einsparungen bei den Instandhaltungskosten führen könnte.

Es wurden bereits einige Brücken aus FVK-Beton realisiert, wie zum Beispiel die Fuß- und Radwegbrücke aus Carbonbeton in Albstadt-Ebingen und die Fußgängerbrücke in Albstadt-Lautlingen. Bisher wurden die Anwendungen durch bauaufsichtliche Zulassungen der Produkte und durch Zulassungen im Einzelfall (ZiE) geregelt. Einheitliche Regelungen zur Bemessung von FVK bewehrten Materialien erleichtern die Anwendung, wodurch der Einsatz für Auftraggeber und Auftragnehmer attraktiver gemacht wird. Aus diesem Grund hat auch der Deutsche Ausschuss für Stahlbetonbau (DAfStb) kürzlich eine entsprechende Richtlinie für "Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung"[11] veröffentlicht. Zusätzlich dazu wird in der neuen Auflage des Eurocodes 2 erstmals die Anwendung von FVK-Bewehrungen in einem entsprechenden informativen Anhang geregelt [14].

1.2 Zielsetzung und Methodik

Aufbauend auf der im vorangegangenen Abschnitt 1.1 definierten Ausgangslage ist es das Ziel dieser Arbeit, eine ökonomische Analyse einer Straßenbrücke in Rahmenbauweise durchzuführen und ihr ökonomisches Einsatzpotential zu verdeutlichen. Um das ökonomische Potential von nichtmetallischer Bewehrung festzustellen, werden die Lebenszykluskosten (LZK) der Straßenbrücke analysiert. Die Berechnungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) und Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) werden mittels einer Parameterstudie durchgeführt. Diese

berechnet, je nach Bewehrungsvariante, sei es Stahl-, Basalt-, Glas- oder Carbonbewehrung, einen optimalen Entwurf materialgerechter Bauteile entsprechend der Methodik von Preinstorfer et al. [15]. In einem nächsten Schritt wird mit den Ausgangswerten der Parameterstudie eine ganzheitliche Betrachtung durch vergleichende Lebenszyklusanalysen (LZK-Analysen) entsprechend [6] durchgeführt. Die dafür erforderlichen Grundlagen werden in Abschnitt 2 erläutert. In Abschnitt 3 werden die Methodik zur Berechnung und die Berechnung sowie Ergebnisse der Straßenbrücke in Rahmenbauweise vorgestellt. Anschließend werden in Abschnitt 4 wesentliche Parameter identifiziert und die Untersuchung zusätzlicher Szenarien diskutiert.

1.3 Abgrenzung

Die Bemessung der Rahmenbrücke erfolgt auf Basis von Normen und Richtlinien für Stahlbeton und Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung. Abminderungsbeiwerte sowie Materialeigenschaften der Faserverbundwerkstoffe werden anhand von Herstellerangaben ergänzt. Bei der Bemessung der Bauteile werden keine Nachweise auf Querkrafttragfähigkeit und Ermüdung sowie geotechnische Nachweise berücksichtigt. Die Lebenszykluskostenanalyse erfolgt anhand von Richtlinien, wobei diese bei der Berechnung der Lebenszykluskosten von Bauteilen mit nichtmetallischer Bewehrung teilweise angepasst werden muss. Diese Anpassungen wurden entsprechend der vorgeschlagenen Methodik nach Huber [6, 16] vorgenommen, und um die Nutzerkosten nach RVS 02.01.22 [17] ergänzt.

Kapitel 2

Grundlagen

2.1 Nichtmetallische Bewehrungen

2.1.1 Allgemeines

Nichtmetallische Bewehrungen, auch als Faserverbundwerkstoffe (FVK; bzw. engl. Fibre reinforced polymer FRP) bezeichnet, sind Kompositwerkstoffe bei denen Verstärkungsfasern in eine Kunststoffmatrix eingebettet sind. Durch die verstärkende Faser wird dem Kompositwerkstoff die Festigkeit und Steifigkeit verliehen [18]. Dadurch trägt die Faser den größten Teil der aufgebracht Last ab [19]. Die Matrix verbindet die einzelnen Fasern mithilfe von Adhäsionskräften, wodurch die Formstabilität des Baustoffes gewährleistet wird [20]. Neben der Lagesicherung der einzelnen Fasern übernimmt die Kunststoffmatrix auch die Aufgabe, die Fasern vor mechanischer Beschädigung zu schützen [20]. Die unidirektionale Orientierung der Fasern innerhalb der Matrix ist für ein stark richtungsabhängiges Verhalten verantwortlich, das sich durch wesentlich höhere Zugfestigkeiten und Steifigkeiten entlang der Faserorientierung auszeichnet.

Das Fasermaterial kann sowohl aus organischen als auch anorganischen Materialien hergestellt werden. Im Bauwesen haben sich insbesondere Glas und Basalt als anorganische Vertreter etabliert, während Carbon und Aramid als organische Vertreter Verwendung finden [4].

Nichtmetallische Bewehrungen haben folgende Vorteile [6], die ihren Einsatz als Bewehrung im Beton attraktiv machen:

- Sehr hohe Festigkeit
- Korrosionsbeständigkeit
- Geringes Gewicht
- Je nach Faser elektrisch leitfähig (z.B. Carbon) oder nicht elektrisch leitfähig (z.B. Glas)
- Geringer Abrasionswiderstand
- Nicht magnetisch

Grundsätzlich können nichtmetallische Bewehrungen in einer Vielzahl von Kombinationen von Fasern und Matrixmaterial hergestellt werden. Die nachfolgend angeführten Faser- und Matrixmaterialien, sowie Produktgruppen sind Ergebnis einer durchgeführten Umfrage unter FVK-Herstellern in Europa [4] und stellen somit die meist verwendeten Produkte am europäischen Markt dar. In Abbildung 2.1 sind die verwendeten Kombinationen aus Faser- und Matrixmaterial, sowie deren Verwendung je Produktgruppe dargestellt.

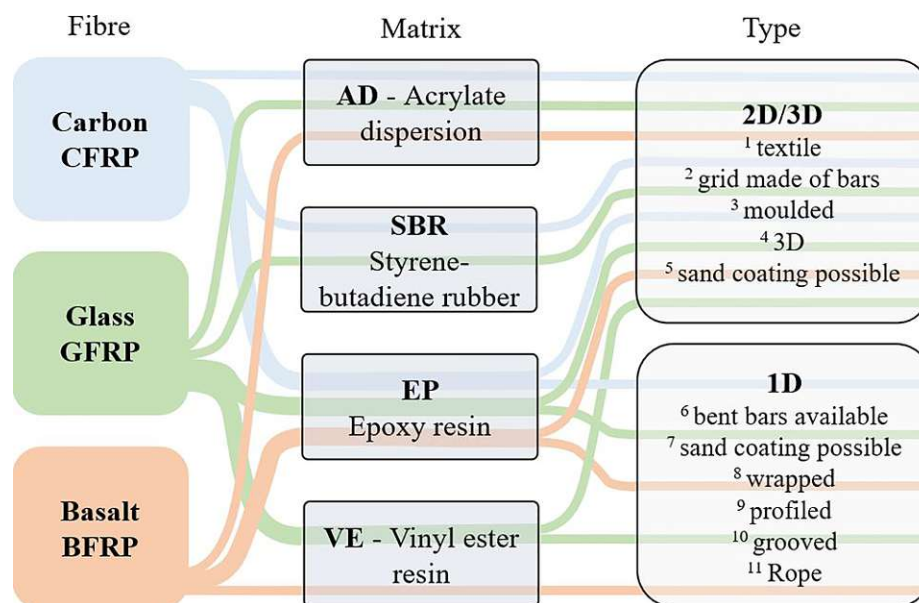


Abb. 2.1: Anzutreffende Kombinationen aus Faser- und Matrixmaterial und deren Produktgruppen von Herstellern in Europa, entnommen aus [4].

2.1.2 Fasermaterial

Das Ausgangsprodukt von nichtmetallischen Bewehrungen sind Fasern. Fasern sind stabförmige Elemente mit einem hohen Länge zu Dicke Verhältnis und weisen meist einen Kreisquerschnitt mit einem Durchmesser von 5-50 μm auf [21]. Um als Bewehrung im Betonbau geeignet zu sein, müssen die Fasern folgende Anforderungen erfüllen [22]:

- Hohe Alkalibeständigkeit
- Hohe Steifigkeit für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
- Hohe Bruchdehnung, um eine Versagensankündigung zu erzielen
- Hohe Ermüdungsfestigkeit
- Ökologische und Ökonomische Wettbewerbsfähigkeit

Besonders geeignet für den Einsatz als Bewehrung im Beton sind Carbon-, Glas-, und Basaltfasern, welche auch in dieser Arbeit genauer untersucht werden. Deren wichtigsten mechanischen Kennwerte sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst. Die einzelnen Fasermaterialien werden in Anlehnung an Kromoser et al. [6] beschrieben.

Tab. 2.1: Mechanische Eigenschaften der für die Herstellung von Bewehrungen hauptsächlich verwendete Fasermaterialien (zusammengefasst von [4, 23])

Fasermaterial	Dichte [g/cm ³]	E-Modul [GPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Bruchdehnung [%]
Carbon	1,73 - 1,96	200 - 500	1750 - 7000	3,5 - 24
AR-Glas	2,7	70 - 76	1800 - 3500	20 - 30
Basalt	2,75	89	2000 - 4840	31,5

Carbon

Die mechanischen Eigenschaften von Kohlenstofffasern können stark variieren, abhängig von den verwendeten Rohstoffen und der Herstellungsart [24]. Es werden hauptsächlich HT-Fasern (High Tensile) eingesetzt, um diesen Anforderungen im Betonbau gerecht zu werden [4]. Diese Fasern sind vergleichsweise günstiger und weisen gleichzeitig eine hohe Bruchdehnung auf [22]. Zudem weisen Kohlenstofffasern eine hohe Dauerhaftigkeit und damit einhergehende Langzeitfestigkeit auf [19]. Im Vergleich zu anderen Fasermaterialien haben Carbonfasern jedoch den größten ökologischen Einfluss [25]. Carbonfasern werden hauptsächlich aus Polyacrylnitril (PAN) hergestellt, einem Erdölprodukt, und ihre Herstellung erfordert einen erheblichen Energieaufwand [26].

Glas

Der Hauptbestandteil von Glasfasern ist Siliziumdioxid SiO_2 . Glasfasern sind in einer alkalischen Umgebung nicht beständig, wodurch die Langzeitfestigkeit wesentlich geringer ist als die Kurzzeitfestigkeit [9]. Die Alkalibeständigkeit kann durch Zugabe von Zirkonium während der Herstellung erhöht werden, wodurch alkaliresistentes (AR)-Glas entsteht [27]. Bewehrungen werden hauptsächlich aus AR-Glas hergestellt, obwohl dieses teurer als konventionelles E-Glas ist. Bei AR-Glas ist, entgegen der Bezeichnung, nicht von einer vollumfänglichen Alkaliresistenz auszugehen, sondern nur von einer Verbesserung der Alkalibeständigkeit.

Basalt

Basalt ist ein vulkanisches Gestein, welches eine sehr hohe Verfügbarkeit aufweist. Etwa 90% aller vulkanischen Gesteine sind Basalt. Die chemische Zusammensetzung ist vom Ausgangsmaterial (Magma) abhängig. Der Hauptbestandteil von Basalt ist, gleich wie bei Glas, Siliziumdioxid SiO_2 . Basalt kann jedoch nur dann für die Faserherstellung verwendet werden, wenn der SiO_2 -Anteil größer oder gleich 46% ist. Basaltfasern zeichnen sich durch eine geringe Dichte, eine hohe Temperaturbeständigkeit, eine geringe Wasseraufnahme und eine sehr gute Wärme- und Schallisolation aus. Zudem weisen Basaltfasern eine hohe Umweltverträglichkeit aufgrund des natürlichen Vorkommens auf, reagiert nicht toxisch mit Luft oder Wasser und ist nicht brennbar [28]. Bei Basalt ist, ebenso wie bei Glas, von einer geringeren Alkalibeständigkeit als bei Carbon auszugehen [29].

2.1.3 Matrix

Die Matrixmaterialien gewährleisten den Verbund zwischen den einzelnen Fasern, was zu einer deutlich höheren Steifigkeit und Festigkeit führt und gleichzeitig den Verbund mit dem umgebenden Beton positiv beeinflusst [30]. Zudem überträgt die Matrix Spannungen zwischen den Fasern und sorgt zugleich für deren Schutz vor chemischen und mechanischen Angriffen [18]. Durch die Matrix wird die erforderliche Alkalibeständigkeit der Glas- und Basaltfasern gewährleistet. Eine weitere Aufgabe der Matrix liegt in der Formstabilität der Bewehrung [20]. Grundsätzlich lassen sich die Matrixmaterialien in Polymerdispersionen (PD; insbesondere Acrylatdispersionen und Styrene Butadien) und Reaktive Harze (RH; insbesondere Epoxidharz und Vinylharz) einteilen.

2.1.4 Bewehrungsarten

Eindimensionale Bewehrung zeichnet sich durch eine eindeutige Belastungsrichtung aus, die mit Bewehrungsstäben aus Stahl vergleichbar ist. Die Eigenschaften der Bewehrung hängen von der verwendeten Faser, der Matrix und dem Faser-Volumen-Verhältnis ab [31]. Die Herstellung von eindimensionaler Bewehrung erfolgt meistens mittels des Pultrusionsverfahrens. Nach dem Pultrusionsverfahren entsteht ein glatter Stab, welcher über keine ausreichende Verbundfestigkeit

im Beton verfügt. Hersteller von FVK-Bewehrungen wenden Oberflächenbehandlungen wie Umwicklung, Profilierung und Sandbeschichtung an, um die Verbundleistung zu erhöhen. Beispiele für eindimensionale Bewehrungen mit unterschiedlichen Oberflächen sind in Abbildung 2.2 dargestellt.



Abb. 2.2: Beispiele von Bewehrungsstäben mit unterschiedlicher Oberflächenbehandlung. (a) CFVK-Stab gerillt, (b) CFVK-Stab mit gedrehtem Carbon-Roving umwickelt, (c) CFVK-Stab mit flachem Carbon-Roving umwickelt, (d) GFVK-Stab mit gedrehtem Basalt-Roving umwickelt, (e) GFVK-Stab besandet, (f) BFVK-Stab besandet, (g) BFVK-Stab mit Faden umwickelt, (h) BFVK-Stab mit Faden umwickelt, entnommen aus [4].

Die Herstellung von **zwei- und dreidimensionaler Bewehrung** erfolgt entweder durch Verbinden von fertigen 1D-Bewehrungsstäben oder direkt mit speziellen Produktionsverfahren, die aus der Textilindustrie bekannt sind [4]. Die Herstellung von textilen Produkten erfolgt mit hochautomatisierten Prozessen, in den Rovinge zu 2D- oder 3D-Strukturen verarbeitet werden. Die Eigenschaften werden wesentlich von der Herstellungsmethode bestimmt. Aufgrund der Vielzahl an Herstellungsvarianten und Kombinationsmöglichkeiten ist eine große Produktpalette verfügbar, von der ein Ausschnitt in Abbildung 2.3 ersichtlich ist.

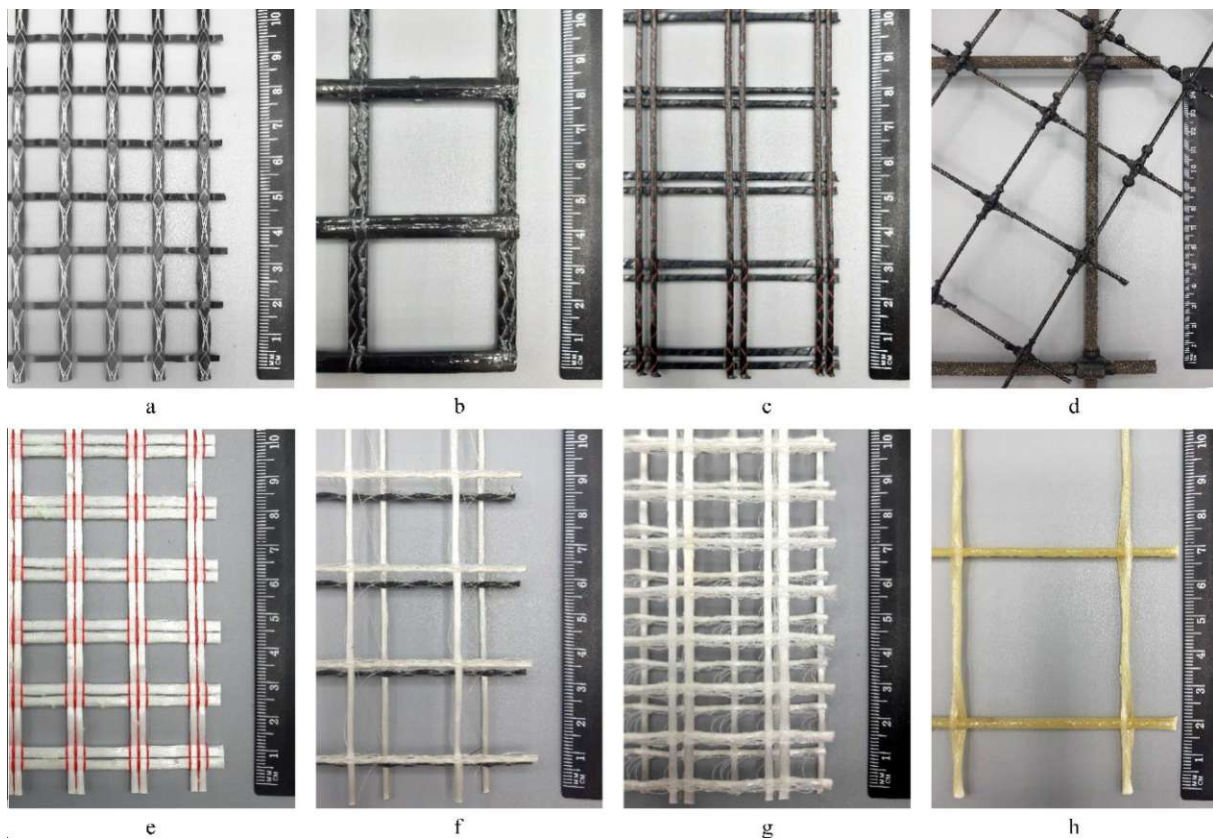


Abb. 2.3: Beispiele von zwei- und dreidimensionalen Bewehrungen - Textilien. (a) 2D-CFVK-Textil gestrickt, (b) 2D-CFVK-Textil gestrickt, (c) 2D-CFVK-Textil gestrickt, (d) zwei verschiedene 2D-Textilien aus BFVK-Stäben zusammengesetzt, (e) 2D-GFVK-Textil gestrickt, (f) 3D-GFVK/CFVK-Textil gestrickt, (g) 3D-GFVK-Textil gestrickt, (h) 2D-GFVK-Textil gewebt, entnommen aus [4].

2.1.5 Anwendungsbeispiele nichtmetallischer Bewehrung im Infrastrukturbau

Grundsätzlich fanden Faserverbundwerkstoffe (FVK) die erste Anwendung am Beginn des 20. Jahrhunderts im Flugzeugbau. Die ersten Ansätze für den Einsatz von Faserverbundwerkstoffen als Bewehrung gab es in den 1950er Jahren. Daraufhin wurden umfangreiche Forschungen in Amerika, Europa und Japan durchgeführt und anschließend Projekte umgesetzt [20]. In den folgenden Abschnitten werden einige realisierte Projekte im Infrastrukturbau mit FVK-Bewehrung erläutert.

Fuß- und Radwegbrücke aus Carbonbeton in Albstadt-Ebingen

In Helbig et al. [32] wird die Fuß- und Radwegbrücke aus Carbonbeton in Albstadt-Ebingen genauer erläutert. Die Fuß- und Radwegbrücke in Albstadt-Ebingen wurde im Oktober 2016 errichtet und verzichtet vollständig auf schlaffe oder vorgespannte Stahlbewehrung. Durch die geringen Betondeckungen von nur 15 mm wurde ein Trogquerschnitt mit Materialstärken von 70 mm (Trogwände) bzw. 90 mm (Gehwegplatte) als monolithisches Fertigteil hergestellt. Das Brückendeck, das keine weiteren Gehwegaufbauten benötigt, wiegt bei einer Breite von 3 m und einer Spannweite von 15 m lediglich 14 t (ungefähr 310 kg/m^2), verglichen mit einem konventionellen Stahlbetonbrückendeck, welches etwa doppelt so viel wiegt. Ein weiterer Vorteil,

neben der Material- und Gewichtsersparnis, ist die überdurchschnittlich lange Lebensdauer bei minimalem Wartungsaufwand, da die häufig auftretende Stahlkorrosion vermieden wird. Da der Einsatz von Textilbeton in Deutschland bauaufsichtlich noch nicht zugelassen ist, musste eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) erwirkt werden. Die CFVK-Bewehrung für die Fußgängerbrücke wurde von der Firma solidian hergestellt. Die Bewehrung kann Zugspannungen von über 3000 N/mm² aufnehmen und ist somit fünf- bis sechs-mal höher als bei konventionellem Betonstahl. In Abbildung 2.4 ist das fertiggestellte Brückenbauwerk dargestellt.



Abb. 2.4: Fuß- und Radwegbrücke aus Carbonbeton in Albstadt-Ebingen, entnommen aus [32].

Fußgängerbrücke in Albstadt-Lautlingen

In Raupach und Cruz [33] wird die Fußgängerbrücke in Albstadt-Lautlingen genauer erläutert. Die Textilbetonbrücke in Albstadt-Lautlingen wurde 2010 errichtet und erstreckt sich über eine Gesamtlänge von 97 Meter, welche in sechs Felder mit einer Spannweite bis zu 17,2 m unterteilt sind. Die Betondeckung ist lediglich 15 mm dick, was zu einem schlanken Überbauelement von 12 cm führt. Zusätzlich war keine Abdichtung und Belag erforderlich. Als Bewehrung wurde AR-Glas verwendet. Das FVK-Gelege (Netz) wurde mit einem maximalen Abstand von 15 mm mit einem warmhärtenden Epoxidharz beschichtet, nämlich einem sogenannten Prepreg-System (vorimprägniert). Aus diesem Grund konnte die volle Zugfestigkeit der GFVK-Bewehrung aktiviert werden und gleichzeitig der Festigkeitsverlust gegenüber nicht imprägnierten AR-Glas deutlich reduziert werden. Als Beton wurde Feinbeton mit einer Festigkeitsklasse C55/65 gewählt, da dieser eine hohe Oberflächenqualität, Frostbeständigkeit und eine sehr gute Verarbeitbarkeit hat. Der maximale Korndurchmesser wurde auf 4 mm festgelegt, um einerseits eine ausreichende Haftung des Feinbetons an der GFVK-Bewehrung zu gewährleisten und andererseits die Kohäsion durch das Netz zu erhöhen. Es ist eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) erforderlich gewesen, welche zu umfangreichen experimentellen Untersuchungen führte. Das geringe Gewicht der Konstruktion führte zu wesentlich geringeren Transportkosten. Das fertiggestellte Brückenbauwerk ist in Abbildung 2.5 ersichtlich.



Abb. 2.5: Fußgängerbrücke in Albstadt-Lautlingen, entnommen aus [33].

Halls River Bridge in Homosassa, Florida

In Cadenazzi et al. [34] wird die Halls River Bridge in Homosassa, Florida genauer erläutert. Die Halls River Bridge in Homosassa, die 2019 errichtet wurde, erstreckt sich als kurz gespannte Fahrzeugbrücke über eine Gesamtlänge von 56,7 m, welche in fünf Felder aufgeteilt ist, und eine Breite von 17,6 m hat. Dieses Projekt wurde mit einer FVK-Variante umgesetzt, da sich die Brücke in einer aggressiven Küstenregion befindet, und dauerhaft Meeressalz ausgesetzt ist. Die Konstruktion im Bestand umfasst 36 vorgespannte CFVK Pfähle, 235 vorgespannte CFVK und nicht vorgespannte GFVK Spundwände, ein 998 m² großes GFVK Brückendeck, 150 m lange GFVK Verkehrsgeländer, zwei 161 m² große GFVK Anfahrtplatten und eine 20 m lange GFVK Schwerkraftmauer. In Cadenazzi et al. [34] wird eine Lebenszykluskostenanalyse verschiedenerer Bauvarianten der Brücke durchgeführt, um das ökonomische Potential von FVK-Bewehrungen aufzuzeigen. Ein Luftbild der Brücke ist in Abbildung 2.12 dargestellt.

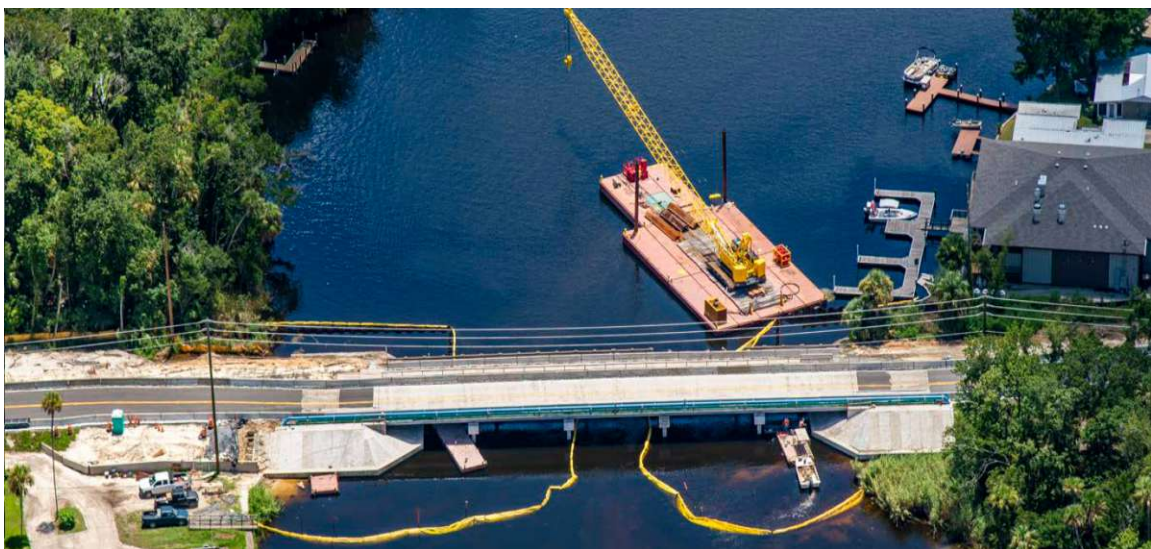


Abb. 2.6: Luftbild der Halls River Bridge, entnommen aus [34].

2.1.6 Mechanische Materialeigenschaften

Die FVK-Bewehrung weist bis zum Versagen auf Zug eine linear elastische Spannungs - Dehnungsbeziehung auf [4]. Diese Eigenschaft unterscheidet sich zu herkömmlichen Betonstahl, den dieser weist ein duktiles Versagen (Fließen) auf [18]. In der folgenden Abbildung 2.7 ist die Spannungs-Dehnungsbeziehung von einzelnen Fasersträngen und unterschiedlicher Textilien zu sehen, welche einaxial bis zum spröden Bruch belastet werden. Falls Textilien bei der Herstellung nicht gestreckt wurden, kann zu Beginn der Belastung ein weniger steifes Verhalten auftreten, was zu einem bilinearen Spannungs-Dehnungsverlauf führt.

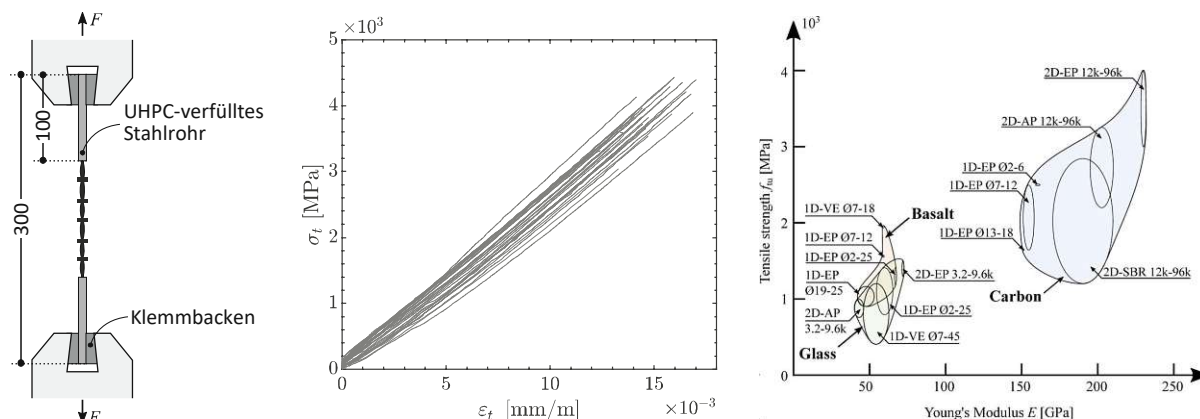


Abb. 2.7: Spannungs-Dehnungsbeziehung von unterschiedlichen Textilien Zugfestigkeit in Relation zum Elastizitätsmodul für verschiedene FVK-Bewehrungen in Abhängigkeit des Faser- und Matrixmaterials, der Herstellmethode und der Querschnittsgröße, entnommen aus [4, 35].

Eine Zusammenstellung aller verfügbaren Produkte zeigt eine große Variation der mechanischen Eigenschaften. Die große Bandbreite der Produkte lässt sich auf unterschiedliche Herstellungsverfahren, Unterschiede im Gewichtsanteil der Fasern (zwischen 65% und 85%) und der verwendeten Matrix zurückzuführen [4]. Nichtmetallische Bewehrungen sind empfindlich gegenüber Querdruck und sind zur Verwendung als Druckbewehrung ungeeignet. Sie können jedoch als Umschnürungsbeehrung in der Druckzone verwendet werden. Am Markt sind eine Vielzahl von unterschiedlichen Produkten von europäischen Herstellern verfügbar, die deutlich unterschiedliches Verbundverhalten aufweisen [4]. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es keine Normung für die geometrischen Eigenschaften der nichtmetallischen Bewehrung gibt.

2.1.7 Dauerhaftigkeit

2.1.7.1 Einflussfaktoren auf die Dauerhaftigkeit

In Kromoser et al. [6] werden die Einflussfaktoren auf die Dauerhaftigkeit erläutert. Daher ist dieser Abschnitt in Anlehnung an die Ausführungen von Kromoser et al. [6] aufgebaut. Die Dauerhaftigkeit von nichtmetallischen Bewehrungen wird von mehreren Faktoren beeinflusst. Einerseits spielen äußere Faktoren, wie die Belastung, die Feuchtigkeit, die Alkalität und die Temperatur [36] eine Rolle, andererseits sind auch die Zusammensetzung und der Aufbau der Bewehrung, sowie der Fasertyp und die Matrixeigenschaften relevant [19]. GFVK- und BFVK-Bewehrungen weisen einen ähnlichen Aufbau auf [37] und haben im Vergleich zu CFVK-Bewehrungen eine geringere Dauerhaftigkeit. Sie sind empfindlicher gegen chemische Aggressionen im alkalischen Beton [38].

Alkalische Umgebung

Carbonfasern weisen eine hohe Dauerhaftigkeit im alkalischen Milieu des Betons auf, da die Fasern beständig gegenüber Säuren und Basen sind. Trotzdem kann die alkalische Umgebung auch bei CFVK-Bewehrungen zur Verminderung der mechanischen Eigenschaften führen, da die Molekülverbindungen des Tränkungsmaterials geschädigt werden [39]. Diese Schädigung führt zu Beeinträchtigung des Verbunds zwischen den Fasern, was zu einer ungleichmäßigen Belastung und einer Reduktion der Festigkeit führt. Glas- und Basaltfasern haben eine hohe Beständigkeit gegenüber vielen Säuren und Basen, weisen jedoch nur eine geringe Beständigkeit gegen wässrige alkalische Lösungen auf. Die Schädigung ist abhängig von der Konzentration und der Dauer des alkalischen Einflusses. Die Zugabe von Zirkonium kann die Korrosionsbeständigkeit der Glasfaser signifikant erhöhen [27]. Diese Faser wird als alkaliresistentes (AR-)Glas bezeichnet und ist mittlerweile Stand der Technik. Trotz der Bezeichnung wird mit AR-Glas keine vollständige Beständigkeit erreicht. Neuere Untersuchungen zeigen, dass Basaltfasern ähnliche Ergebnisse in Bezug auf die Beständigkeit im alkalischen Milieu im Vergleich zu AR-Glas erzielen [40]. Durch den höheren Gehalt an Metalloxiden in Basalt kann eine höhere Korrosionsbeständigkeit erwartet werden. Die bisherigen Untersuchungen zur Festigkeitsminderung infolge alkalischen Angriffs basieren hauptsächlich auf beschleunigten Alterungstests, die nicht zwangsweise die realen Bedingungen im Beton widerspiegeln. Die beschleunigten Laborversuche sind hauptsächlich von dem pH-Wert, der Dauer und der Temperatur abhängig [41]. Weitere Erkenntnisse zeigen, dass Korrosionsprozesse in alkalischer Flüssigkeit und in einer zementären Matrix unterschiedlich ablaufen. Einerseits ist die Korrosion in einer Natriumhydroxid (NaOH-)Lösung ein kontinuierlicher und zyklischer Prozess, der durch die wiederholende Bildung und Abblätterung von schalenförmigen Korrosionspartikeln auf der Faser gekennzeichnet ist und andererseits findet die Korrosion in Zementlösungen über eine Schadensakkumulation statt, die sich durch Bildung, Ausdehnung und das Zusammenwachsen von Lochkorrosionen charakterisiert [40].

Feuchtigkeit

Durch den Kontakt mit Feuchtigkeit können hauptsächlich bei der Imprägnierung Gefügeänderungen auftreten, welche die mechanischen Eigenschaften der nichtmetallischen Bewehrung reversibel beeinflusst [42]. Eine allfällige Wasseraufnahme führt zu einer Volumenänderung, die Mikrorisse in der Imprägnierung verursachen, den Faserverbund schwächt und die Porosität erhöht. Diese Schädigungen führen zu einer Abminderung der Festigkeit und Dauerhaftigkeit.

Erhöhte Temperatur

Die Umgebungstemperatur hat einen maßgebenden Einfluss für die Dauerhaftigkeit der nichtmetallischen Bewehrung. Grundsätzlich führen höhere Temperaturen zu einem größeren Festigkeitsverlust. Erhöhte Temperaturen führen zu einem erhöhten Energieniveau, was zu einem schnelleren Ablauf von chemischen Reaktionen und somit zu einem schnelleren Ablauf der Schädigung von nichtmetallischer Bewehrung in Bauteilen führt [26]. Dieser Effekt eignet sich sehr gut, um beschleunigte Alterungstests durchzuführen, welche die Prüfzeit verkürzen [43]. Das Dauerstandverhalten ist im Wesentlichen von der Kunststoffmatrix abhängig [26]. Im Gegensatz zu den verwendeten Polymermatrizen, weisen Hochleistungsfasern eine gewisse Beständigkeit gegen erhöhte Temperaturen auf. Polymermatrizen haben üblicherweise eine sehr niedrige Glasübergangstemperatur von unter 100°C [44]. Dies führt dazu, dass der innere Verbund zwischen den Filamenten deutlich abnimmt, wobei die Fasern weitestgehend intakt bleiben [45, 46]. Somit kommt es zu einer ungleichmäßigen Faserauslastung sowie einer deutlich verringerten Restfestigkeit von FVK-Proben, wenn die Temperatur die effektive Glasübergangstemperatur erreicht hat [40, 47]. Ab Temperaturen von 500°C verbrennt die Imprägnierung vollständig [48]. Die nichtmetallische Bewehrung kann durch eine Erhöhung der Betondeckung vor höheren Temperaturen geschützt werden [49]. Dies würde jedoch den Bemessungsgrundsätzen einer ressourceneffizienten

Konstruktion von Textilbeton widersprechen. Eine andere Option wäre, die Textilbetonkonstruktion als hybride Stahl-FVK-Konstruktion auszuführen, da Stahl die Tragfähigkeit im Falle einer oberflächennahen FVK Schädigung sicherstellt [50]. Grundsätzlich ist die Anwendung von FVK-Bewehrungen unter Brandbedingungen begrenzt.

Ermüdung

Das Ermüdungsverhalten von nichtmetallischen Bewehrungen wird, ähnlich wie bei metallischen Werkstoffen, durch Einstufungsversuche ermittelt, welche auch als Wöhlerkurve bezeichnet werden. Die zyklische Belastung, die mit einer gewissen Anzahl von Wiederholungen aufgebracht wird, kann zu einem Versagen der nichtmetallischen Bewehrung führen, selbst wenn sie weit unter der statischen Festigkeit des Materials belastet werden [26]. Schäden wie Faserbrüche und Risse in der Matrix hängen nicht nur von der Belastungshöhe, sondern auch von der Belastungsrichtung ab. Durch die hervorgerufenen Mikroschädigungen tritt ein Steifigkeitsverlust auf, was selbst bei sehr geringen Lastwechselzahlen zu Spannungsumlagerungen führt [51].

2.1.7.2 Abnahme der Zugfestigkeit über die Lebensdauer

Die Abnahme der Zugfestigkeit über die Lebensdauer lässt sich durch eine logarithmische Funktion darstellen. Mittels bekannten Punkten wurde eine Funktion für GFVK-, BFVK- und CFVK-Bewehrung berechnet und ein Diagramm über die Lebensdauer von 150 Jahren erstellt, um eine anschauliche Darstellung der Abnahme der Zugfestigkeit zu gewährleisten. Die Hauptgründe für die Abnahme der Zugfestigkeit sind Temperatur, Feuchtigkeit, Belastung und die alkalische Umgebung (siehe Abschnitt 2.1.7.1). Die Betonzusammensetzung und damit die Zusammensetzung der Porenlösung hat einen wesentlichen Einfluss auf den Festigkeitsverlust des Textils [52]. Im Allgemeinen werden beschleunigte Alterungstests mit verschärften Bedingungen für das Material durchgeführt, was erhöhte Temperaturen, erhöhte alkalische Umgebung und eine erhöhte Feuchtigkeit einschließt, um die Testzeit deutlich zu verkürzen [9]. In Abbildung 2.8 bis 2.11 ist die Abnahme der Zugfestigkeit der verschiedenen Bewehrungsvarianten dargestellt.

In Abbildung 2.8 und 2.9 ist erkennbar, dass das CFVK-Gitter eine höhere Zugfestigkeit als der CFVK-Stab aufweist. Beide Bewehrungsarten haben denselben Abminderungbeiwert α_{nmt} von 0,82 (82%) auf einer Lebensdauer von 100 Jahren, da dieser aus Gitterversuchen des solidian grid (Carbon-Bewehrungsgitter) der Firma solidian übernommen wurde.

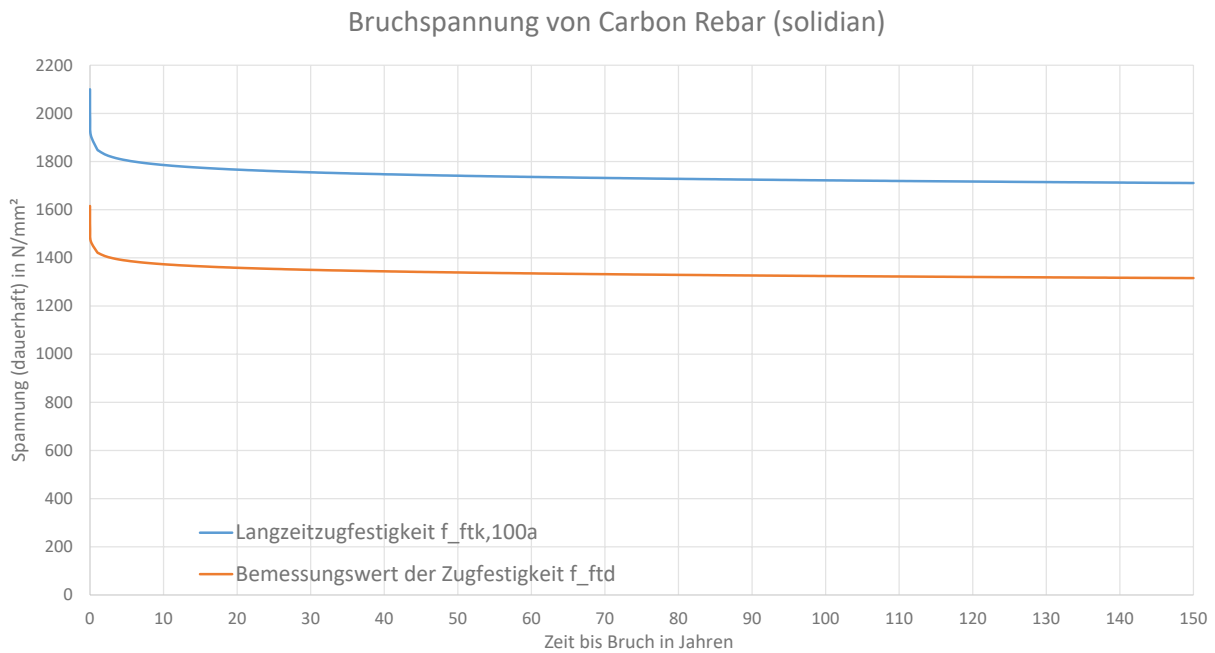


Abb. 2.8: Abnahme der Zugfestigkeit einer CFVK-Bewehrung (Stab) über eine Lebensdauer von 150 Jahren.

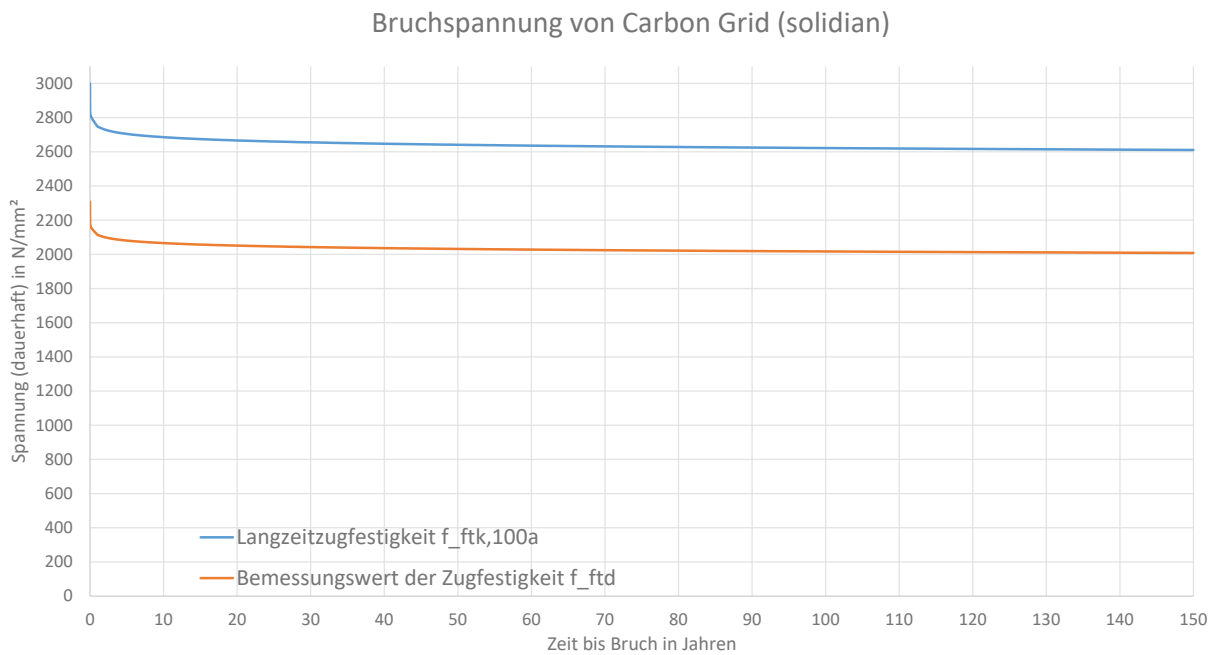


Abb. 2.9: Abnahme der Zugfestigkeit einer CFVK-Bewehrung (Gewebe) über eine Lebensdauer von 150 Jahren.

Da für BFVK noch keine gültigen Zulassungen am Markt vorhanden sind, wird der Abminderungsbeiwert α_{nmt} von 0,53 (53%) von GFVK für BFVK übernommen [53]. Dies basiert auf der Annahme, dass sich BFVK aufgrund der ähnlichen chemischen Zusammensetzung ähnlich wie GFVK verhält.

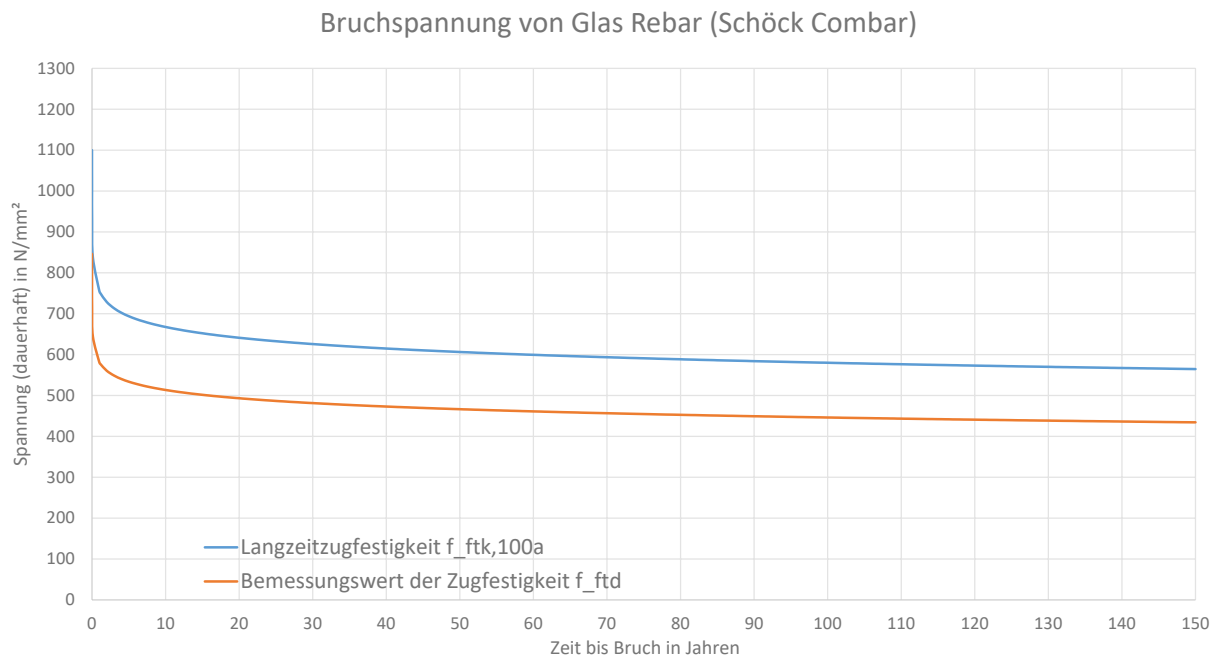


Abb. 2.10: Abnahme der Zugfestigkeit einer GFVK-Bewehrung (Stab) über eine Lebensdauer von 150 Jahren.

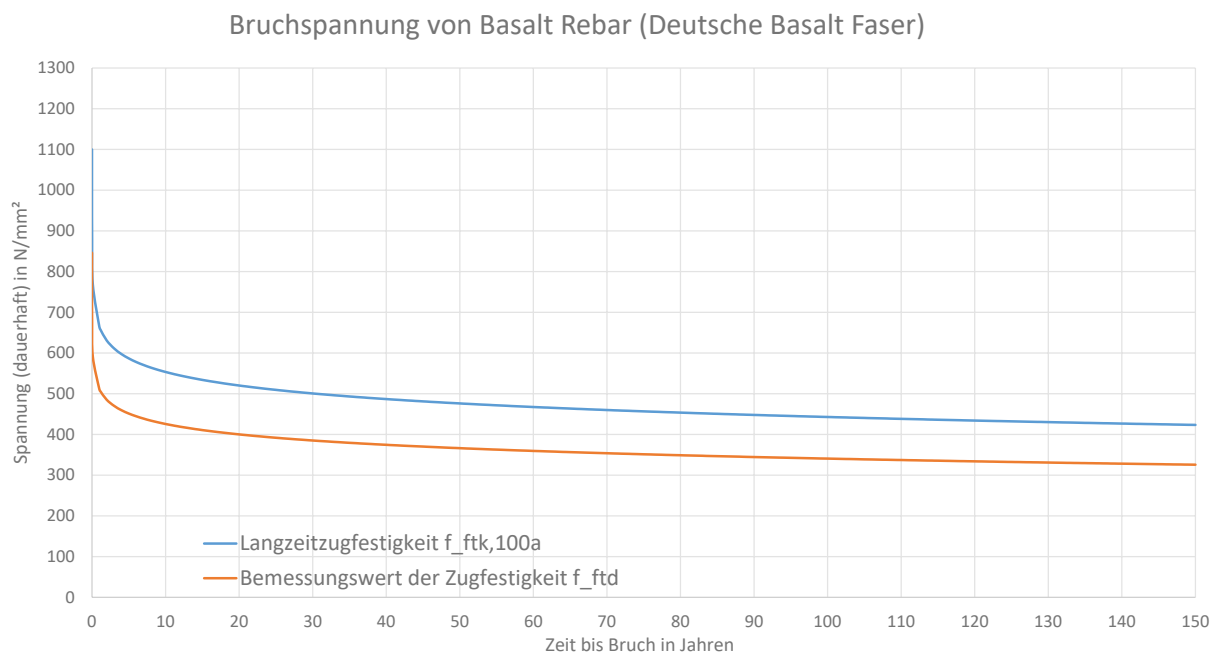


Abb. 2.11: Abnahme der Zugfestigkeit einer BFVK-Bewehrung (Stab) über eine Lebensdauer von 150 Jahren.

Die Lebensdauer sowie ihre zugehörigen Abminderungsbeiwerte sind vom Hersteller auf 100 Jahre begrenzt. Die Gründe dafür sind, dass die Versuche nur auf diese Lebensdauer ausgelegt wurden und andererseits die Lebensdauer hinsichtlich der verwendeten Zeit- und Verschiebungsmodelle aufgrund ihrer Gültigkeit begrenzt ist. Trotzdem kann von einer längeren Lebensdauer und einem gleichbleibenden Alterungsverhalten der FVK-Bewehrung ausgegangen werden.

In Al-Khafaji et al. [9] wurde in den USA bei 15 bis 20 Jahre alten GFVK-Stäben in Brücken eine Bewertung der Dauerhaftigkeit durchgeführt. Es wurden insgesamt 15 Brücken untersucht, wobei nur bei einer die Zugfestigkeit ermittelt werden konnte. Nach 17 Betriebsjahren wurden von der Sierrita de la Cruz Creek Brücke GFVK-Stäbe auf ihre Zugfestigkeit getestet. Die Probestücke liefern eine Festigkeitsreduzierung von 2,5% im Vergleich zur Kurzzeitfestigkeit. Es muss jedoch angemerkt werden, dass ein direkter Vergleich mit Referenzstäben aus dem Jahr 2000 nicht möglich war, wodurch der Referenzstab nicht aus E-Glasfasern, sondern aus ECR-Glasfasern bestand. Bei einer Annahme, dass die Abbaurate der Zugfestigkeit linear mit der Zeit verläuft, würde die Zugfestigkeit über 100 Jahre um ungefähr 15% im Vergleich zur Kurzzeitfestigkeit abnehmen. In Apitz et al. [10] wurde die Dauerhaftigkeit der Shinmiya-Brücke, einer im Jahre 1988 erbauten Carbonspannbetonbrücke an der japanischen Küste, untersucht. Im Zuge des Baus der Shinmiya-Brücke wurden zwei zusätzliche Carbonspannbetonträger hergestellt, welche im Jahr 1994 und 2017 getestet wurden. Bei beiden Trägern trat ein Versagen in der Betondruckzone auf, und ihr Verhalten war fast ident. Der im Jahr 2017 getestete Träger wies einen Festigkeitsverlust von nur 6% auf, der aufgrund der Versagensart eher auf die Verwitterung des Betons oder auf statistische Abweichungen der Carbonlitzten zurückzuführen ist.

2.1.8 Bemessung

2.1.8.1 Richtlinien- und Normenstand

In den letzten Jahrzehnten wurde der Konstruktion, Bemessung und Prüfung von FVK-Strukturen immer mehr Bedeutung beigemessen, die zu Erstellung von Richtlinien, Regelwerken, sowie Bemessungsvorschriften und Empfehlungen geführt haben (z.B. [11, 23, 31, 54–58]). In Empananza et al. [59] findet sich eine umfassende Übersicht zu diesem Thema. Die europäischen Regelungen sind bis auf den Entwurf der DAfStb-Richtlinie [11] bereits veraltet, während die nordamerikanischen Richtlinien regelmäßig bestätigt wurden. In der neuen Generation des Eurocodes 2 [14] ist geplant, einen informativen Anhang einzuführen, der sich mit der Bemessung von FVK-Bewehrung in Betonstrukturen befasst. Die derzeit gültigen Richtlinien und Vorschriften berücksichtigen jedoch nicht die Entwicklungen im Bereich der Textilbewehrung. Trotz Ähnlichkeiten im Tragverhalten, müssen Unterschiede in anderen Eigenschaften, wie zum Beispiel das Verbundverhalten, berücksichtigt werden [6]. Eine deutsche Richtlinie, die DAfStb-Richtlinie [11], die sowohl FVK-Stabbewehrung als auch Textilbewehrung einbezieht, wird derzeit entwickelt. Ein Entwurf der Richtlinie ist bereits erhältlich. Bis diese Richtlinie offiziell in Kraft tritt, ist man bei der Bemessung von textildbewehrtem Beton noch auf Bauproduktzulassungen und Zulassungen im Einzelfall (ZiE) angewiesen [60]. Zurzeit sind noch sehr wenige Produktzulassungen abgeschlossen, was die Verwendung von nichtmetallischen Bewehrungen erschwert. Ein Vorreiter ist die Firma Schöck mit dem Produkt Schöck Combar. Dabei handelt es sich um Stäbe aus glasfaserverstärkten Kunststoff, die als Bewehrung für Betonbauteile und -tragwerke verwendet werden können.

Im Zuge der wissenschaftlichen Arbeit wird nur kurz auf die Schlussfolgerungen der Unterschiede der Regelwerke eingegangen. Die Diplomarbeit von Krug [61] widmet sich ausführlich dem Vergleich verschiedener Regelwerke und erörtert die Unterschiede. Die verschiedenen Regelwerke und ihre zugehörigen Erscheinungsjahre sind in Tabelle 2.2 ersichtlich.

Tab. 2.2: Übersicht der Regelwerke zu Design und Bemessung von FVK-bewehrten Betonbauteilen, in Anlehnung an [61]

Dokumentenname	Land	Erscheinungsjahr (letztgültige Fassung)
JSCE 1997 [57]	Japan	1997
ACI 440.1R-15 [54]	USA	2015
AASHTO 2018 [55]	USA	2018
CSA S806-12 [31]	Kanada	2017
CSA S6:19 [62]	Kanada	2019
CNR 2007 [56]	Italien	2007
DAfStb [11]	Deutschland	2022

Die wesentlichen Schlussfolgerungen aus Krug [61] werden mit der DAfStb-Richtlinie [11] verglichen:

- Die Aktualität der Regelwerke ist sehr unterschiedlich, wie in Tabelle 2.2 ersichtlich. Im Gegensatz zu der japanischen (JSCE 1997 [57]) und italienischen Richtlinie (CNR 2007 [56]) sind die nordamerikanischen Richtlinien aus den USA (ACI 440.1R-15 [54], AASHTO 2018 [55]) und Kanada (CSA S806-12 [31], CSA S6:19 [62]) in den letzten Jahren immer wieder aktualisiert worden. Der Entwurf der DAfStb-Richtlinie [11] ist seit November 2022 erhältlich und somit die aktuellste Richtlinie.
- Die Sicherheitsfaktoren der verschiedenen Regelwerke weisen teilweise wesentliche Unterschiede auf. Die DAfStb-Richtlinie [11] schreibt einen Sicherheitsfaktor von 0,77 vor. Die ACI 440.1R-15 [54] verfolgt einen sehr konservativen Ansatz mit einem Sicherheitsfaktor für FVK-Bewehrung von 0,55, während die JSCE den am wenigsten konservativsten Ansatz mit einem Abminderungsfaktor der GFVK-Bewehrung von 0,77 und der CFVK-Bewehrung von 0,87. Bei der Mindestbewehrung ist die ACI 440.1R-15 [54] mit einem 1,8-fachen Rissmoment ebenfalls konservativer als andere Regelwerke mit einem 1,5-fachem Rissmoment (CSA S806-12, CNR 2007).
- Die Bemessung der Biegemomente ist im Allgemeinen gut vergleichbar. Sie basiert auf dem inneren Kräftegleichgewicht, wobei zwischen einem Versagen der Bewehrung und einem Versagen von Beton unterschieden wird. Die ACI 440.1R-15 [54] gibt in Abhängigkeit des Versagens unterschiedliche Sicherheitsfaktoren für den Momentenwiderstand an. Falls FVK-Versagen auftritt, wird die Druckzonenhöhe zusätzlich durch den Abminderungsfaktor β_1 verkleinert. Wenn das empfohlene Betonversagen eintritt, kann die hohe Zugfestigkeit der Bewehrung nicht ausgenutzt werden.
- Die Bemessung auf Querkrafttragfähigkeit für Bauteile ohne erforderliche Querkraftbewehrung erfolgt in der DAfStb-Richtlinie [11] nach dem gleichen Modell wie im Eurocode 2 [7] mit geringfügigen Anpassungen. In allen Regelwerken werden zwei separate Traganteile berücksichtigt, nämlich der Betontraganteil und Traganteil der Bewehrung. Damit ein sprödes Schubversagen ausgeschlossen werden kann, werden in allen untersuchten Regelwerken die Spannung der Schubbewehrung begrenzt. Zusätzlich zur Spannungsbegrenzung begrenzt die DAfStb-Richtlinie [11] die Dehnung der Schubbewehrung auf 0,007, während die ACI 440.1R-15 [54] und die CSA S6:19 [62] eine Begrenzung von 0,004 vorsehen. Die Variation des Druckstrebenwinkels, wie im Stahlbetonbau üblich, wird nicht in allen Regelwerken für FVK-bewehrte Bauteile zugelassen, da die Plastizitätstheorie in diesem Kontext keine Gültigkeit besitzt. Die DAfStb-Richtlinie [11] erlaubt lediglich einen festen Druckstrebenwinkel.

Hingegen gestatten die CSA S806-12 [31] und die AASHTO 2018 [55] eine Anpassung des Druckstrebenwinkels in Abhängigkeit von der Längsbewehrungsdehnung.

- Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) müssen die Spannungen der FVK-Bewehrung teilweise auf sehr niedrige Werte begrenzt werden, damit ein Kriechbruch ausgeschlossen werden kann. In der DAfStb-Richtlinie [11] wird nicht zwischen verschiedenen Fasermaterialien unterschieden. Der Wert wird auf 0,8 mal den Bemessungswert der Zugfestigkeit unter der charakteristischen Einwirkungskombination begrenzt. Die Größenordnung der spezifischen Begrenzungswerte anderer Richtlinien sind stark vom Fasermaterial abhängig. Die JSCE 1997 [57] ist die einzige Ausnahme, die nicht nach dem verwendeten Material unterscheidet und gleichzeitig am wenigsten konservativ ist, während die Abminderungen nach der ACI 440.1R-15 [54] am größten ausfallen. Im Vergleich zu Betonstahl wird die Spannung auf deutlich niedrigere Werte begrenzt (abgesehen für Carbon in CNR 2007 [56]).
- Die Begrenzung der Rissbreiten kann entweder durch eine direkte Berechnung der Rissbreiten (JSCE 1997 [57], ACI 440.1R-15 [54], CSA S6:19 [62], CNR 2007 [56], DAfStb [11]), ohne direkte Berechnung mittels Grenzdurchmesser (DAfStb [11]) oder durch Einhaltung von maximalen Abständen der Bewehrung (indirekte Methode von ACI 440.1R-15 [54], AASHTO 2018 [55], CSA S806-12 [31]) erfolgen. Da bei FVK-Bewehrung keine Korrosion auftreten kann, erlauben einige Regelwerke größere Rissbreiten im Vergleich zu Stahlbeton. Die DAfStb-Richtlinie [11] erlaubt Rissbreiten von 0,4 mm. In der CNR 2007 [56] und JSCE 1997 [57] sind Rissbreiten von 0,5 mm zulässig, während in den nordamerikanischen Regelwerken unter bestimmten Bedingungen Rissbreiten bis zu 0,7 mm erlaubt sind.
- Die Begrenzung der Verformungen wird in der Regel durch direkte Berechnungen der Durchbiegungen (ACI 440.1R-15 [54], AASHTO 2018 [55], CSA S806-12 [31], CNR 2007 [56], DAfStb [11]) durchgeführt. In der DAfStb-Richtlinie [11] gibt es auch einen Nachweis ohne direkte Berechnung der in Anlehnung an den Eurocode 2 [7] erfolgt. Die ACI 440.1R-15 [54] hat zusätzlich ein vereinfachtes Verfahren über die Begrenzung der Biegeschlankheit, das jedoch sehr konservativ und somit unwirtschaftlich ist.
- Die DAfStb-Richtlinie [11] schreibt vor, dass der Abminderungsfaktor α_{nmt} von Hersteller bekannt gegeben werden muss, wodurch dieser unterschiedlich sein kann. Der Abminderungsbeiwert α_{nmt} beinhaltet alle Umwelteinflüsse und beträgt für GFVK und BFVK ungefähr 0,53 und für CFVK 0,82. Dieser Beiwert muss vom Hersteller angegeben werden. Zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit verwenden ACI 440.1R-15 [54], AASHTO 2018 [55] und CNR 2007 [56] einen Umweltfaktor. Dieser Faktor berücksichtigt die Materialfestigkeitsabnahme aufgrund von Umwelteinflüssen. Die Regelwerke differenzieren jedoch nicht zwischen der Art des Einflusses.
- Grundsätzlich ist wichtig zu beachten, dass das Verhalten der Bauteile weniger duktil ist und ein Versagen der Bewehrung plötzlich eintreten kann. Um diesen Umstand gerecht zu werden, werden höhere Sicherheitsfaktoren als bei Stahl verwendet, die die wirtschaftliche Ausnutzung des Materials jedoch schwierig gestalten. Durch die geringere Steifigkeit des Materials sind anders als bei konventioneller Stahlbewehrung in den meisten Fällen Verformungskriterien für die Bemessung von FVK-Bewehrungen von großer Bedeutung.

Da die wissenschaftliche Arbeit hauptsächlich als Basis für die Entscheidungsfindung bei der Verwendung von nichtmetallischer Bewehrung in Infrastrukturbauwerken in Europa dienen soll,

wurden die verwendeten Vordimensionierungstabellen prinzipiell auf Basis der Bemessungsvorschriften der EN 1992-1-1 [63] entwickelt. Wie bereits eingangs in Abschnitt 2.1.8.1 erwähnt, gibt bereits einen Entwurf des neuen Eurocodes 1992-1-1 [14], in dem ein informativer Anhang der Bemessung von FVK-Bewehrung gewidmet ist. Der Entwurf des informativen Anhangs ist sehr konservativ ausgelegt, wodurch je nach Fasermaterial, bei GFVK und BFVK nur 20% und bei CFVK nur 45% der Kurzzeitfestigkeit als Langzeitfestigkeit anzusetzen sind. Der derzeit gültige Eurocode enthält keine spezifischen Vorschriften für nichtmetallische Bewehrungen, wodurch Adaptionen der Bemessungsvorschriften auf Basis der DAfStb-Richtlinie [11] vorgenommen wurden, wie die Einführung des Abminderungsfaktor α_{nmt} zufolge Umwelteinflüssen, Temperatur und Dauerstand. Die in der Parameterstudie verwendeten Materialkennwerte verschiedener FVK-Bewehrungen sind in Tabelle 3.1 und die Materialkennwerte der Betone in Tabelle 3.2 ersichtlich [64].

Die Langzeitzugfestigkeit ist ein wichtiges Thema beim Einsatz von nichtmetallischen Bewehrungen, da sie einen erheblichen Einfluss auf das ökonomische und ökologische Einsatzpotential der alternativen Bewehrung hat. Je nach Regelwerk oder Norm sind manche Ansätze konservativer als andere. Aus diesem Grund werden angesehene Regelwerke, die DAfStb-Richtlinie [11], die ACI 440.1R-15 [54] und der Eurocode 2 Entwurf [14] miteinander verglichen. In der folgenden Tabelle 2.3 werden die Langzugfestigkeit, sowie der Bemessungswert der verschiedenen Bewehrungsvarianten verglichen.

Tab. 2.3: Vergleich der Langzeitzugfestigkeit und Bemessungswert der Zugfestigkeit

Bewehrung	Eigenschaft	Einheit	DAfStb	ACI	EN 1992-1-1
CFVK	f_{ftk}^1	N/mm ²	2100	2100	2100
	$f_{\text{ftk},100\text{a}}$	N/mm ²	1722,0	1512,0	940,8
	f_{ftd}	N/mm ²	1324,6	1008,0	627,2
	Verhältnis f_{ftk} zu f_{ftd}	%	63,1	48,0	29,9
GFVK	f_{ftk}^2	N/mm ²	1100	1100	1100
	$f_{\text{ftk},100\text{a}}$	N/mm ²	580	616,0	215,6
	f_{ftd}	N/mm ²	446,2	410,7	143,7
	Verhältnis f_{ftk} zu f_{ftd}	%	40,6	37,3	13,1
BFVK	f_{ftk}^3	N/mm ²	1100	1100	1100
	$f_{\text{ftk},100\text{a}}$	N/mm ²	580	616,0	215,6
	f_{ftd}	N/mm ²	446,2	410,7	143,7
	Verhältnis f_{ftk} zu f_{ftd}	%	40,6	37,3	13,1

¹Basierend auf Datenblatt [65]; ²Basierend auf [53]; ³Basierend auf [66];

Wie aus der Tabelle 2.3 ersichtlich ist, weichen die Kurzzeitzugfestigkeit f_{ftk} und der Bemessungswert der Zugfestigkeit f_{ftd} erheblich voneinander ab. Dies liegt einerseits daran, dass die Dauerhaftigkeit von neuen Materialien schwer vorherzusagen ist und andererseits, dass diese nur durch beschleunigte Alterungstests analysiert werden können. Zudem besteht bei neuen Materialien noch eine gewisse Unsicherheit. Der Eurocode 2 Entwurf [14] ist am konservativsten mit einem Bemessungswert der Langzeitfestigkeit von 13,1% (Glas und Basalt) bis 29,9% (Carbon) im Vergleich zu Kurzzeitfestigkeit. Die DAfStb-Richtlinie [11] ist am wenigsten konservativ mit einem Bemessungswert der Langzeitfestigkeit von 40,6% (Glas und Basalt) bis 63,1% (Carbon) bezogen auf die Kurzzeitfestigkeit.

2.1.8.2 Berechnung

Bauwerke und Bauteile aus FVK-bewehrtem Beton müssen nicht nur die Anforderungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT), sondern auch die im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) erfüllen. Eine Ermüdung der Straßenbrücke wird ausgeschlossen. Um die Nachweisführung nachvollziehbar zu gestalten, wird die Berechnung von FVK-bewehrten Bauteilen gemäß der ÖNORM EN 1992-1-1 [7] durchgeführt. Da in der ÖNORM EN 1992-1-1 [7] grundsätzlich keine FVK-Bewehrung berücksichtigt ist, werden auf Basis der in Abschnitt 2.1.8.1 gesammelten Erkenntnisse einige Anpassungen vorgenommen.

Die Parameterstudie in der Arbeit von Preinstorfer et al. [15] wurde mithilfe von Matlab-Codes unter Verwendung der brute-force-Methode durchgeführt. Sie wird bei verschiedenen statischen Systemen als auch bei unterschiedlich hohen Belastung durchgeführt. Im Rahmen dieser Studie wird die statische Nutzhöhe schrittweise erhöht, während die Bewehrungsfläche gleich bleibt (erste Schleife). In jedem Schritt wird der Widerstand R ermittelt. Anschließend wird der minimal erforderliche Widerstand ermittelt, der für die Einwirkung benötigt wird. Dieser Vorgang wird dann für größere Bewehrungsflächen wiederholt (zweite Schleife), um die minimal erforderliche statische Nutzhöhe für die jeweiligen Bewehrungsflächen zu ermitteln. Anschließend werden die Ergebnisse, die berechneten Querschnitte, mit ökologischen und ökonomischen Kennwerten verknüpft, was es ermöglicht, sie zu bewerten und miteinander zu vergleichen [13].

Bei der durchgeführten Parameterstudie sind folgende Abgrenzungen gemäß Barisic [13] zu berücksichtigen:

- nur schlaff bewehrte (einlagige¹) Bewehrung
- nur Rechteckquerschnitte
- kein Querkraftnachweis²
- keine Ermüdungsnachweise
- keine geotechnischen Nachweise (Standicherheit)

Bei der Parameterstudie werden Nachweise für den Biege- und Torsionswiderstand, sowie Begrenzungen der Rissbreiten, Spannungen und Verformungen durchgeführt. Die Diagramme der Parameterstudie bilden mögliche Kombinationen aus Querschnitts- und Bewehrungsflächen ab, welche alle Nachweise erfüllen. Diese sind grau hinterlegt und werden als *feasible area* bezeichnet.

Ökologie

In Barisic [13] ist die Auswertung der ökologischen Auswirkungen genau erläutert. Zusätzlich zu den Nachweisen im GZT und GZG wird der ökologische Einfluss in der Studie der ermittelten optimalen Querschnitte (umhüllender grau hinterlegter Bereich) über das Global Warming Potential (GWP) dargestellt. Dabei werden die Berechnungen direkt mit dem GWP verknüpft, indem die jeweiligen spezifischen Größen der Baustoffe³ mit Faktoren der Baustoffe multipliziert werden, wie in Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2 angegeben. Das Treibhauspotential der gesamten Konstruktion, bestehend aus Bewehrung und Beton, ist in Abbildung 2.12 (links) durch eine grüne Strichlinie mit der Bezeichnung *GWP* angegeben. Das nur durch die Bewehrung erzeugte

¹ Berechnung wird in einer Lage gebündelt angenommen, wobei speziell bei größeren Bewehrungsmengen eine leichte Unterschätzung der Bauteilhöhe resultiert.

² Falls eine Querkraftgefährdung auftritt, können vereinfacht Erfahrungswerte aufgeschlagen werden.

³ Masse für Bewehrung, Volumen für Beton

GWP ist als *GWP Bew.* gekennzeichnet und durch eine grün hinterlegte Fläche hervorgehoben. Das Treibhauspotential steigt mit der Bewehrungsfläche konstant an, variiert der Einfluss der Gesamtkonstruktion durch die in Abhängigkeit der erforderlichen Nachweise. Es ist jedoch zu beachten, dass sich die Werte ausschließlich auf die Herstellung der Baustoffe beziehen, welche jedoch einen wesentlichen Einfluss auf die Gesamtbilanz haben. Es werden keine weiteren Einflüsse, die sich über den Lebenszyklus ergeben, berücksichtigt. In die Berechnung des GWP's wird die Längsbewehrung und das Betonvolumen mit einer Tiefe von 1 m miteinbezogen, während allfällige konstruktive Bewehrung in diesem Diagramm nicht berücksichtigt wird.

Ökonomie

In Barisic [13] ist die Auswertung der ökonomischen Auswirkungen genau erläutert. Der ökonomische Einfluss wird in der Parameterstudie mittels Materialkosten beurteilt. Die Kosten der Gesamtkonstruktion werden als *MK* bezeichnet und in Abbildung 2.12 (rechts) mit einer orangefarbenen Strichlinie dargestellt. Die Materialkosten der Bewehrung werden in ähnlicher Weise wie bei der ökologischen Beurteilung mit *MK Bew.* bezeichnet und mit einer orange hinterlegten Fläche bezeichnet. Gleich wie das GWP, steigen die Materialkosten der Bewehrung kontinuierlich mit der Bewehrungsfläche an, wobei die Gesamtkosten der Konstruktion von den erforderlichen Nachweisen abhängen. Die Berechnung der Materialkosten erfolgt gleich wie die Ermittlung der ökologischen Werte, unter Verwendung der Materialpreise von Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2.

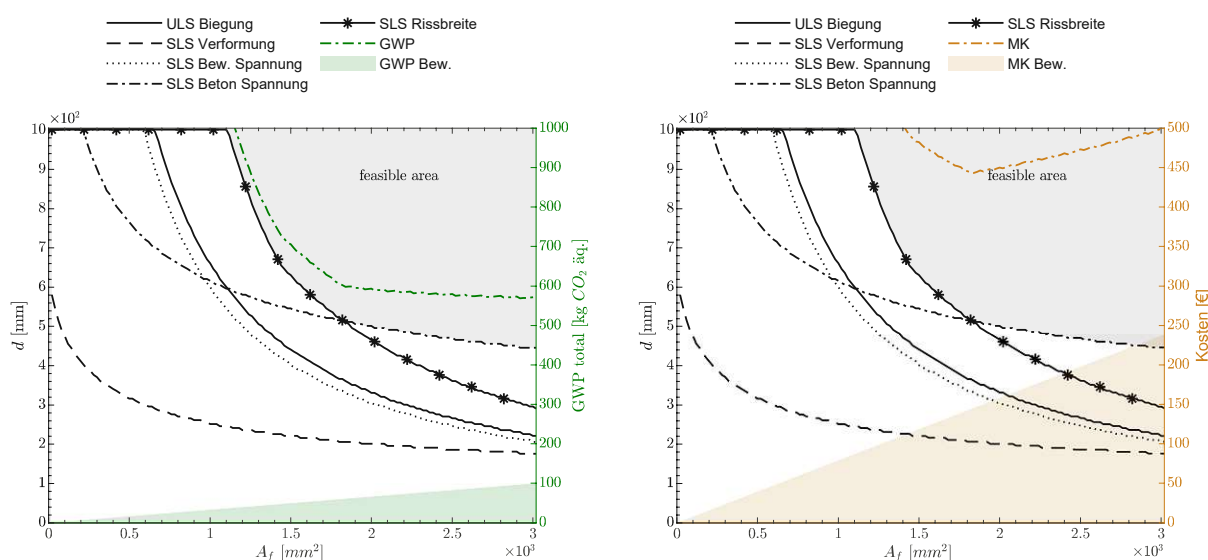


Abb. 2.12: Nachweise einer basaltbewehrten Flügelmauer und Darstellung des damit verknüpften Treibhauspotential (GWP) und den damit verbundenen Kosten (MK), Ökologie (links) und Ökonomie (rechts).

2.1.9 Nachhaltigkeit

Das ökologische Potential von nichtmetallischer Bewehrung als nachhaltige Alternative zur klassischen Stahlbewehrung in Beton hat sich in den letzten Jahren zunehmend gezeigt. Die zur Herstellung von nichtmetallischer Bewehrungen verwendeten Hochleistungsfasern weisen ein sehr geringes Verhältnis von Gewicht zu übertragbarer Zugkraft auf und sind zugleich nahezu korrosionsfrei. Dies ermöglicht gleichzeitig eine Reduzierung der Betondeckung und damit eine Reduzierung von Bauteilabmessungen und -gewichten. Daraus lässt sich in bestimmten Anwendungsfällen ein hohes Einsatzpotential für die Bewehrung von Bauteilen erwarten [25]. Die Bewertung der Umweltauswirkungen über den gesamten Lebenszyklus erfordert zusätzliches Wissen über die Produktion, die Haltbarkeit, sowie die Demontage und Entsorgung oder das Recycling am Ende der Lebensdauer [67].

2.1.9.1 Umweltauswirkungen verschiedener nichtmetallischer Bewehrungen

Die Herstellungsphase eines Bauprodukts, genauer die Module A1 - A3 nach Abbildung 2.14, wird als "von der Wiege bist zum Werkstor"(engl.: cradle-to-gate) bezeichnet [6]. Oft wird die Verwendung von nichtmetallischer Bewehrung durch Umweltvorteile gerechtfertigt. Wenn es jedoch aus objektiver Sicht betrachtet wird, gleichen die geringe Dichte sowie die guten mechanischen Eigenschaften der nichtmetallischen Bewehrung teilweise die deutlich höheren Umweltauswirkungen sowie den beachtlich höheren Energieverbrauch während der Produktion pro Masseneinheit im Vergleich zu Stahl aus. Des Weiteren können die Elastizitätsmodule der nichtmetallischen Bewehrung geringer sein als die von Stahl. Vor allem CFVK-Bewehrungen haben deutlich höhere Umweltauswirkungen, wobei die Herstellung der Kohlefaser den größten Einfluss hat.

In Tabelle 2.4 ist eine der wichtigsten ökologischen Kennzahlen, das Treibhauspotential (engl. Global Warming Potential GWP) der Herstellungsphase (A1-A3), von verschiedenen FVK-Bewehrungsstäben ersichtlich. Die Werte berücksichtigen die Produktionsphase nach ÖNORM EN 15804 [68] (A1-A3).

Tab. 2.4: Ökologische Kennzahlen für den Herstellungsprozess (A1-A3) verschiedener Bewehrungsmaterialien in Stabform pro kg Baustoff

Bezeichnung	CFVK Stäbe	CFVK Textile	GFVK Stäbe	BFVK Stäbe	Stahl Stäbe
GWP ¹ [kg CO ₂ -Äq.]	32,2	30,0	3,4	3,3	2,3

¹gemäß Kromoser [69];

Nichtmetallische Bewehrungen aus CFVK zeichnen sich durch eine höhere Zugfestigkeit und Steifigkeit als GFVK- und BFVK-Bewehrungen aus, wie in Tabelle 2.1 ersichtlich ist. Jedoch weisen die besseren mechanischen Eigenschaften von CFVK einen deutlich höheren ökologischen Fußabdruck auf. In Kromoser et al. [25] wird nicht nur die Umweltauswirkung, sondern auch die Dichte sowie die Zugfestigkeit der Materialien berücksichtigt, um ein klareres Bild bezüglich des Potentials nichtmetallischer Bewehrung zu schaffen. Vergleicht man nun das GWP von GFVK und BFVK mit konventionellem Bewehrungsstahl, so sind die vorliegenden Daten etwa 1,5 - 2,0-mal höher, was ungefähr dem Verhältnis der Zugfestigkeit entspricht. CFVK-Bewehrung hat im Vergleich zu konventionellem Stahl einen deutlich höheren ökologischen Fußabdruck, auch wenn die höhere Zugfestigkeit berücksichtigt wird [25]. Berücksichtigt man nicht nur das

Verhältnis der Zugfestigkeit, sondern auch die Dichte der Materialien, sind klare Vorteile für GFVK und BFVK erkennbar [25].

2.1.9.2 Betriebsphase

Weitere Vorteile von nichtmetallischer Bewehrungen werden in der Betriebsphase ersichtlich, da einerseits die Nutzungsdauer verlängert werden kann und andererseits der Bedarf an Reparaturen und Instandhaltung abnimmt (B1-B3). Dies ist mit der hohen Korrosionsbeständigkeit der FVK-Bewehrung zu begründen. In Schießl-Pecka et al. [3] wird die Häufigkeit von Schadensursachen an Infrastrukturbauwerken aus Stahlbeton, insbesondere Brücken, analysiert. Schäden durch Korrosion sind für etwa 75% der Betoninstandsetzungen verantwortlich. Zusätzlich ist die Schwere der Schäden noch größer, da Betoninstandsetzungen aufgrund anderer Schadensursachen mit weniger Aufwand behoben werden können. Die tatsächliche Auswirkung der Vorteile auf die Nachhaltigkeit ist schwer quantifizierbar, da sie von einer Vielzahl von Faktoren und Wechselwirkungen beeinflusst wird.

2.1.9.3 Recycling von nichtmetallisch bewehrten Bauteilen

In Kromoser et al. [6] wird das Recycling von nichtmetallisch bewehrten Bauteilen genau erläutert, wodurch dieser Abschnitt in Anlehnung an Kromoser et al. [6] aufgebaut ist. Der vermehrte Einsatz von nichtmetallischer Bewehrung erfordert eine Untersuchung des Recyclingprozesses. Der Prozess von Abbruch bis hin zu Recycling von Bauteilen mit nichtmetallischer Bewehrung gliedert sich in vier Schritte: Abbruch, Sortierung, Aufbereitung und Wiederverwertung. Grundsätzlich werden im Recyclingprozess zwei Szenarien unterschieden. In Abbildung 2.13 ist eine schematische Darstellung des Recyclingprozesses, der beiden möglichen Recyclingszenarien und der möglichen Verwertung der aufbereiteten Produkte dargestellt.

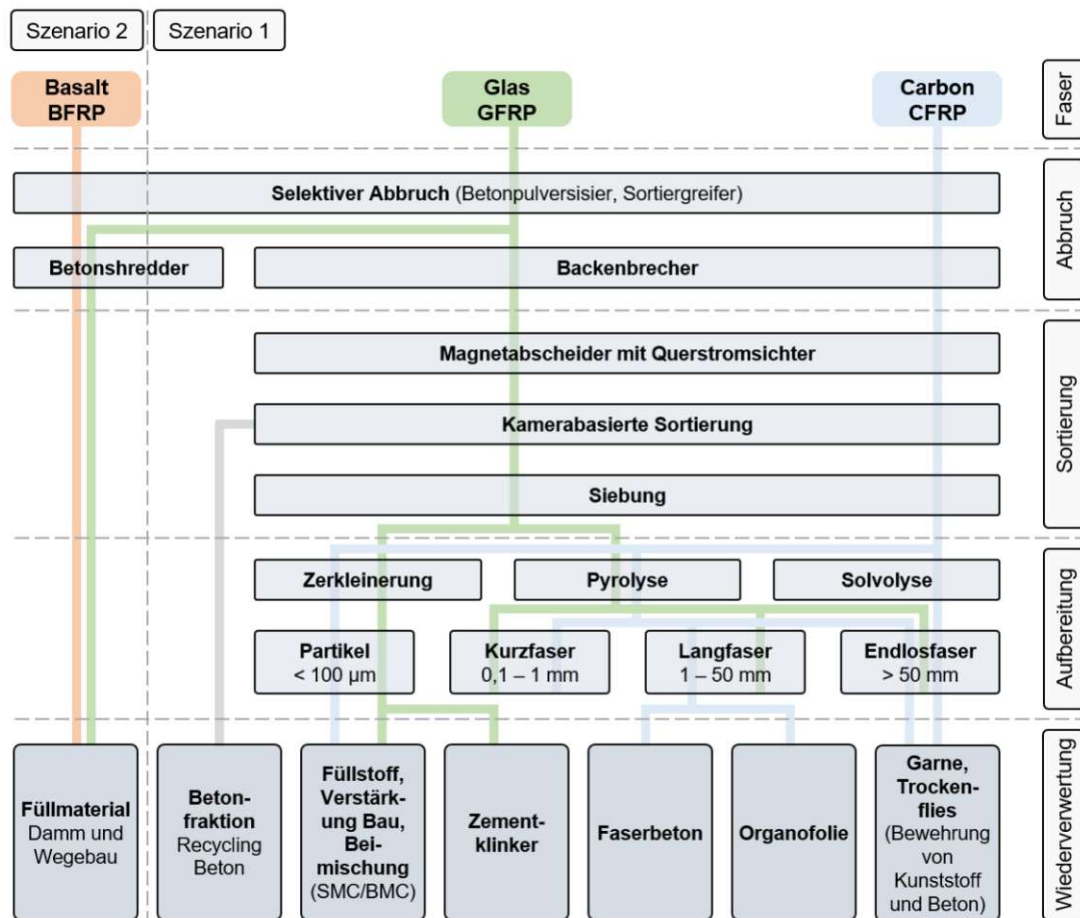


Abb. 2.13: Schematische Darstellung des Recyclingprozesses für BFVK-, GFVK- und CFVK-bewehrte Betonbauteile, Kennzeichnung der zwei Recyclingszenarien wie auch der unterschiedlichen Prozessschritte für das Recycling von Betonbauteilen mit nicht-metallischer Bewehrung und die mögliche Verwertung der aufbereiteten Produkte, entnommen aus [6].

Im Szenario 1 werden alle Schritte vom Abbruch bis zur Wiederverwertung benötigt. Dabei wird das gebrochene Material separiert und aufbereitet, um eine Verwertung zu ermöglichen. Dieses Verfahren wird vor allem für Werkstoffe angewendet, bei denen ein direktes Downcycling des Kompositwerkstoffs aus umweltverträglichen oder gesundheitsgefährdenden Gründen nicht möglich ist, wie zum Beispiel für Betonbauteile mit Carbonbewehrung. Aufgrund der potenziell karzinogenen Wirkung für den Menschen ist ein direktes Downcycling nicht möglich.

Im Szenario 2 kommt es lediglich zu einem Brechen des Materials, ohne dass dies separiert und aufbereitet wird. Dabei wird ein heterogenes, nicht sortenreines Material gewonnen, das beispielsweise im Damm- und Wegebau verwendet werden kann. Dies ist jedoch nur für Kompositwerkstoffe möglich, die umweltverträglich und nicht gesundheitsgefährdend sind.

Rechtliche Regelungen zum Recycling von Betonbauteilen

Der folgende Abschnitt ist in Anlehnung die Arbeit von Goerlitz [70] aufgebaut, welche sich sehr ausführlich mit dem Recycling von Betonbauteilen beschäftigt. Die Richtlinie zur Anpassung der

EU-Abfallrahmenrichtlinie [71] wurde am 04. Juni 2018 wirksam. Die Mitgliedsstaaten müssen diese innerhalb von zwei Jahren in nationales Recht umsetzen. Das Hauptziel dieser Richtlinie besteht darin, das Abfallmanagement zu stärken und den Übergang zu einer nachhaltigen Materialwirtschaft zu fördern. Die Verbesserung der Ressourcennutzung und die Steigerung der Wertschöpfung von Abfällen als wertvolle Ressource ist wesentlicher Bestandteil davon [72].

Die Recycling-Baustoffverordnung ist seit dem 1. Januar 2016 in Kraft [73]. Diese Verordnung hat das Ziel, die Qualität der Abbruchmaterialien so hoch wie möglich zu halten, um hochwertiges Recycling zu ermöglichen. Die Recycling-Baustoffverordnung regelt sämtliche Arten von Abbruchmaterial, zudem die Produktion und die Nutzung von mineralischen Recycling-Baustoffen. Sie beschreibt Regelungen für Abbrucharbeiten und für die Erzeugung und Nutzung von Recycling-Baustoffen für mineralisches Abbruchmaterial [73].

Für die Erzeugung von Recycling-Baustoffen dürfen ausschließlich spezifische Abfallarten wie Betonabbruch oder Bauschutt verwendet werden. Zudem dürfen diese Materialien keine Verunreinigungen durch Schad- oder Störstoffe aufweisen. Der Hersteller hat die Verpflichtung, die Dokumentation des Rückbaus bei Eingang der Abbruchmaterialien einzusehen. Zur Sicherung der Qualität stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Die Standard-Qualitätskontrolle findet während der laufenden Produktion statt. Zusätzlich können Einzelchargen oder das gesammelte Material (Haufwerk) geprüft werden. Die Herstellung von Recycling-Baustoffen erfordert eine Dokumentations- und Kennzeichnungspflicht. Zusätzlich müssen alle Endnutzer über Einsatzbereiche und Verwendungsverbote der Recycling-Baustoffe unterrichtet werden. Durch die Verwertung von Betonabbruchmaterial wird die Herstellung von Recycling-Baustoffe ermöglicht, aber nur falls die Qualitätsklassen der Baustoff-Recyclingverordnung eingehalten werden. Beispiele für als Betonabbruch nutzbare Baustoffe sind Beton- und Stahlbetonabbruch, Betonfertigteile und Betonfundamente [74].

Betonabbruchmaterial, das die Qualitätsklassen der Baustoff-Recyclingverordnung nicht erfüllt, ist nicht verwertbar. Die betrifft zum Beispiel auf mit Schadstoffen verunreinigten Betonabbruch zu, wie Teeranstriche. Die Verwertbarkeit eines solchen Betonabbruchs mit FVK-Bewehrungen wurde nicht behandelt. Aus diesem Grund gibt es immer höhere Anforderungen an Trennverfahren. Verwendungen von innovativen Baustoffen, wie FVK-bewehrte Betonbauteile, erfordern innovative Recyclingstrategien [70]. Der Unternehmer ist bei der Weitergabe des Betonabbruchs dazu verpflichtet, die Abfallart zu deklarieren und einen für diese Abfallart berechtigten Abfallsammler/-behandler zu übergeben [74].

Am 01. April 2021 wurde die Deponierungsnovelle im Bundesgesetzblatt II Ausgabe 144/2021 veröffentlicht [75]. In den Vorschriften des Kreislaufwirtschaftsgesetzes ist vorgesehen, dass sämtliche Baurestmassen, die einer weiteren Verwendung zugeführt werden können, nicht mehr deponiert werden dürfen. Diese Regelung wurde mit 01. Januar 2024 in Kraft gesetzt.

Normen

Gesteinskörnung: Die Verwendung von recycelter Gesteinskörnung für die Herstellung von Beton unterliegt Vorschriften der ÖNORM B 4710-1 [76]. In der ÖNORM EN 12620 [77] sind die Mindestanforderungen an recycelte Gesteinskörnung angeführt. Eine Richtlinie des deutschen Ausschusses für Stahlbeton gibt die zulässigen Anteile für die Verwendung von recycelter Gesteinskörnung in verschiedenen Betonarten vor [78]. Gemäß DIN EN 206-1 [79] und DIN 1045-2 [80] variieren die maximal zulässigen Anteile für herkömmliche Betone zwischen 25 und 45 Volumenprozent.

Bewehrungsstahl: In der Regel werden Betonstähle an zentralen Sammelstellen gesammelt und von Beton getrennt, sowohl auf der Baustelle als auch an den Sammelstellen, sodass sie am Ende sortenrein vorliegen. Dieser Stahl wird dem Recyclingprozess zugeführt [81]. Die ÖNORM B 4707:2017 [82] legt die Anforderungen, die Klassifizierung und die Prüfung des Bewehrungsstahls fest. Eine spezielle Norm für das Recycling von Bewehrungsstahl wurde nicht gefunden.

FVK-Bewehrung: Die ÖNORM EN 15347 behandelt die Charakterisierung von Kunststoffabfällen. Sie legt die Eigenschaften fest, die ein Abfalllieferant dem Käufer zugänglich machen muss, und gibt Prüfverfahren an, um diese Eigenschaften zu identifizieren. Im Speziellen eine Norm für das Recycling von FVK-Bewehrung oder das Recycling von Textilbeton wurde nicht gefunden.

2.2 Lebenszykluskostenanalyse

2.2.1 Allgemeines

In der DIN EN 15804 [83] wird der Lebenszyklus eines Bauwerks in Phasen (Herstellungsphase (A1-A3), Bauphase (A4-A5), Nutzungsphase (B1-B7) und Entsorgungsphase (C1-C4)) unterteilt [83]. Zusätzlich zu den bereits aufgezählten Phasen können Gewinne und Belastungen außerhalb der Systemgrenze (Phase D) berücksichtigt werden. Bereits vorhandene Studien zur Lebenszyklusanalyse (LZA) von FVK-Bewehrungen [25] zeigen beachtliche Unterschiede in der Wahl der Systemgrenze und der funktionalen Einheit, wodurch ein Vergleich der Ergebnisse schwierig ist. Des Weiteren werden in den seltensten Fällen die Lebenszykluskosten analysiert, obwohl diese in Nachhaltigkeitsbetrachtungen ebenso von großer Bedeutung sind [25]. In den Phasen A1 - C4, wie in Abbildung 2.14 ersichtlich, sind Kosten für Sicherungsmaßnahmen bei Notfällen, Umweltschutzmaßnahmen aus Behördenverfahren, Maßnahmen zur Verkehrsaufrechterhaltung während Instandhaltung und Abbruch (z.B. für darunter liegende Verkehrswege), sowie Staukosten nicht berücksichtigt. Bestimmte Studien [84, 85] verdeutlichen, dass die unter dem Begriff „Nutzerkosten“ zusammengefassten Aufwendungen vor allem für Infrastrukturbauwerke von großer Relevanz sein können. Aus diesem Grund werden diese unter Verwendung der RVS 02.01.22 [17] berücksichtigt. In Abbildung 2.14 ist eine erweiterte Darstellung der Lebenszyklusphasen für die Nachhaltigkeitsbewertung von Bauwerken ersichtlich.

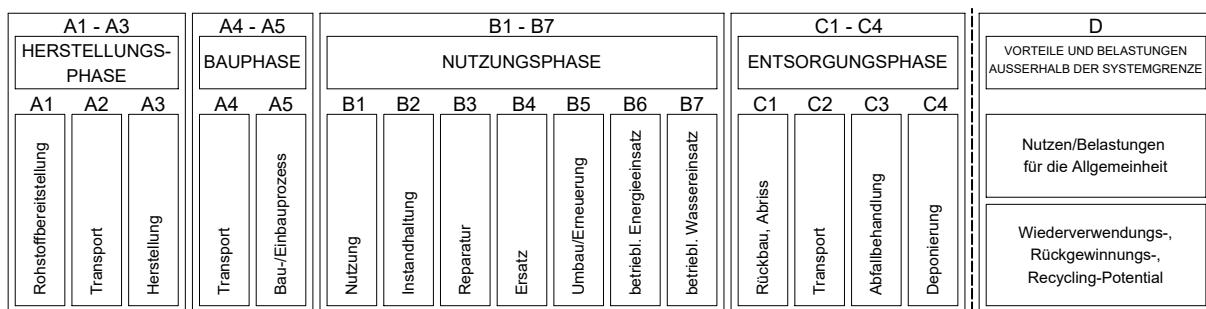


Abb. 2.14: Darstellung von Lebenszyklusphasen für die Nachhaltigkeitsbewertung von Bauwerken, in Anlehnung an [83].

In den Lebenszykluskostenberechnungen in Abschnitt 3 werden die Kosten in den Phasen A1-D sowie zusätzlich die Nutzerkosten über die gesamte Lebensdauer des Bauwerks berücksichtigt. Die Errichtungsphase wird bei den Berechnungen als Ausgangspunkt betrachtet, wodurch die Herstellungs- und Transportkosten (A1-A5) bereits in den gegebenen Benchmarkpreisen (€/m²) implizit enthalten sind. Die Basis für die Berechnungen der Lebenszykluskosten ist die RVS

13.05.11 [86]. In Gleichung 2.1 und Gleichung 2.2 sind die vier wesentlichen Gruppen der Lebenszykluskosten ersichtlich.

$$LZK = \sum_{t=0}^T \frac{LZK_t \cdot \left(1 + \frac{z_v}{100}\right)^t}{\left(1 + \frac{z_d}{100}\right)^t} \approx \sum_{t=0}^T \frac{LZK_t}{\left(1 + \frac{z_d - z_v}{100}\right)^t} \quad (2.1)$$

$$LZK_t = LZK_{A,t} + LZK_{B,t} + LZK_{C+D,t} + LZK_{N,t} \quad (2.2)$$

mit:

LZK	Lebenszykluskosten zum Betrachtungszeitraum T
T	Betrachtungszeitraum
t	Betrachtungsjahr
z_v	Zinssatz zur Berücksichtigung der Valorisierung
z_d	Zinssatz zur Berücksichtigung der Diskontierung
LZK_t	Summe der Kosten zum Zeitpunkt t für verschiedene Phasen
$LZK_{A,t}$	Summe der Kosten zum Zeitpunkt t für Phase A
$LZK_{B,t}$	Summe der Kosten zum Zeitpunkt t für Phase B
$LZK_{C+D,t}$	Summe der Kosten zum Zeitpunkt t für Phase C und D
$LZK_{N,t}$	Summe der Kosten zum Zeitpunkt t der Nutzkosten

Es ist eine jährliche Valorisierung (Preisgleitung) zu berücksichtigen, da die Berechnung der Lebenszykluskosten auf Basis von Realwerten erfolgt. Für die Berechnung ist ein jährlicher konstanter Prozentsatz z_v festzulegen. Durch die Ermittlung von Barwerte werden Lebenszykluskosten auf denselben Bezugspunkt bezogen und dadurch vergleichbar gemacht. Nach Festlegung eines jährlich konstanten Diskontierungszinssatzes z_d sind diese auf Basis der valorisierten Lebenszykluskosten zu berechnen. Grundsätzlich spricht ein niedriger Diskontierungssatz für einen höheren Kapitaleinsatz am Beginn mit geringen Unterhaltungskosten und im Umkehrschluss, ein hoher Diskontierungssatz für eine geringe Investition am Beginn mit höheren Folgekosten in der Zukunft. Die Zinssätze werden gemäß Empfehlung der RVS 13.05.11 [86] und § 1000 ABGB mit 2,5% für die Valorisierung und 4,0% für die Diskontierung angenommen.

2.2.2 Lebenszykluskosten einer Straßenbrücke in Rahmenbauweise nach RVS 13.05.11

Die Lebenszykluskostenermittlung für Brücken basiert auf der Berechnung der Errichtungs-, Betriebs- und Abbruchkosten, wobei den Betriebskosten, Kosten- sowie Alterungsansätze und Instandhaltungszyklen zugrunde liegen. Die Kostenermittlung von Errichtung (E) und Betrieb (B) erfolgt jeweils modular. Um eine möglichst genaue Kostenprognose zu schaffen, werden alle Module einheitlich unterteilt in:

- Unterbau
- Überbau

- Ausrüstung

Die Ermittlung der Lebenszykluskosten erfolgt in Realwerten. Somit werden die Kosten ohne Berücksichtigung von Preisgleitung und Verzinsung berechnet [86].

2.2.2.1 Berechnung des Realwertes - Allgemeines Grundmodell

Der Realwert gibt den tatsächlichen materiellen Wert eines Gutes aus heutiger Sicht wieder, ohne eine Preisgleitung und Verzinsung zu berücksichtigen. Um zu unterschiedlichen Zeiten ermittelte Benchmarks vergleichbar zu machen, müssen Anpassungen berücksichtigt werden.

Die Ermittlung der Lebenszykluskosten (LZK) wird bei Straßenbrücken eine theoretische Nutzungsdauer (ND) von 100 Jahren angesetzt. Es werden 4 bauliche Instandhaltungseingriffe angenommen, die in einem gleichmäßigen Abstand nach 20, 40, 60 und 80 Jahren erfolgen [86].

Errichtungskosten LZK_E

Die Errichtungskosten LZK_E werden mit Gleichung 2.3 berechnet [86].

$$LZG_E = \sum_{i=1}^n E_{1i} \cdot E_{2i} \quad (2.3)$$

mit:

- E_{1i} Masse Bauteil i
- E_{2i} Einheitspreis Bauteil i
- i Laufindex über die vorhandenen Bauteile

Betriebskosten LZK_B

Die Betriebskosten LZK_B werden mit Gleichung 2.4 berechnet [86].

$$LZK_B(t) = \sum_{j=1}^e \sum_{i=1}^n B_{1i} \cdot B_{2i} \cdot B_{3i} + t \cdot B_4 \cdot Fl \quad (2.4)$$

mit:

- B_{1i} Masse Bauteil i
- B_{2i} Einheitspreis Bauteil i
- B_{3i} Umfang der bauteilabhängigen Instandsetzungsmaßnahmen [%]
- B_4 Einheitspreis jährliche, betriebliche Erhaltungs- und Prüfkosten
- Fl Brückenfläche (zugehörige Brückenlänge L sowie Brückenbreite B nach RVS 06.01.42) [m^2]
- i Laufindex über die vorhandenen Bauteile
- j Laufindex über die Anzahl der Instandsetzungseingriffe
- t Dauer der Betrachtung [Jahre]

Abbruchkosten LZK_A

Die Abbruchkosten LZK_A werden mit Gleichung 2.5 berechnet [86].

$$LZK_A = Fl \cdot A_1 \quad (2.5)$$

mit:

Fl Brückenfläche (zugehörige Brückenlänge L sowie Brückenbreite B nach RVS 06.01.42) [m^2]

A_1 Einheitspreis je Brückenfläche [$€/m^2$]

Das Ergebnis entspricht den Errichtungs-, Betriebs- und Abbruchkosten des gewählten Objekts, die während des gesamten Lebenszyklus anfallen. Eine grafische Darstellung des LZK-Grundmodells ist in Abbildung 2.15 ersichtlich.

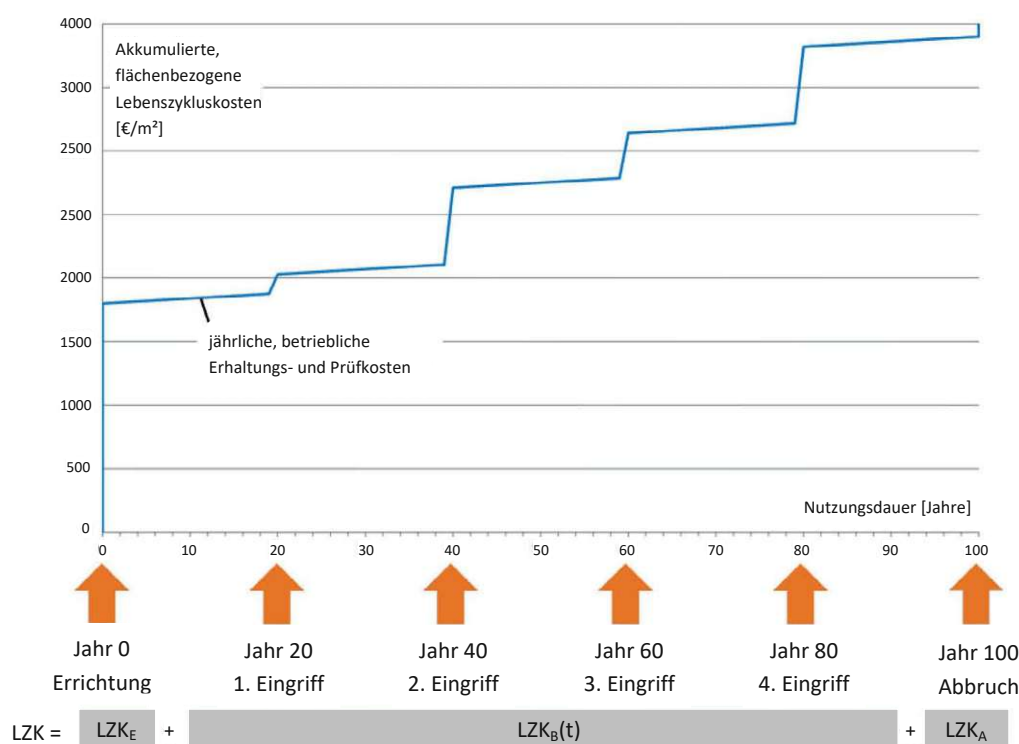


Abb. 2.15: Schema LZK-Grundmodell (theoretische Nutzungsdauer von 100 Jahren, entnommen aus [86]).

2.2.3 Berechnung der Nutzerkosten nach RVS 02.01.22

Die RVS 02.01.22 [17] wird als Basis für Nutzen-Kosten-Untersuchungen im Verkehrswesen herangezogen. Eine Berechnung der Nutzerkosten ist für die Rahmenbrücke relevant. Die Nutzerkosten setzen sich zusammen aus Fahrzeugbetriebskosten, Reise- bzw. Transportzeitkosten, Unfallkosten, Umweltkosten, sowie ein Nutzen des induzierten Verkehrs (Konsumentenrente). Die Umweltkosten umfassen Lärmkosten, Schadstoffkosten und Klimakosten [17].

2.2.3.1 Fahrzeugbetriebskosten

Die Fahrzeugbetriebskosten bestehen aus den Fahrzeugbetriebskostengrundwerten, den Fahrpersonalkosten und den Energiekosten. Die Fahrzeugbetriebskostengrundwerte setzen sich aus Investitionen und Kapitaldienst (Abschreibung und Verzinsung für die Verkehrsmittel), Wartungs- und Reparaturkosten und Fahrzeugabstellkosten zusammen. Sie bestehen aus einem fahrleistungsabhängigen und einem fahrzeitabhängigen Teil, welche beide in der Berechnung zu berücksichtigen sind. Die Fahrpersonalkosten setzen sich aus den Kosten für Betriebspersonal, wie LKW-Lenker und Begleitpersonen, zusammen. Die Berechnung der Energiekosten erfolgt mit den um die Steuern bereinigten Kraftstoffpreise. Die Kraftstoffmengen fallen üblicherweise in den Dimensionen Kilogramm pro Kraftstoff an, und müssen somit noch durch die zugehörige Dichte dividiert werden [17].

Für die Bewertung im Zuge der Baumaßnahme sind vor allem die Personal- und Betriebskosten relevant. Die Änderung der Energiekosten bzw. fahrleistungsabhängigen Kosten können bei gleichen Streckenlängen und geringen Geschwindigkeitsunterschieden vernachlässigt werden. Die Terme sind in Gleichung 2.6 nicht berücksichtigt. Die fahrzeitabhängigen Betriebskosten können gemäß Gleichung 2.6 berechnet werden.

$$NK_{B,fza} = d \cdot \left(\frac{l}{V_B} - \frac{l}{V_A} \right) \cdot JDTV \cdot [(1 - SV) \cdot K_{PKW} + SV \cdot NV \cdot K_{NV} + SV \cdot FV \cdot K_{FV}] \quad (2.6)$$

mit:

d	Dauer der Maßnahme klein / groß [Tage]
l	Länge der Baustelle [km]
V_B	Geschwindigkeit Baustelle [km/h]
V_A	Geschwindigkeit Ausgangszustand [km/h]
$JDTV$	Jährlicher durchschnittlicher täglicher Verkehr [Kfz/d]
SV	Anteil Schwerlastverkehr [%]
NV	Anteil Nahverkehr [%]
FV	Anteil Fernverkehr [%]
K_{PKW}	Kostensatz PKW [EUR/Fz-h und EUR/FZ-km]
K_{NV}	Kostensatz Nahverkehr [EUR/Fz-h und EUR/FZ-km]
K_{FV}	Kostensatz Fernverkehr [EUR/Fz-h und EUR/FZ-km]

2.2.3.2 Reisezeitkosten und Transportkosten

Durch verkehrliche Maßnahmen kommt es zu deutlichen Auswirkungen auf die Geschwindigkeit bzw. die Reisezeit im Personenverkehr und die Transportzeit im Güterverkehr. Anhand des Indikators Zeitkosten erfolgt die Bewertung einer Maßnahme durch einen Vergleich des Planungsnullfalls und des Planungsfalls, sowie eine Bewertung der Differenz [17].

Die Zeitkosten setzen sich aus dem Zeitverlust von Personen in Abhängigkeit des Reisezwecks sowie von beförderten Nutzlasten zusammen. Die Zeitkosten können gemäß Gleichung 2.7 berechnet werden.

$$NK_{\text{Zeit}} = d \cdot \left(\frac{l}{V_B} - \frac{l}{V_A} \right) \cdot \text{JDTV} \cdot [(1 - SV) \cdot \eta \cdot (GV \cdot K_{GV} + PV \cdot K_{PV} + AV \cdot K_{AV}) + SV \cdot K_{SV} (NV \cdot NL_{NV} + FV \cdot NL_{FV})] \quad (2.7)$$

mit:

d	Dauer der Maßnahme klein / groß [Tage]
l	Länge der Baustelle [km]
V_B	Geschwindigkeit Baustelle [km/h]
V_A	Geschwindigkeit Ausgangszustand [km/h]
JDTV	Jährlicher durchschnittlicher täglicher Verkehr [Kfz/d]
SV	Anteil Schwerlastverkehr [%]
η	Besetzungsgrad im PKW [%]
GV	Anteil Geschäftsverkehr [%]
PV	Anteil Pendelverkehr [%]
AV	Anteil anderer Verkehr [%]
K_{GV}	Kostensatz PKW [EUR/Personenstunde]
K_{PV}	Kostensatz Nahverkehr [EUR/Personenstunde]
K_{AV}	Kostensatz Fernverkehr [EUR/Personenstunde]
K_{SV}	Kostensatz Schwerverkehr [EUR/Nutzlasttonnenstunde]
NV	Anteil Nahverkehr [%]
FV	Anteil Fernverkehr [%]
NL_{NV}	Durchschnittliche Nutzlast Nahverkehr [t]
NL_{FV}	Durchschnittliche Nutzlast Fernverkehr [t]

2.2.3.3 Unfallkosten

Durch Verkehrsunfälle entsteht erheblicher Ressourcenverzehr in Form von Sach- und Personenschadenskosten. Personenschadenskosten setzen sich aus Reproduktionskosten, Ressourcenausfallkosten und Kosten des menschlichen Leides zusammen. Die Unfallkosten werden mit der Methode der Unfallkostenraten berücksichtigt. Dabei wird die entsprechende Fahrleistung in Kilometer mit der Unfallkostenrate des Straßentyps multipliziert [17]. Gemäß [87] kommt es in Baustellenbereichen zu einer ähnlichen Unfallrate, als auf der freien Strecke von Autobahnen,

jedoch nimmt die Schwere der Unfälle ab. Es wird gemäß [87] von einer Senkung der Unfallkostenrate auf 68% im Vergleich zur freien Strecke ausgegangen. Die Unfallkosten können im Zuge einer Maßnahme gemäß Gleichung 2.8 in Rechnung gestellt werden.

$$NK_{\text{Unfall}} = d \cdot l \cdot [\text{JDTV} \cdot \Delta\text{UKR}] \quad (2.8)$$

mit:

d	Dauer der Maßnahme klein / groß [Tage]
l	Länge der Baustelle [km]
JDTV	Jährlicher durchschnittlicher täglicher Verkehr [Kfz/d]
ΔUKR	Differenz der Unfallkostenrate [€/Kfz-km]

2.2.3.4 Umweltkosten

Die Umweltkosten treten durch Nebenwirkungen des Verkehrsgeschehens auf. Diese setzen sich aus Lärmkosten, Schadstoffkosten und Klimakosten zusammen [17]. Zusätzliche Lärmkosten und Schadstoffkosten sind nur bei Umleitungen relevant. In Gleichung 2.9 sind dies Terme nicht berücksichtigt. Die monetäre Bewertung der Klimakosten erfolgt über den Satz zum Handel von CO₂-Zertifikaten gemäß [88] unter Berücksichtigung der ermittelten Mengen und den baustoffabhängigen Kennwerten GWP gemäß Gleichung 2.9.

$$NK_{\text{Klima}} = [M_B \cdot \text{GWP}_B + M_{\text{Bew.}} \cdot \text{GWP}_{\text{Bew.}}] \cdot K_{\text{CO}_2} \quad (2.9)$$

mit:

M_B	Menge Beton [m ³]
$M_{\text{Bew.}}$	Menge Stahlbewehrung [t]
GWP_B	Treibhauspotential [kg CO ₂ Äq./m ³]
$\text{GWP}_{\text{Bew.}}$	Treibhauspotential [kg CO ₂ Äq./kg]
K_{CO_2}	Kostenkennwert Energiekosten [€/kg CO ₂ Äq.]

2.2.4 Kostenwerte für den Einsatz nichtmetallischer Bewehrung

2.2.4.1 Preise der nichtmetallischen Bewehrung

Das wesentliche Ziel bei der Betrachtung der Lebenszykluskosten ist, ob die anfänglichen höheren Investitionskosten beim Einsatz von nichtmetallischen Bewehrungen im Laufe des Lebenszyklus kompensiert werden können und somit ein ökonomisches Potential entsteht. Die Preise für nichtmetallische Bewehrungen wurden durch Anfragen bei Herstellern erforscht und durch eine Literaturrecherche erweitert. Die Ergebnisse wurden in Tabelle 2.5 zusammengefasst und werden in der Berechnung der Lebenszykluskosten verwendet. Es ist zu erwähnen, dass die Preise je nach Hersteller und Projektgröße/Absatzmenge variieren. Ein Grund für die vergleichsweise hohen Preise der nichtmetallischen Bewehrung sind die niedrigen Absatzmengen. Es ist anzunehmen, dass die Preise mit steigenden Absatzmengen noch weiter sinken werden [6].

Tab. 2.5: Preistabelle für verschiedene Bewehrungstypen, gemäß Angaben verschiedener Hersteller per E-Mail und Preislisten [6, 89].

Bewehrungsart	Preis für Stäbe [€/kg]	Preis für Gewebe/Matten [€/kg]
CFVK	Ø10: 76,89 Ø12: 72,75 Ø8: 22,25	72,00
GFVK	Ø12: 14,28 Ø25: 13,18 Ø8: 8,00	50,00
BFVK	Ø12: 7,91 Ø24: 8,98	50,00
Stahl	1,20	1,20

2.2.4.2 Einheitskosten für Beton mit nichtmetallischer Bewehrung (Bewehrungsbeton)

In Kostenberechnungen werden meist die Kostenansätze pro Kubikmeter [€/m³] oder pro Quadratmeter Wandfläche [€/m²] Stahlbeton angegeben. In diesen Einheitspreisen sind sowohl Lohn- als auch Materialkosten für Schalung, Bewehrung und Beton, sowie das notwendige Gerät für Transport und Einbau berücksichtigt. Die Kostenanteile können je nach Bauteil variieren, beispielsweise abhängig von der benötigten Menge an Bewehrung und dem Schalungsaufwand je Kubikmeter Beton.

In Otto und Adam [90] wurde eine Analyse zur Wirtschaftlichkeit von Fertigteilen aus Carbonbeton, sowie eine Gegenüberstellung der Kostenunterschiede zu einer Stahlbetonvariante auf Einzelkostenebene (Material, Transport und Einbau) durchgeführt. Die Analyse wurde anhand einer Doppelwand und Doppel-T-Trägern aus Stahl- und Carbonbeton durchgeführt. Es handelt sich bei beiden Fallbeispielen um Fertigteile, bei denen die Ergebnisse auch auf die Ort betonweise übertragen werden können, da die grundsätzlichen Arbeitsschritte, auch wenn technologisch verschieden, vergleichbar sind. Die Herstellungskosten bestehen aus Materialkosten und Lohnkosten. Aufgrund der hochpreisigen Materialkosten von Carbonbewehrung sind die Herstellungskosten um den Faktor 1,5- bis 2,3-mal höher. Die Kosten für die Carbonbewehrung liegen dabei um das 3,8- beziehungsweise 13-fache höher als bei der Stahlbewehrung. Der Einfluss der Lohnkosten auf die Herstellungskosten ist wesentlich geringer als der Einfluss der Materialkosten. Der Faktor zwischen der Carbon- und Stahlbetonvariante liegt bei dem 1,2- bis 1,4-fachen. Die Lohnkosten für das Ein- und Ausschalen, sowie das Nachbehandeln ist nahezu unabhängig von der Verwendung von Stahl- oder Carbonbewehrung. In den vorhandenen Beispielen zeigen nur Bewehren und Betonieren signifikante Unterschiede. Der Faktor für den Vorgang Bewehren liegt 1,5- bis 3,0-fach höher als bei der Stahlbetonvariante. Ein Einsparpotential zeigt sich bei den beiden anderen Kostengruppen. Im Gegensatz zu den Herstellungskosten sind die Transport- und Einbaukosten der Carbonvariante wesentlich geringer als die der konventionellen Stahlbetonvariante. Die Gesamtkosten für den Transport sind bei beiden Fallbeispielen für das Carbonbetonbauteil nur halb so hoch wie für das Stahlbetonbauteil. Der Hauptgrund für die wesentlich geringeren Transportkosten sind das geringe Gewicht des Carbonbetonbauteil, das etwa 50% der Stahlbetonvariante beträgt, und nachrangig auch das geringere Volumen. Diese beiden Gründe führen zu einer doppelt so hohen Auslastung pro LKW, sodass nur die Hälfte der Fahrzeuge für den Transport der Carbonbetonbauteile notwendig ist. Die geringeren Gerätekosten

führen zu geringeren Einbaukosten der Carbonbewehrung. Hierfür sind ebenfalls die Massen der Bauteile der ausschlaggebende Grund. Der deutliche Gewichtsvorteil erlaubt den Einsatz kleiner dimensionierter Kräne, wobei entweder der vorhandene Turmdrehkran verwendet werden kann oder nur ein kleiner dimensionierter Mobilkran benötigt wird. Der Faktor der Einbaukosten zwischen der Carbon- und Stahlbetonvariante liegt zwischen dem 0,8- und 0,9-fachen. Die geringeren Transport- und Einbaukosten summieren sich bei der Carbonvariante auf lediglich 10% der Gesamtkosten. Bei den gewählten Fallbeispielen kommt es zu einem Faktor der Gesamtkosten von 1,3- bis 1,9-fach höheren Kosten für die Carbonbetonbauteile [90].

Nichtmetallische Bewehrungen haben eine viel geringere Dichte als Stahlbewehrung und gleichzeitig eine viel höhere Zugfestigkeit. GFVK-Bewehrung entspricht ungefähr einem Viertel des Gewichts von Stahlbewehrung. Das reduzierte Gewicht kann jedenfalls relevante Auswirkungen auf die Transportkosten haben. Die Verwendung von Gusselementen aus GFVK bewehrtem Beton vor Ort (GFRP-RC cast-in-place elements) kann die Transportkosten für die Bewehrung um den Faktor 0,25 bis 0,50 gegenüber Stahl verringern [34]. Des Weiteren ermöglicht das geringe Gewicht der Bewehrung eine einfachere Handhabung, was die Produktivität steigern und die Anzahl der Arbeitskräfte um etwa 20% reduzieren kann. Unter der Annahme, dass bei Verwendung von GFVK-Bewehrung die Menge um 20 bis 25% mehr beträgt als bei Stahlbewehrung, ergibt sich keine Kosteneinsparungen, sondern Kostenparität bei der Installation [91].

In Brown [92] wurde eine Analyse zur Herstellung von Bewehrungskörben mit GFVK- und konventioneller Stahlbewehrung durchgeführt. Die Herstellung von zwölf GFVK-Bewehrungskörbe mit 48 Längsstäben und 174 Bügeln dauerte acht Stunden. Im Vergleich dazu dauerte die Herstellung der 12 Stahlbewehrungskörbe zehn Stunden bei einer gleichen Anzahl der von Längsstäben, jedoch nur 120 Bügel. Selbst ein Aufschlag von 30% auf die Materialkosten würd bei der Reduzierung der Arbeitszeit und -kosten eine Kostenparität schaffen.

In Berg et al. [5] wurde eine Konstruktions- und Kostenanalyse einer FVK und Stahlbeton Brückenfahrbahn durchgeführt. Die Materialkosten betragen etwa 60% mehr gegenüber der herkömmlichen Stahlbetonvariante. Ein großer Vorteil der GFVK-Variante lag in der eingesparten Arbeitszeit. Das Brückendeck aus Stahlbeton benötigte eine Gesamtzeitdauer für Belag und Einbringen der Bewehrung von 713 Stunden, im Vergleich dazu benötigte das GFVK bewehrte Brückendeck nur 310 Stunden. Dies entspricht einer Einsparung der Arbeitskosten von 57%.

2.2.4.3 Betriebskosten für Beton mit nichtmetallischer Bewehrung (Bewehrungsbeton)

Da nichtmetallische Bewehrungen korrosionsbeständig sind, sind weniger Betoninstandsetzungen als bei konventionellen Stahlbetonbrücken erforderlich. Eine Studie der DAfStb [3] befasst sich mit der Häufigkeit von Schadensursachen an Betonoberflächen im Brückenbau im deutschen Autobahnnetz. Die Schadensursachen an Betonoberflächen sind auf verschiedenste Ursachen zurückzuführen, wie zum Beispiel Konstruktions- und Ausführungsmängel, chloridinduzierte Korrosion und karbonatisierungsinduzierte Korrosion. In der nachfolgenden Abbildung 2.16 sind die Schadensursachen und ihre Häufigkeit dargestellt [3].

Im Vergleich zu anderen Schadensmechanismen sind die Betoninstandsetzungen von Schäden an Brücken und sogar notwendige Abbrüche infolge chloridinduzierter Bewehrungskorrosion am höchsten. Die Häufigkeit der Schadensursachen hängt zusätzlich von verschiedenen Einflussfaktoren wie das Streusalzaufkommen, die Verkehrsintensität, die Entfernung der chloridquelle vom Bauteil und der Ausrichtung des Bauteils ab [3]. In anderen Studien wird ebenfalls aufgrund

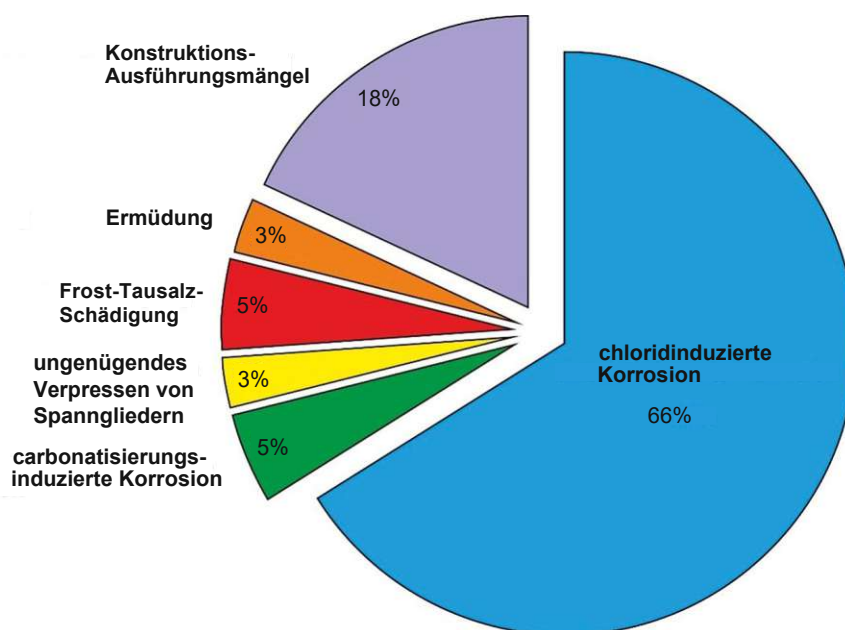


Abb. 2.16: Verteilung der Schadensursachen an Betonoberflächen von Brückenbauwerken im deutschen Autobahnnetz, in Anlehnung an [3].

der Korrosionsbeständigkeit von FVK davon ausgegangen, dass nur geringere Aufwendungen zur Betoninstandsetzung im Vergleich zu konventioneller Stahlbewehrung notwendig sind (gemäß Cadenazzi et al. [34]: 35% in mariner Umgebung). Des Weiteren kann die Intervalldauer der Inspektion erhöht werden, was zu einer Kostenreduktion der jährlichen Kosten führt (gemäß Cadenazzi et al. [84]: Reduktion um 50%).

2.2.4.4 Entsorgungskosten für Beton mit nichtmetallischer Bewehrung (Bewehrungsbeton)

Recycling von nichtmetallischer Bewehrung wird genauer in [6, 25, 26] beschrieben. Der Abbruch von Beton mit nichtmetallischer Bewehrung unterscheidet sich nur wenig vom Abbruch von Beton mit konventioneller Bewehrung [93–95]. Es kann sogar eine Erleichterung bei den nichtmetallischen Varianten festgestellt werden, da sich die Bewehrungselemente selbst einfacher zerkleinern lassen. Unabhängig davon, welche Bewehrung verwendet wird, erfolgt die weitere Aufbereitung im Backen- oder Prallbrecher [94]. Bei konventionellem Stahlbeton werden anschließend Stahl und Beton durch Metallabschneider getrennt. In Österreich werden 79% der Betonabfälle einer Abfallaufbereitung zugeführt [96]. Bei den FVK-Varianten mit Glas- und Basaltbewehrung wird aufgrund der geringen Herstellungskosten zurzeit das Downcycling zum Damm- und Wegebau (ohne Sortierung) am häufigsten angewendet [97, 98]. Die FVK-Variante aus Carbonbewehrung ist ein Downcycling aufgrund der potentiell karzinogenen Wirkung für den Menschen nicht möglich, wodurch nach Lösungen zur Wiederverwertung des energieintensiven Baustoffs gesucht wird. Das Recycling der Carbonfaser erfolgt über eine Trennung der Faser von der Matrix mittels Pyro- oder Solvolyseverfahren. Aufgrund fehlender Stoffströme gestaltet es sich derzeit schwierig, diese Ansätze wirtschaftlich umzusetzen. In der Weiteren Berücksichtigung der Entsorgungskosten für Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung wird vorausgesetzt, dass keine zusätzlichen Kosten aufgrund etwaiger Gefahrenvermeidung bei der Abbruchbehandlung einberechnet werden müssen.

Kapitel 3

Lebenszyklusanalyse

Um das ökonomische Potential von nichtmetallischer Bewehrung festzustellen, werden die Lebenszykluskosten (LZK) einer Straßenbrücke in Rahmenbauweise analysiert. Die Bemessung der Alternativvarianten mit nichtmetallischer Bewehrung, wie in Kapitel 2.1.8 beschrieben, bildet die Grundlage für die Lebenszykluskostenanalyse.

3.1 Beschreibung des Entwurfs

3.1.1 Allgemeine Beschreibung

Als Grundlage für die Bestimmung der Lebenszykluskosten dient die RVS 13.05.11 [86]. Diese enthält Einheitspreise für die Neuerrichtung von Unterbau, Überbau und Ausrüstung sowie Erhaltungszyklen und deren Kosten für die Betriebsphase der einzelnen Bauteile. Zusätzlich werden Kosten für Abbruch und Transport angegeben. Da die Kosten für die Entsorgung (Abfallbehandlung C3 und Deponierung C4) nicht berücksichtigt werden, wurden Kosten auf aktueller Preisbasis recherchiert und angesetzt. All diese Kosten werden mit einem Gemeinkostenzuschlag von 15% und Verwaltungskosten von 10% gemäß [86] erhöht.

Die theoretische Nutzungsdauer wird auf Basis von [86] mit 100 Jahren festgelegt. Während der Betriebsphase werden bauliche Instandhaltungseingriffe vorgesehen, die bei Straßenbrücken aus Stahlbeton alle 20 Jahre, also nach 20, 40, 60 und 80 Jahren erfolgen. Es wird davon ausgegangen, dass am Tragwerk und Unterbau Instandhaltungsmaßnahmen unterschiedlichen Umfangs erforderlich sein werden, während bei der Ausrüstung (z.B. Fahrbahnübergänge, Lager, Randbalken) Instandhaltungs- bzw. Erneuerungsmaßnahmen nach 40 und 80 Jahren vorgesehen sind. Zusätzlich werden in der RVS durchschnittliche jährliche Erhaltungskosten von 2,71 €/m² und Prüfkosten von 2,71 €/m² angesetzt. Die Kosten beinhalten keine Preisanpassung und werden dementsprechend mit dem Baukostenindex für Brückenbau für das entsprechende Jahr angepasst. Eine empfohlene Preisgleitung von 2,5% wird gemäß [86] berücksichtigt. Der Diskontierungssatz von 4,0% wird bei allen Varianten variiert [86].

Der Einsatz von nichtmetallischer Bewehrung wurde unter anderem für Rahmenbrücken, die als Straßenbrücken dienen, untersucht. Das Rahmenbauwerk wird in Anlehnung an die RVS 15.02.31 Rahmenbrückennormale [99] ausgeführt. Die Rahmenbrücke ist mit einem geraden Tragwerk ausgeführt und besteht aus einem 16 m langen Plattentragwerk, welches auf 8 m langen Rahmenstielen aufliegt. Sie weist eine Breite von 12 m auf, wodurch sich eine Brückenfläche gemäß RVS 13.05.11:2017 [86] von $16 \cdot 12 = 192 \text{ m}^2$ ergibt. Es ist jedoch denkbar, dass bei der Verwendung von FVK-Bewehrung eine andere Tragwerksart, wie z.B. ein Plattenbalkentragwerk, vorteilhafter sein könnte. Dennoch wurde diese Tragwerksart gewählt, um einen direkten Vergleich der am häufigsten vorkommenden Tragwerksart [6] im Brückenbau in Österreich zu ermöglichen. Der Querschnitt des Tragwerks besteht aus zwei 3,0 m breiten Fahrspuren, einem Seitenstreifen

von 2,5 m, jeweils einer Restfahrbahnfläche von 0,5 m auf jeder Seite und Randbalken von je 1,25 m Breite. Die Berechnung des Bauwerks erfolgt vereinfacht mit einem Zweigelenrahmen mit starren Rahmenecken. Der Längsschnitt und Querschnitt der Rahmenbrücke sind in Abbildung 3.9 dargestellt.

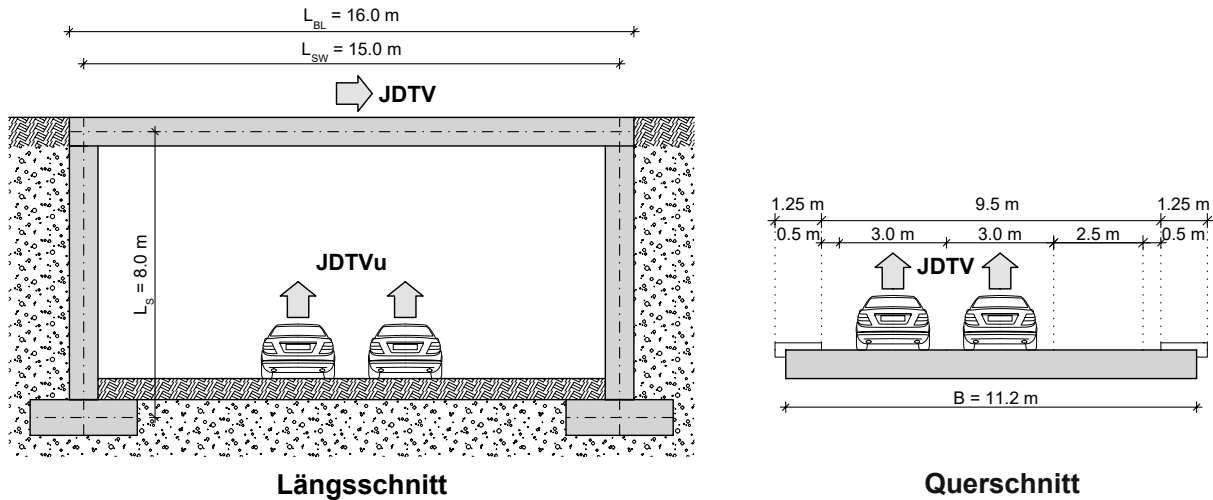


Abb. 3.1: Längsschnitt und Querschnitt der untersuchten Rahmenbrücke, in Anlehnung an [6].

Die Rahmenbrücke wurde mithilfe der Parameterstudie, die in Abschnitt 2.1.8.2 genauer beschrieben ist, bemessen. Die benötigten Bauteilabmessungen und Bewehrungsmengen werden aus der Parameterstudie entnommen. Die Ergebnisse der Bauteilabmessungen sind in Abschnitt 3.1.2 dargestellt. Die Bauteilabmessungen für das Fundament werden aus der RVS 15.02.31 Rahmenbrückennormale [99] entnommen und sind in Abbildung 3.2 dargestellt.

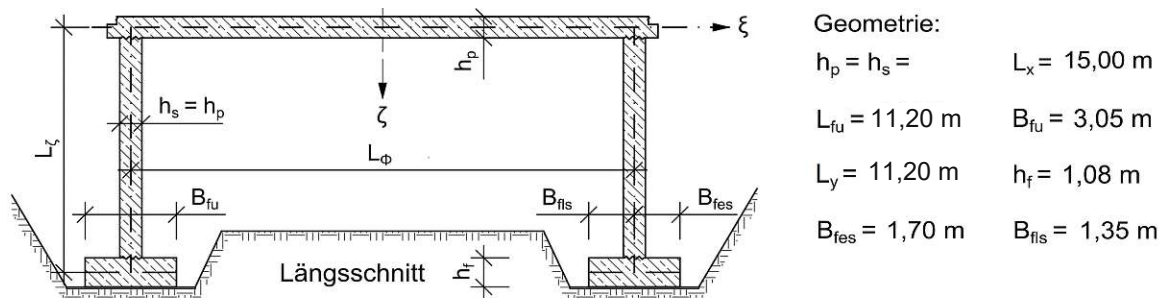


Abb. 3.2: Berechnungsergebnisse der Bauteilabmessungen einer Rahmenbrücke in Stahlbetonbauweise gemäß RVS 15.02.31, in Anlehnung an [99].

Zudem wurden zusätzlich noch Kubaturen für die Flügelmauern ermittelt. Hierbei wurde die Dicke entsprechend der Ergebnisse der Parameterstudie gewählt und eine Böschungsneigung von 2:3 angenommen. Dieser Wert entspricht einem üblichen Bewehrungsgehalt für Rahmenbrücken in dieser Größenordnung.

3.1.2 Beschreibung der Berechnung für materialgerechte Bauteile

3.1.2.1 Berechnungsgrundlagen

Die Basis der Berechnung bildet die Parameterstudie von Preinstorfer et al. [15], die näher in Abschnitt 2.1.8.2 erläutert wird. Es wurden jedoch gewisse Anpassungen vorgenommen, um die Besonderheiten der FVK-Bewehrung angemessen zu berücksichtigen:

- Zugfestigkeiten und E-Moduln aus Tabelle 3.1
- Abminderungsfaktor für Langzeitfestigkeiten zufolge Umwelteinflüssen, Temperatur und Dauerstand α_{nmt} aus Tabelle 3.1
- zulässige Rissbreite ist höher als bei Stahl (0,4 mm bei Außenbauteile)
- Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_M = 1,3$ aus Tabelle 3.1

Die in Tabelle 3.1 angeführten Informationen zu den alternativen Bewehrungsmaterialien wurden den Produktkatalogen (Solidian, Schöck, und der Deutschen Basalt Faser GmbH) entnommen, durch Rückfragen erweitert und einer Literaturrecherche vervollständigt und gemittelt. Die Teilsicherheitsbeiwerte wurden entsprechend der DAfStb-Richtlinie [11] und dem Eurocode 2 [63] gewählt. Die geführten Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise können gemäß Abschnitt 2.1.8.2 entnommen werden.

Tab. 3.1: Materialkennwerte für verschiedene nichtmetallische Bewehrungen und Vergleich zur Stahlbewehrung

Eigenschaft	Einheit	CFVK Stab	CFVK Textil	GFVK Stab	BFVK Stab	Stahl Stab
E_r^1	N/mm ²	162 000	230 000	59 500	59 000	200 000
f_{ftk}^1	N/mm ²	2100	3000	1100	1100	550
α_{nmt}^2	-	0,820	0,820	0,527	0,527	1,00
k_3^3	-	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
γ_M^4	-	1,30	1,30	1,30	1,30	1,15
f_{ftd}	N/mm ²	1324,6	1892,3	446,2	446,2	478,3
ρ^1	kg/m ³	1500	1770	2130	2100	7850
GWP ⁵	kg CO ₂ -Äq./kg	32,2	30,0	3,4	3,3	2,3
MK ⁶	€/kg	86,00	72,00	16,50	8,50	1,20

¹Basierend auf Datenblättern [53, 65, 66, 100]; ²Abminderungsbeiwerte gemäß Angaben von den Herstellern per E-Mail und Datenblättern [53]; ³ entspricht Faktor k3 aus EC-2 7.2(5) um unkontrolliertes Risswachstum zufolge Rissbildung zu vermeiden (k3 wird bei den nichtmetallischen Bewehrungen auf die Bemessungszugfestigkeit der Bewehrung angewendet [11]); ⁴ gemäß EN 1992-1-1 [7] und [11]; ⁵ gemäß Kromoser [69]; ⁶ gemittelter Preis gemäß Angaben verschiedener Hersteller per E-Mail, Preislisten und Berechnung mittels Index [89];

Die Tabelle 3.1 basiert auf der Annahme, dass sich BFVK aufgrund der ähnlichen chemischen Zusammensetzung ähnlich wie GFVK verhält. Daher wurde der Abminderungsbeiwert α_{nmt} für die Produktzulassung des Schöck Combar [53] (GFVK-Bewehrungsstab) für die BFVK-Bewehrung übernommen. Der Abminderungsbeiwert α_{nmt} der CFVK-Bewehrung wurde unter der Annahme, dass sich das Gitter und der Stab in Bezug auf ihre Dauerhaftigkeit gleich verhalten, aus Gitterversuchen des solidian grid (Carbon-Bewehrungsgitter) übernommen. Dieser Abminderungsbeiwert

α_{nmt} könnte theoretisch höher liegen. Er wurde, um der Umstände wissend, auf der sicheren Seite gewählt, um unvorhergesehene Lasten und Zustände, die im Verlauf des Lebenszyklus auftreten können, angemessen zu berücksichtigen.

Zusätzlich werden Daten des verwendeten Betons benötigt. Hier ist vor allem die Druckfestigkeit wichtig, da bestimmte Nachweise davon abhängen. Es werden drei verschiedene Betone angegeben. In Tabelle 3.2 sind die Materialeigenschaften der Betone ersichtlich.

Tab. 3.2: Materialeigenschaften der Betone

Eigenschaft	Einheit	C25/30	C30/37	C40/50
f_{ck}	N/mm ²	25	30	40
GWP ¹	kg CO ₂ -Äq./m ³	198,5	219,0	260,0
MK ²	€/kg	110,00	120,00	135,00

¹Basierend auf Kromoser [69]; ²Institusangaben;

3.1.2.2 Berechnung der Fahrbahnplatte und der Stirnwände

Die Berechnung der Rahmenbrücke erfolgt vereinfacht mittels eines Zweigelenrahmens mit steifen Rahmenecken. Zur Ermittlung der Bewehrungsmenge und der Bauteilabmessungen werden zwei Lastkombinationen (LK) betrachtet. Die LK1 beansprucht die Fahrbahn, neben den ständigen Belastungen, durch die Lastgruppe des Lastmodells 1 (LM1), entsprechend der ÖNORM EN 1991-2 [101]. Bei LK2 wird die Brücke, neben den ständigen Lasten, durch das LM3 (Bemessungsfahrzeug 3000/200) mit einer Geschwindigkeit von 5 km/h auf dem ersten Fahrstreifen und das LM1 unter häufiger Kombination auf den restlichen Fahrstreifen gemäß ÖNORM EN 1991-2 [101] beansprucht. Vereinfachend werden alle Lasten (Achslasten, Linienlasten, verteilte Lasten) aufsummiert und anschließend über die Brückenbreite von 11,2 m verteilt. Eine genaue Beschreibung der Lastfälle sowie ihrer Kombinationsbeiwerte, die aus ÖNORM EN 1990 [102] entnommen wurden, ist in Anhang A zu finden.

Der Rahmenriegel wird mit unterschiedlichen Bewehrungsvarianten, jeweils in Feldmitte, untersucht. Für die Untersuchung werden die maßgebenden Schnittgrößen beider Lastkombinationen ermittelt. Alle Varianten werden mit einer Stabbewehrung ausgeführt. Es wird eine Betonfestigkeitsklasse gemäß RVS [99] von C30/37 gewählt. Die zugrunde gelegten Eigenschaften sind in Tabelle 3.2 ersichtlich. Bei der Bemessung wird kein Ermüdungsnachweis geführt. Je nach Verkehrskategorie [103] sind hier zusätzliche Betrachtungen notwendig [16]. Die Parameterstudie berücksichtigt keine geotechnischen Nachweise, sowie keine Nachweise auf Querkraft. Die Verformungsnachweise werden nicht durchgeführt, da die Verformungen mithilfe einer Überhöhung der Brückenkonstruktion kompensiert werden können. Es ist jedoch in jedem Fall bei FVK-bewehrten Konstruktionen gesondert zu prüfen, ob die erforderliche Überhöhung innerhalb der entsprechenden Grenzwerte liegt. Zur Durchführung der Parameterstudie werden folgende Annahmen gemäß Tabelle 3.5 getroffen. Die Ergebnisse der Parameterstudie sind in Abbildung 3.10 bis Abbildung 3.6 dargestellt.

Tab. 3.3: Festlegungen für die Fahrbahnplatte und die Stirnwände.

Eigenschaft		Einheit	Stahl Stab	CFVK Stab	GFVK Stab	BFVK Stab
Bewehrungsdurchmesser	ϕ_f	mm	20	12	25	24
Betondeckung	c_{nom}	mm	40	30	30	30
Schubbewehrungsdurchmesser	ϕ_w	mm	10	10	10	10
Materialkosten	MK	€/kg	1,20	72,75	13,18	8,98

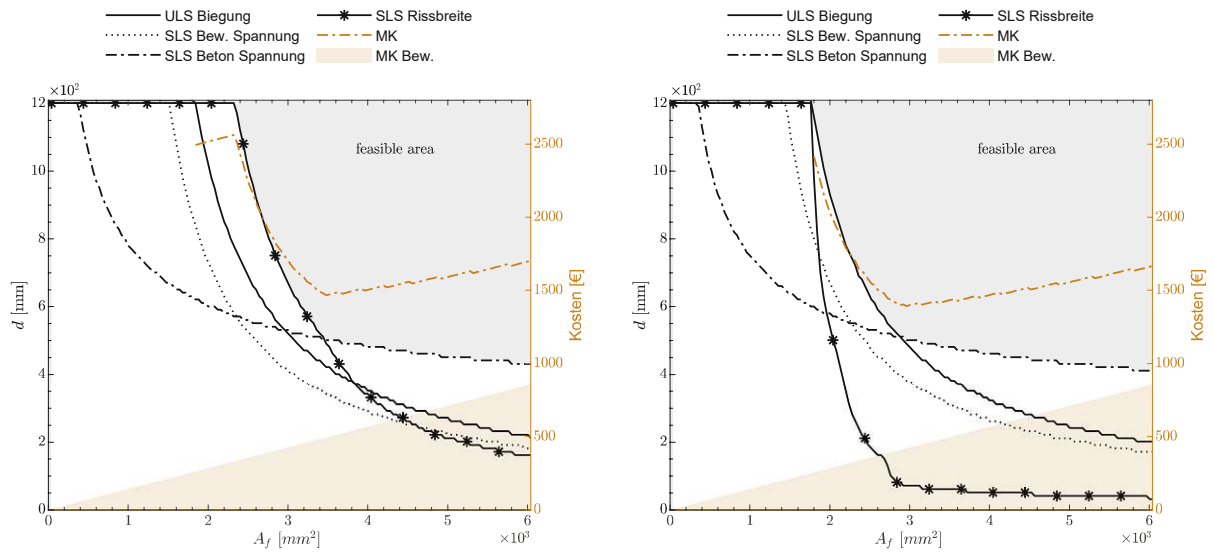


Abb. 3.3: Nachweise der stahlbewehrten Variante der Fahrbahnplatte, sowie die Darstellung der damit verknüpften Kosten, LK1 (links) und LK2 (rechts).

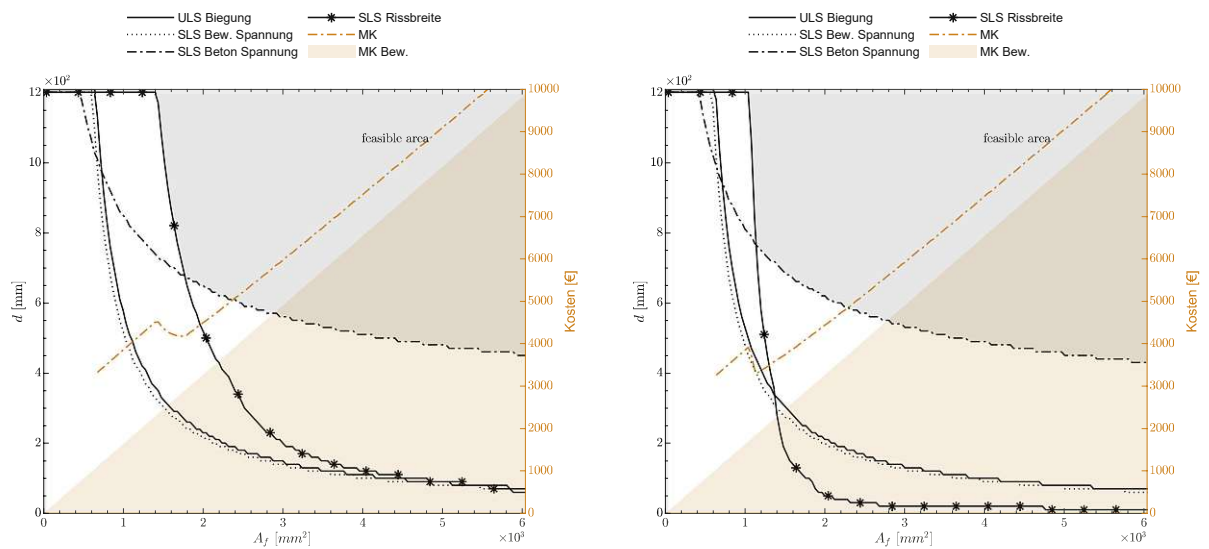


Abb. 3.4: Nachweise der CFVK-bewehrten Variante der Fahrbahnplatte, sowie die Darstellung der damit verknüpften Kosten, LK1 (links) und LK2 (rechts).

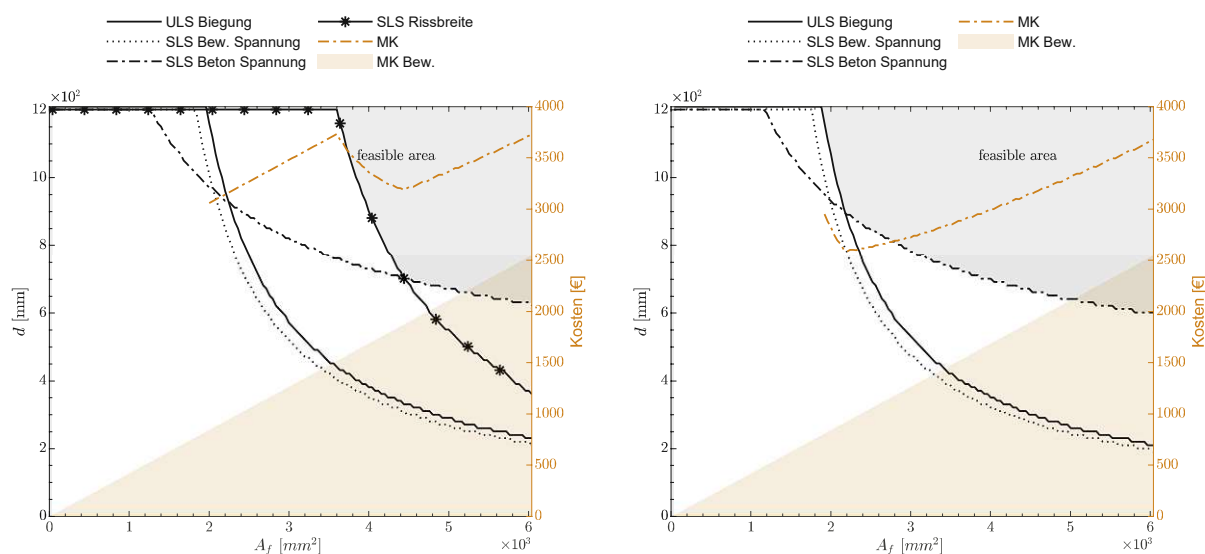


Abb. 3.5: Nachweise der GFVK-bewehrten Variante der Fahrbahnplatte, sowie die Darstellung der damit verknüpften Kosten, LK1 (links) und LK2 (rechts).

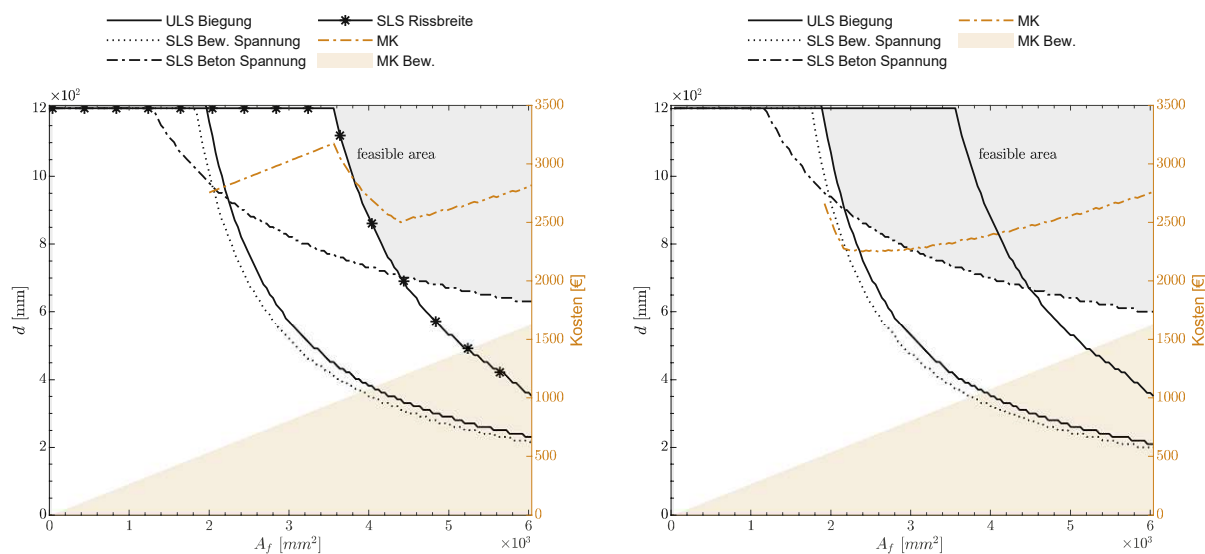


Abb. 3.6: Nachweise der BFVK-bewehrten Variante der Fahrbahnplatte, sowie die Darstellung der damit verknüpften Kosten, LK1 (links) und LK2 (rechts).

Beim Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Varianten fällt auf, dass bei den FVK-bewehrten Bauteilen vorwiegend der Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG), insbesondere der Nachweis der Rissbreiten und der Betonspannungen, maßgebend ist. Bei der Stahlbetonvariante ist der Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) maßgebend. Die Stahlbetonvariante benötigt, dicht gefolgt von der CFVK-Variante, die geringste Nutzhöhe und somit auch Dicke des Bauteils. Die GFVK- und BFVK-Variante verhalten sich nicht nur in Bezug auf die chemische Zusammensetzung, sondern auch hinsichtlich des Tragverhaltens sehr ähnlich. Beide Varianten benötigen eine deutlich höhere Nutzhöhe.

Die Materialkosten ergeben sich aus den Massen bzw. Volumina der Materialien sowie den entsprechenden Kostenwerten, die gemäß Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2 angegeben sind. Die Stahlbetonvariante weist ebenfalls die geringsten Materialkosten auf. Die Materialkosten der CFVK-Variante sind um etwa 432% und der GFVK-Variante um etwa 153% höher im Vergleich zur Stahlbetonvariante. Die BFVK-Variante ist nach der Stahlbetonvariante die günstigste, jedoch ist sie im Vergleich zur Stahlbetonvariante um etwa 91% teurer. Der Vergleich der Ergebnisse spricht in den meisten Faktoren für die Stahlbetonvariante, da dabei geringere Bauteildicken und Materialkosten erzielt werden können, und gleichzeitig das Treibhauspotential (GWP) vergleichsweise niedriger ist. Ein möglicher Vorteil bei Brücken könnte der mögliche wegfallende Straßenbelag und/oder die Abdichtung sein, wodurch Unterhaltungskosten gespart werden können. Ein großes Optimierungspotential besteht außerdem in der Anpassung der Betonfestigkeitsklasse, da, wie eingangs erwähnt, bei allen FVK-Varianten die Betonspannungsbegrenzung maßgebend ist. Erhöhte Betonfestigkeitsklassen führen zu geringeren Bauteildicken, was sich positiv auf die Materialkosten und das Treibhauspotential auswirkt. Durch die verringerte Steifigkeit der Bauteile mit reduzierten Abmessungen muss jedoch eine erhöhte Durchbiegungsgefahr berücksichtigt werden. Allerdings ist zu beachten, dass höhere Betonfestigkeitsklassen auch mit höheren Kosten und Treibhausemissionen verbunden sind. Die Ergebnisse der benötigten statischen Nutzhöhe sowie der Bewehrungsfläche des Rahmenriegels werden für die Stirnwände übernommen. In der nachstehenden Tabelle 3.4 sind die Ergebnisse der Parameterstudie tabellarisch zusammengefasst.

Tab. 3.4: Auswertung Parameterstudie für ein Kostenoptimum - Fahrbahnplatte und die Stirnwände.

Eigenschaft		Einheit	Stahl Stab	CFVK Stab	GFVK Stab	BFVK Stab
Bewehrungsfläche	A_f	cm ²	28,8	23,6	44,4	44,4
statische Nutzhöhe	d	cm	51,1	60,2	70,1	70,1
Querschnittshöhe	h	cm	57,0	64,0	75,0	75,0
Materialkosten ¹	MK	€	2798	10034	6410	5002
Treibhauspotential ¹	GWP	kg CO ₂ äq.	4932	7340	5436	5342
inkl. konstruktive Durchbildung						
Bewehrungsfläche	$A_{f,min}$	cm ²	7,01	7,83	9,11	9,11
Bewehrungsfläche	$A_{f,max}$	cm ²	228	256	300	300
gew. Biegebewehrungsfläche	$A_{f,gew}$	cm ²	31,42	24,88	44,66	44,79
Materialkosten ¹	MK	€	3510	18679	8889	6699
Treibhauspotential ¹	GWP	kg CO ₂ äq.	6298	11167	5982	5966
Bewehrung ¹	M	kg	13936	2456	5192	5201
Beton ¹	V	m ³	167,8	188,4	220,8	220,8
Bewehrungsgrad	ρ	kg/m ³	83,05	13,03	23,52	23,56

¹bezogen auf Fahrbahnplatte und Stirnwände;

3.1.2.3 Berechnung der Flügelmauern

Die Berechnung der Flügelmauer erfolgt vereinfacht durch die Betrachtung eines freistehenden Kragarms. Zur Ermittlung der Bewehrungsmenge und der Bauteilabmessungen wird lediglich eine Lastkombination (LK) betrachtet. Die Flügelmauer wird mit einer mittleren Höhe von 5 m berechnet. Die hauptsächliche Belastung erfährt das Bauteil durch den horizontalen Erddruck

auf der vertikalen Angriffsfläche. Als Verkehrslast wird gemäß ÖNORM B 1991-1-1 [104] eine Nutzlast der Kategorie G berücksichtigt. Eine genaue Beschreibung der Lastfälle sowie ihrer Kombinationsbeiwerte, die aus ÖNORM EN 1990 [102] entnommen wurden, ist in Barisic [13] zu finden.

Das Bauteil wird mit unterschiedlichen Bewehrungsvarianten, jeweils an der Einspannstelle, untersucht. Für die Untersuchung werden die maßgebenden Schnittgrößen ermittelt. Alle Varianten werden mittels Stabbewehrung ausgeführt. Es wird eine Betonfestigkeitsklasse gemäß RVS [99] von C30/37 gewählt. Die Eigenschaften sind in Tabelle 3.2 ersichtlich. Die Parameterstudie berücksichtigt keine geotechnischen Nachweise, sowie keine Nachweise auf Querkraft. Die Ergebnisse der Parameterstudie sind in Abbildung 3.7 und Abbildung 3.8 dargestellt.

Tab. 3.5: Festlegungen für die Flügelmauern.

Eigenschaft		Einheit	Stahl Stab	CFVK Stab	GFVK Stab	BFVK Stab
Bewehrungsdurchmesser	ϕ_f	mm	16	10	16	16
Betondeckung	c_{nom}	mm	40	20	30	30
Materialkosten	MK	€/kg	1,20	76,89	14,28	7,91

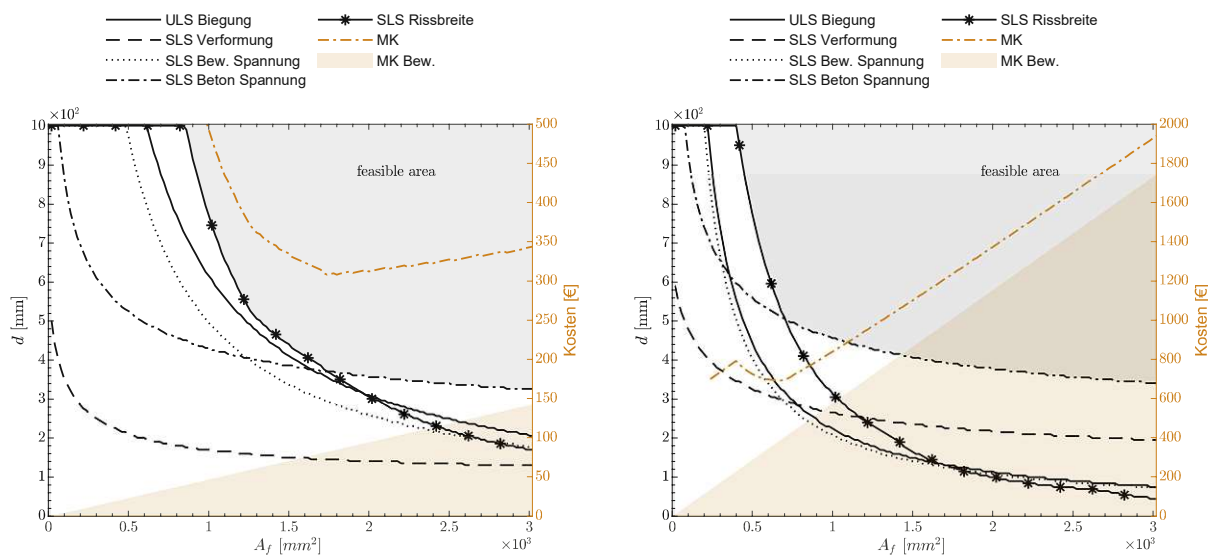


Abb. 3.7: Nachweise der stahl- und carbonbewehrten Variante der Flügelmauern und Darstellung der damit verknüpften Kosten, Stahl (links) und Carbon (rechts).

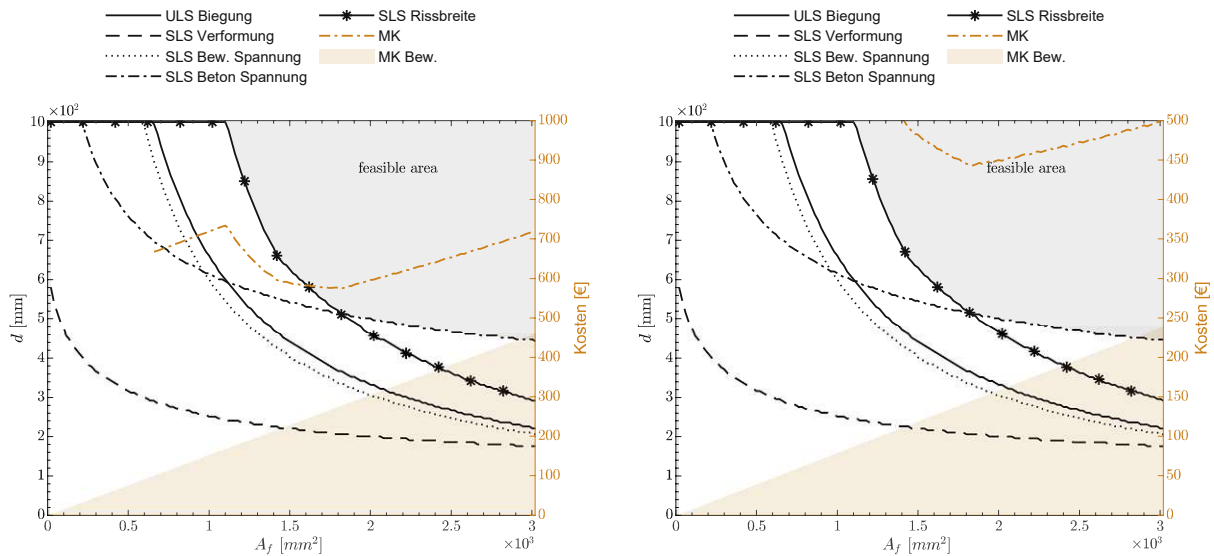


Abb. 3.8: Nachweise der glas- und basaltbewehrten Variante der Flügelmauern und Darstellung der damit verknüpften Kosten, Glas (links) und Basalt (rechts).

Beim Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Varianten fällt auf, dass bei allen Varianten der Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG), insbesondere der Nachweis der Rissbreiten und der Betonspannungen, maßgebend ist. Die Stahlbetonvariante benötigt, dicht gefolgt von der CFVK-Variante, die geringste Nutzhöhe und somit auch Dicke des Bauteils. Die GFVK- und BFVK-Variante verhalten sich nicht nur in Bezug auf die chemische Zusammensetzung, sondern auch hinsichtlich des Tragverhaltens sehr ähnlich. Beide Varianten benötigen eine höhere Nutzhöhe.

Die Materialkosten basieren auf den Massen bzw. Volumina der Materialien und den zugehörigen Kostenwerten, wie sie in Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2 aufgeführt sind. Die Stahlbetonvariante erfordert ebenfalls die geringsten Materialkosten. Die Materialkosten der CFVK-Variante sind um etwa 317% und der GFVK-Variante um etwa 115% höher im Vergleich zur Stahlbetonvariante. Die BFVK-Variante ist nach der Stahlbetonvariante die günstigste, jedoch ist die BFVK-Variante im Vergleich zur Stahlbetonvariante um etwa 52% teurer. In der nachstehenden Tabelle 3.6 sind die Ergebnisse der Parameterstudie tabellarisch zusammengefasst.

Tab. 3.6: Auswertung Parameterstudie für ein Kostenoptimum - Flügelmauern.

Eigenschaft		Einheit	Stahl Stab	CFVK Stab	GFVK Stab	BFVK Stab
Bewehrungsfläche	A_f	cm ²	17,4	10,8	18,2	18,4
statische Nutzhöhe	d	cm	37,1	44,0	51,1	51,1
Querschnittshöhe	h	cm	42,0	47,0	55,0	55,0
Materialkosten ¹	MK	€/m	308	879	574	443
Treibhauspotential ¹	GWP	kg CO ₂ äq./m	565	723	603	598
inkl. konstruktive Durchbildung						
Bewehrungsfläche	$A_{f,min}$	cm ²	4,82	5,72	6,64	6,64
Bewehrungsfläche	$A_{f,max}$	cm ²	168	188	220	220
gew. Biegebewehrungsfläche	$A_{f,gew}$	cm ²	20,11	11,22	20,11	20,11
Materialkosten ¹	MK	€/m	364	1517	781	555
Treibhauspotential ¹	GWP	kg CO ₂ äq./m	673	990	652	645
Bewehrung ¹	M	kg	5129	822	1595	1572
Beton ¹	V	m ³	80,6	90,2	143,3	143,3
Bewehrungsgrad	ρ	kg/m ³	63,63	9,11	15,10	14,89

¹bezogen auf die Flügelmauern;

3.1.2.4 Berechnung des Randbalkens

Die Berechnung des Randbalkens erfolgt über eine Zwangsbemessung, die in Barisic [13] genauer erläutert wird. Als Referenz dient der Randbalken gemäß der ASFINAG-Regelplanung [105]. Dieser Randbalken wird bei Straßenbrücken mit einer Fahrbahnbelagsdicke von bis zu 29 cm eingesetzt. Im Gegensatz zu den zuvor behandelten Bauteilen bleibt die Höhe dieses Bauteils unverändert, wodurch die in Abschnitt 2.1.8.2 beschriebene Parameterstudie nicht erforderlich ist. Stattdessen erfolgt die Ermittlung der jeweils benötigten Bewehrung zur Begrenzung der Rissbreiten, die aufgrund von Zwangsbeanspruchungen im Betonquerschnitt entstehen. Die Ergebnisse der Berechnung sind in Tabelle 3.7 ersichtlich.

Tab. 3.7: Auswertung des Randbalkens.

Eigenschaft		Einheit	Stahl Stab	CFVK Stab	GFVK Stab	BFVK Stab
Querschnittshöhe	h	cm	36,0	- ¹	- ¹	- ¹
Bewehrung	M	kg	1351	123	182	180
Beton	V	m ³	10,80	- ¹	- ¹	- ¹
Bewehrungsgrad	ρ	kg/m ³	125,06	11,40	16,85	16,69

¹Bauteilgeometrie des Randbalkens wird nicht verändert;

3.2 Allgemeine Methodik zur Berechnung der Lebenszykluskosten von Bauteilen mit nichtmetallischer Bewehrung

3.2.1 Errichtungskosten

Die zusätzlichen Kosten für einen Kubikmeter (m^3) Bewehrungsbeton können auf Basis von Vergleichsberechnungen ermittelt werden. In der RVS 13.05.11 [86] zur Lebenszyklusberechnung von Brückenbauwerken sind Einheitspreise (EP) für Stahlbeton (STB) unterschiedlicher Konstruktionstypen angegeben. Diese Werte inkludieren auch die Materialkosten und Aufwandswerte für Schalung, Beton und Bewehrung. Die Einheitspreise der anderen Varianten werden entsprechend der Gleichung 3.1 angepasst.

$$EP_{FVKB} = EP_{STB} + (M_{B,FVK} - M_{B,STB}) * K_B - M_{S,STB} * K_S + M_{FVK} * K_{FVK} \quad (3.1)$$

mit:

EP_{FVKB}	Einheitspreis für Beton mit FVK-Bewehrung [$\text{€}/m^3$]
EP_{STB}	Einheitspreis für Stahlbeton [$\text{€}/m^3$]
$M_{B,FVK}$	Menge Beton mit FVK-Bewehrung [m^3]
$M_{B,STB}$	Menge Stahlbeton [m^3]
K_B	Kostenkennwert Beton [$\text{€}/m^3$]
$M_{S,STB}$	Menge Stahlbewehrung [kg/m^3]
K_S	Kostenkennwert Stahl [$\text{€}/\text{kg}$]
M_{FVK}	Menge Textilbewehrung [kg/m^3]
K_{FVK}	Kostenkennwert Textilbewehrung [$\text{€}/m^3$]

Die Gleichung 3.1 setzt voraus, dass die Schalungskosten und Aufwandswerte für Beton und Bewehrung identisch bleiben. In Abschnitt 2.2.4.2 sind einige Ergebnisse aus Literaturrecherchen in Bezug auf Einsparungsmöglichkeiten von Kosten bei Transport und Einbau aufgeführt [5, 34, 90–92]. In Brown [92] wurde eine Analyse zur Herstellung von Bewehrungskörben aus GFVK- und konventioneller Stahlbewehrung durchgeführt. In der GFVK-Variante wurden 54 Bügel mehr als bei der Stahl-Variante eingebaut, und trotzdem konnte die Arbeitszeit um 20% gesenkt werden. Des Weiteren birgt das reduzierte Gewicht von GFVK- und BFVK-Bewehrung, das ungefähr einem Viertel der Stahlbewehrung entspricht, Kostenvorteile in Bezug auf den Transport. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Transportkosten gegenüber Stahl um den Faktor 0,25 bis 0,5 verringert werden können [34]. Die CFVK-Variante zeigt ebenfalls Einsparungen in Bezug auf die Kosten von Transport und Einbau. In Otto und Adam [90] summieren sich die Einsparung bei Transport und Einbau auf lediglich 10% der Gesamtkosten im Vergleich zur Stahlbetonvariante.

Nichtmetallische Bewehrungen müssen auf der Baustelle entsprechend vorsichtig behandelt werden, um eine Beschädigung der Matrix auszuschließen [106]. Die damit verbundenen Anforderungen an die Lagerung und den Einbau führen zu zusätzlichen Kosten. Wie in Tabelle 3.1 ersichtlich, ist der Bemessungswert der Zugfestigkeit von GFVK- und BFVK-Bewehrung geringer als bei der von Stahlbewehrung, wodurch mehr Bewehrung erforderlich ist. Da aufgrund der kleineren Zugfestigkeit der gesamte Bewehrungsgrad erhöht werden muss, kann bei der GFVK-

und BFVK-Variante aufgrund der Verlegung von mehr Bewehrung und Mehrkosten für eine entsprechende Lagerung von einer Kostenparität ausgegangen werden. Bei der CFVK-Variante kann ebenfalls durch die entsprechend vorsichtige Lagerung der Bewehrung von einer Kostenparität ausgegangen werden. In Tabelle 3.8 sind die Einheitspreise für bewehrten Beton für unterschiedliche Bewehrungen ersichtlich.

Tab. 3.8: Einheitspreise für bewehrten Beton für unterschiedliche Bewehrungen.

Beton	Einheit	Stahl ¹	CFVK ²	GFVK ²	BFVK ²
Konstruktiver Beton (z.B. Rostplatte), Flachgründung (einschließlich Erdbau)	€/m ³	509	_3	_3	_3
Widerlager (Beton einschließlich Bewehrung, Füllbeton, Filterbeton)	€/m ³	538	1598	801	678
Flügelmauer	€/m ³	509	1133	648	550
Tragwerk (Plattenbrücke)	€/m ³	678	1738	941	818
Randbalken	€/m ³	593	1442	874	573

¹aus [86], inkl. Aufschlag Baustellengemeinkosten (15%) und Verwaltungskosten (10%);
 valorisiert mittels Baukostenindex Tiefbau auf ø2023; ²berechnet mit Gleichung 3.1; ³nur das aufgehende Tragwerk aus FVK-Beton hergestellt;

3.2.2 Betriebskosten

Der größte Unterschied im Betrieb zwischen konventionell bewehrten Stahlbetonbauteilen und Bauteilen, die mit nichtmetallischer Bewehrung verstärkt sind, liegt in der Häufigkeit von Schäden an den Betonoberflächen. Um die niedrigere Häufigkeit von Betoninstandsetzungen zu berücksichtigen, werden nur Betoninstandsetzungen für folgende Ursachen herangezogen:

- Konstruktions- und Ausführungsmängel
- Frost-Tausalz-Schädigung
- Ermüdung

Da die Rahmenbrücke nicht vorgespannt ist, wird der prozentuale Anteil infolge ungenügenden Verpressens von Spanngliedern auf die anderen Schadensursachen gemäß Abbildung 2.16 aufgeteilt. Der prozentuale Anteil der Betoninstandsetzungen beträgt somit etwa 25%. In dieser Studie werden die Kosten der Instandsetzung auf 25% der Stahlbetonvariante reduziert [3]. Des Weiteren wird das Inspektionsintervall der Rahmenbrücke von 6 auf 8 Jahre erhöht, was zu einer jährlichen Kostenreduktion auf 75% der Stahlbetonvariante führt [84].

Im Wesentlichen bestimmen die Nutzungsdauer der Fahrbahnbeläge die Instandsetzungsintervalle. Der Einsatz von korrosionsresistenten Brückenkapfen in Kombination mit einem langlebigeren Brückenbelag (z.B. Betonfahrbahn), könnte die Intervalle verändern. Diese potenzielle Kosteneinsparung wird in der Berechnung der Lebenszykluskosten vernachlässigt, da eine Einsparung im Zusammenhang mit den verschiedenen bewehrten Tragwerksvarianten bei gleichbleibender Brückenausrüstung ermittelt werden soll, um das ökonomische Potenzial der FVK-Bewehrung aufzuzeigen. In einem Szenario (Abschnitt 4.2) wird der Einsatz von korrosionsresistenten Brückenkapfen aus FVK untersucht, welche nur im Zuge der ersten großen Maßnahme (Belag, Kappe, Entwässerung) nach 40 Jahren gewechselt wird. Das Erhaltungsmodell der Rahmenbrücke

mit konventioneller Stahlbewehrung, das für Rahmenbrücken aus FVK übernommen wird, ist bereits in Abschnitt 3.1.1 genauer erläutert. In Tabelle 3.15 sind die Erhaltungskosten für eine Straßenbrücke (Stahlbetonrahmen, 15 m Spannweite, 100 Jahre Nutzungsdauer) beim Einsatz von Stahlbewehrung (nach [86]) und FVK-Bewehrung ersichtlich.

Tab. 3.9: Erhaltungskosten für eine Straßenbrücke (Stahlbetonrahmen, 15 m Spannweite, 100 Jahre Nutzungsdauer) beim Einsatz von Stahlbewehrung (nach [86]) und FVK-Bewehrung.

Maßnahme	Menge	Zeitpunkt (Jahr) ¹				
		1-100	20	40	60	80
Betoninstandsetzung	533 m ²		13,5	31,2 (14,7) ²	41,9	31,2 (14,7)
Straßenbelag	152 m ²		4,1	10,3	4,1	10,3
Abdichtung	187 m ²		-	15,9	-	15,9
Entwässerung	20 m		2,0	6,8	2,0	6,8
Brückenkappe	40 m		1,5 (0,0)	30,5	1,5 (0,0)	30,5 (0,0) ³
Rückhaltesystem	40 m		-	18,3	-	18,3
Geländer (Edelstahl)	80 m		-	4,1	8,3	12,4
Erhaltung + Prüfung	192 m ²	1,04 (0,78)				

¹Angaben in Tausend Euro; ²Werte in Klammer kennzeichnen den angesetzten Wert für FVK-Bewehrungen; ³nur wenn Brückenkappe aus FVK;

3.2.3 Nutzerkosten

Die Berechnung der Nutzerkosten erfolgt gemäß Abschnitt 2.2.3 und umfasst den Nutzen und die Belastungen für die Allgemeinheit (Phase D). Die Fahrzeugbetriebskosten, Zeit- und Transportkosten sowie Unfallkosten werden unter Annahme eines durchschnittlichen Verkehrsaufkommens und der Berechnung allfälliger Maßnahmen (Dauer [107], Temporeduktion und Länge [108]; siehe Tabelle 3.10) in der Lebenszyklusanalyse in Rechnung gestellt. Lärm- und Schadstoffkosten sowie auch der Nutzen des induzierten Verkehrs werden nicht berücksichtigt, da keine Routenänderung oder Neudimensionierung erfolgt. Bei den Klimakosten werden nur die Anteile aufgrund von veränderten Bauteildimensionen (Beton) und durch die unterschiedliche Bewehrung berücksichtigt [17]. Die Kosten des veränderten Treibstoffverbrauchs werden nicht berücksichtigt, da sich die Geschwindigkeit nur geringfügig ändert und derselbe Weg zurückgelegt wird. Die Berechnung der Klimakosten der verschiedenen Varianten erfolgt unter der Annahme, dass bei Infrastrukturbauwerken die maßgebenden CO₂-Beiträge im Zuge der Errichtungsphase zu finden sind. Die Unfallkosten basieren auf den Daten von [109] und werden mittels Unfallkostenraten berechnet. In Tabelle 3.10 sind die verwendeten Werte für die Berechnung der Nutzerkosten der verschiedenen Erhaltungsszenarien dargestellt.

Tab. 3.10: Erhaltungsszenarien und Verkehr zur Berechnung der Nutzerkosten.

Bezeichnung	Einheit	Wert
Jährlicher durchschnittlicher täglicher Verkehr JDTV	Kfz/d	20.000
		30.000
		40.000
Jährlicher durchschnittlicher Verkehr in darunterliegenden Verkehrsweg JDTV	Kfz/d	0
		10.000
		20.000
		30.000
Dauer der Verkehrseinschränkung bei Stahlbetonvariante		
Hauptverkehr klein / groß d	Tage	13,6 / 56,0
Darunter liegenden Verkehr klein / groß d	Tage	22,9 / 20,6
Dauer der Verkehrseinschränkung bei FVK-Variante		
Hauptverkehr klein / groß d	Tage	4,4 / 49,0 (30,3) ¹
Darunter liegenden Verkehr klein / groß d	Tage	0,0 / 6,7
Länge der Baustelle (einschl. Verzögerung)	km	0,65
Planmäßige Geschwindigkeit V	km/h	130
Geschwindigkeit auf der Baustelle	km/h	100
Anteil Schwerlastverkehr SV	%	80
Anteile Fernverkehr / Nahverkehr im Schwerlastverkehr (FV/NV)	%	8
Durchschnittliche Nutzlast NL für Fernverkehr / Nahverkehr im Schwerlastverkehr	%	30 / 70
Durchschnittliche Nutzlast NL für Fernverkehr / Nahverkehr im Schwerlastverkehr	t	14 / 6
Anteil Geschäft- / Pendlerverkehr / anderer Verkehr im PKW-Verkehr (GV/PV/AV)	%	13 / 30 / 57
Besetzungsgrad η im PKW	-	1,3
Differenz Unfallkostenrate ²	€/Kfz-km	-0,0158
Energiekosten ETS Zertifikat	€/t CO ₂ Äq.	84,75

¹wenn durch FVK-Ausführung keine Randbalkenerneuerung notwendig; ²Differenz der Unfallkostenrate zwischen einer freien Strecke und einer Baustelle;

3.2.4 Entsorgungskosten

Die Kosten für Abbruch und Transport (C1-C2) entsprechen bei allen nichtmetallischen Bewehrungsvarianten den gleichen Kosten wie bei der konventionellen Stahlbetonvariante. Wie bereits in Abschnitt 3.1.1 erwähnt, sind die Kosten für die Entsorgung (Abfallbehandlung C3, Deponierung C4) nicht berücksichtigt, wodurch diese auf aktueller Preisbasis recherchiert und angesetzt wurden. Die Abfallbehandlung erfolgt mit Annahmepreise für Betonrecycling von großformatigen (>80 cm) bewehrten Stücken aus [110] für Stahl- und Carbonbeton, da die Bewehrungsmaterialien nach dem Brechen noch getrennt werden müssen. Glas- und basaltbewehrter Beton wird nicht wie Stahl- und Carbonbeton entsorgt, sondern mittels des Entsorgungsszenarios 2 gemäß Abbildung 2.13 verwertet. Aus diesem Grund muss die Bewehrung noch von der Matrix

getrennt werden, wodurch Annahmepreise für Betonrecycling von groß scholligen unbewehrten Betons aus [110] zugrunde gelegt werden können. Bei Carbonbeton findet eine Weiterverarbeitung der Carbonfasern statt, wobei Regelpreise für Pyrolyseverfahren nach [111] herangezogen werden. Für die Entsorgungskosten von Betonbauteilen mit nichtmetallischer Bewehrung wird angenommen, dass keine zusätzlichen Kosten für die Gefahrenvermeidung während der Abbruchbehandlung berücksichtigt werden müssen. Die angesetzten Kostensätze für die Entsorgung sind in Tabelle 3.11 ersichtlich.

Tab. 3.11: Entsorgungskosten für Rahmenbrücken mit unterschiedliche Bewehrungen.

Bezeichnung	Einheit	Stahlbeton ¹	Carbon ²	Glas ²	Basalt ²
Abbruch + Transport	€/m ² Brückenfläche		186 ¹		
Abfallbehandlung + Recycling Beton	€/t Abbruchmaterial		34 ²	15 ²	
Abfallbehandlung + Recycling Bewehrung	€/t FVK	34 ²	498 ³	- ⁴	

¹aus [86], inkl. Aufschlag Baustellengemeinkosten (15%) und Verwaltungskosten (10%), valorisiert mittels Baukostenindex Tiefbau auf ø2023; ²aus [110], valorisiert; ³Firmenangaben; ⁴Downcycling gemäß Abbildung 2.13;

3.3 Berechnung der Lebenszykluskosten

3.3.1 Ermittlung der Massen für die Lebenszyklusanalyse

Die ermittelten Mengen basieren auf den Abmessungen und Berechnungen gemäß RVS 15.02.31 [99] sowie der Parameterstudie. Die Mengen für die Elemente der Ausrüstung, Geländer und Fahrzeugrückhaltesystem, werden aus der RVS 13.05.11 [86] entnommen. Die Massenermittlung für das Fundament wird aus der RVS 15.02.31 [99] entnommen und ist für jede Variante gleich. Die Massenermittlung der Pfeiler (im Beispiel die Widerlagerwand), Widerlager (im Beispiel die Flügelmauern) und dem Tragwerk als Plattenquerschnitt erfolgt je nach Bewehrungsvariante mit den Bauteildicken aus Tabelle 3.4. In Abbildung 3.9 und Abbildung 3.10 sind beispielhaft die Mengen für die Errichtung (Modul E1) und den Betrieb (Modul B1) der Stahlbetonvariante dargestellt. Wie in Abschnitt 2.2.2 erläutert, erfolgt eine Unterteilung in die Module Unterbau, Überbau und Ausrüstung, um eine möglichst genaue Kostenprognose zu schaffen.

E1 Inventar Errichtung					
Auswahl	Spezifizierung	Menge	Einheit	Alterung	Kommentar
Unterbau					
	Pfeiler / Stützen (Beton einschließlich Bewehrung)	102,1	m ³	Pfeiler, Widerlager, Flügel (mit Taumittelangriff)	
	Flachgründung (einschließlich Erdbau)	231,9	m ³	Gründung	
	Widerlager (Beton einschließlich Bewehrung, Füllbeton, Filterbeton)	80,6	m ³	Pfeiler, Widerlager, Flügel (mit Taumittelangriff)	
	Tiefgründung (einschließlich Erdbau, Pfahl D = 120 cm)		m	keine	
	Böschungspflaster	48,0	m ²	Gründung	
	Spundwand (gerammte Fläche)		m ²	keine	
Überbau					
	Stahl		t		
	Platten QS	102,1	m ³	Stahlbeton	
	Stahl		t		
	Verbundtragwerk (Ermittlung der Stahlmenge gemäß OBV-Richtlinie „Stahl-Beto		t		
	Plattenbalken		m ³		
	Plattenbalken		m ³		
	Stahlbeton (Rüstung, Schalung, Bewehrung, Beton)		m ³		
Ausrüstung					
	Elastomerlager		Stk.	Keine	
	Fahrbahnübergang < 80 mm Dehnweg		m	Keine	
	Belag Straße hochrangig (mittlere Belagsdicke 20 cm)	152,0	m ²	FBB Deck- und Trags. Asphalt einschl. Gehweg	
	Abdichtung	187,2	m ²	Abdichtung	
	Entwässerung (einschließlich Einläufe, Zuleitung, Gerüstung)	20,0	m	EW Kunststoff	
	Randbalken (Breite i.M. 1,25 m, einschließlich Oberflächenbehandlung, Dübelleiste, Leerrohre, und Bewehrung)	40,0	m	Randbalken Freiland	
	Fahrzeurückhaltesystem, Aufhaltestufe H3	40,0	m	Fahrzeurückhaltesystem	
	Geländer (duplex, einschließlich Spritzschutz)	80,0	m	GL Edelstahl	
	Lärmschutzwand Asfinag / ÖBB (auf Brücken) bis 4 m Höhe		m ²	Keine	

Abb. 3.9: Massenermittlung für die Errichtung (Modul E1) und zugrunde gelegte Alterungsmodelle für die Lebenszykluskostenanalyse.

B1 Inventar Betrieb					
Auswahl	Spezifizierung	Menge	Einheit	Alterung	Kommentar
Unterbau					
	Pfeiler / Stützen (Beton einschließlich Bewehrung)	179,2	m ²		
	Flachgründung (einschließlich Erdbau)		-		
	Widerlager (Beton einschließlich Bewehrung, Füllbeton, Filterbeton)	192,0	m ²		
	Tiefgründung (einschließlich Erdbau, Pfahl D = 120 cm)		-		
	Böschungspflaster		-		
	Spundwand (gerammte Fläche)		-		
Überbau					
	Stahl		m ²		
	Platten QS	161,6	m ²		
	Stahl		m ²		
	Verbundtragwerk (Ermittlung der Stahlmenge gemäß OBV-Richtlinie „Stahl-Beton-Verbundbrücken“)		-		
	Plattenbalken		m ²		
	Plattenbalken		m ²		
	Stahlbeton (Rüstung, Schalung, Bewehrung, Beton)		m ²		
Ausrüstung					
	Elastomerlager		Stk.		
	Fahrbahnübergang < 80 mm Dehnweg		m		
	Belag Straße hochrangig (mittlere Belagsdicke 20 cm)	152,0	m ²		
	Abdichtung	187,2	m ²		
	Entwässerung (einschließlich Einläufe, Zuleitung, Gerüstung)	20,0	m		
	Randbalken (Breite i.M. 1,25 m, einschließlich Oberflächenbehandlung, Dübelleiste, Leerrohre, und Bewehrung)	40,0	m		
	Fahrzeurückhaltesystem, Aufhaltestufe H3	40,0	m		
	Geländer (duplex, einschließlich Spritzschutz)	80,0	m		
	Lärmschutzwand Asfinag / ÖBB (auf Brücken) bis 4 m Höhe		m ²		

Abb. 3.10: Massenermittlung für die Betriebsphase (Modul B1) für die Lebenszykluskostenanalyse.

3.3.2 Errichtungsphase (A)

Die Errichtungsphase wird als Ausgangspunkt der Berechnung verwendet, wodurch die angegebenen Einheitspreise die Herstellungsphase (A1-A3) und die Errichtungsphase (A4-A5) beinhalten. Die Benchmarkpreise (€/m²), wie sie in der RVS 13.05.11 [86] gegeben sind, beziehen sich auf die Lebenszyklusphasen A1-A5 (Preisbasis 2015). Die Preise für die Stahlbetonvariante werden mithilfe der über die Baukostenindex (BKI) angepassten Einheitspreise gemäß RVS 13.05.11 [86] angesetzt. Für den zeitlichen Ausgangspunkt der Berechnungen wird das Jahr 2023 festgelegt.

Die Berechnung der Einheitskosten für die nichtmetallischen Varianten erfolgt für Pfeiler, Widerlager und dem Tragwerk als Plattenquerschnitt. Die Kosten für einen Kubikmeter (m³) Bewehrungsbeton können gemäß Gleichung 3.1 ermittelt werden. Die Materialkosten (€/kg) für die gewählten Stabdurchmesser der Bewehrungsvarianten werden aus Tabelle 3.5 entnommen. In dieser Berechnung werden die Randbalken in jeder Variante aus Stahlbeton ausgeführt.

Für die Bauteile müssen aufgrund des unterschiedlichen Aufwands in Bezug auf Schalung, Betonage und Bewehrung unterschiedliche Preise angesetzt werden. Bei den Pfeilern und dem Tragwerk wird ein Stahlbewehrungsgehalt von 83,1 kg/m³, während bei den Flügelmauern und dem Fundament ein Stahlbewehrungsgehalt von 63,6 kg/m³ verwendet wird. Mit diesen Daten und der beschriebenen Vorgehensweise ergeben sich folgende Errichtungskosten für die unterschiedlichen Bewehrungsvarianten, die in Tabelle 3.12 ersichtlich sind.

Tab. 3.12: Errichtungskosten der Brücke mit unterschiedlichen Bewehrungsvarianten (Realwerte).

Bezeichnung	Einheit	Stahl ¹ Stab	Carbon ² Stab	Glas ² Stab	Basalt ² Stab
Dichte	g/cm ³	7,85	1,60	2,10	2,10
Erf. Bewehrung (Tragwerk)	cm ² /m	28,8	23,6	44,4	44,4
Notwendige Bewehrungsmenge (Tragwerk)	kg/m ³	100%	82%	154%	154%
Preis Bewehrungsbeton (Konstr. Beton, Flachgründung)	€/m ³	83,05	13,03	23,52	23,56
Preis Bewehrungsbeton (Widerlager)	€/m ³	509	- ³	- ³	- ³
Preis Bewehrungsbeton (Tragwerk)	€/m ³	509	1133	648	550
Preis Bewehrungsbeton (Pfeiler/Stützen)	€/m ³	100%	223%	127%	108%
Preis Bewehrungsbeton (Pfeiler/Stützen)	€/m ³	678	1738	941	818
Preis Bewehrungsbeton (Pfeiler/Stützen)	€/m ³	100%	256%	139%	121%
Preis Bewehrungsbeton (Pfeiler/Stützen)	€/m ³	538	1598	801	678
Preis Bewehrungsbeton (Pfeiler/Stützen)	€/m ³	100%	308%	151%	127%
Errichtungskosten	€/m ²	2045	3783	2779	2540
		100%	185%	136%	124%

¹Kosten für Bewehrungsbeton aus [86], inkl. Aufschlag Baustellengemeinkosten (15%) und Verwaltungskosten (10%), valorisiert mittels Baukostenindex Tiefbau auf ø2023; ²Kosten für Bewehrungsbeton berechnet mit Gleichung 3.1; ³Nur das aufgehende Tragwerk mit FVK hergestellt;

Der Einsatz von nichtmetallischer Bewehrung erfordert anfänglich höhere Investitionskosten, wie in Tabelle 3.12 dargestellt. Die Mehrkosten variieren je nach Variante zwischen 24% und 85%

im Vergleich zur Stahlbetonvariante. Die Rahmenbrücke mit GFVK-Bewehrung weist nach der CFVK-Variante die höchsten Errichtungskosten auf, die sich auf 36% Mehrkosten belaufen. Die hinsichtlich der Erstinvestition wirtschaftlich attraktivste Variante ist die Rahmenbrücke aus BFVK-Bewehrung, welche die geringsten Mehrkosten von 24% aufweist.

3.3.3 Betriebsphase (B) - Betriebskosten

Die Betriebsphase, auch als Nutzungsphase bezeichnet, ist die zweite Hauptphase der Lebenszyklusanalyse und besteht aus der Phase B1-B7, wie in Abbildung 2.14 dargestellt. In dieser Phase fallen Betriebskosten an, die durch die Instandhaltung des Bauwerks verursacht werden. Die Grundlage für die Berechnung der Betriebskosten, sowie die beigeestellten Benchmarkpreise (€/m^2) werden aus der RVS 13.05.11 [86] herangezogen (Preisbasis 2015). Die Preise für die Stahlbetonvariante werden mithilfe der über die Baukostenindex (BKI) angepassten Einheitspreise gemäß RVS 13.05.11 [86] angesetzt. Für den zeitlichen Ausgangspunkt der Berechnungen wird das Jahr 2023 festgelegt.

Die Berechnung der Betriebskosten für die nichtmetallischen Varianten erfolgt gleich wie bei der Stahlbetonvariante, mit dem Unterschied, dass die Kosten für die Betoninstandsetzung der Betonbauteile um 75% reduziert werden. Die Reduzierung basiert auf der geringeren Häufigkeit der Schadensursachen an Betonoberflächen, wie in Abschnitt 3.2.2 und Abschnitt 2.2.4.3 beschrieben. Des Weiteren wird das Inspektionsintervall der Rahmenbrücke von 6 auf 8 Jahre erhöht, was zu einer Kostenreduktion der jährlichen Kosten auf 75% der Stahlbetonvariante führt [84]. In Tabelle 3.13 sind die Ergebnisse der Betriebskosten für einen Lebenszyklus von 100 Jahren dargestellt. Die Ergebnisse beinhalten die vier Instandhaltungseingriffe nach je 20 Jahren (20, 40, 60 und 80 Jahren) sowie die jährlichen Erhaltungs- und Prüfkosten.

Tab. 3.13: Betriebskosten der Brücke mit unterschiedlichen Bewehrungsvarianten (Realwerte).

Bezeichnung		Stahl Stab	Carbon Stab	Glas Stab	Basalt Stab
Betriebskosten (ND 100 Jahre)	€/m^2	2215 100%	1619 73%	1619 73%	1619 73%

Wie in Tabelle 3.13 ersichtlich ist, sind die Betriebskosten der nichtmetallischen Varianten über den gesamten Lebenszyklus um 27% günstiger als die der konventionellen Stahlbetonvariante. Dies resultiert aus der geringeren Häufigkeit von Schäden an der Betonoberfläche, wodurch weniger Betoninstandsetzungsarbeiten erforderlich sind. Die nichtmetallischen Varianten haben gleich hohe Betriebskosten, da sie sich in keinem Kostenfaktor unterscheiden.

3.3.4 Nutzen und Belastungen für die Allgemeinheit (D) - Nutzerkosten

Die Nutzerkosten entstehen während der Betriebsphase, wie in Abbildung 2.14 ersichtlich. Die Grundlage für die Berechnung der Nutzerkosten, sowie die bereitgestellten monetären Größen bietet die RVS 02.01.22 [17]. Das Bezugsjahr für den Preisstand aller monetären Größen ist das Jahr 2009 (Preisstand 2009), wodurch die Preise mit dem Arbeitskostenindex und Verbraucherpreisindex angepasst werden. Die Grundlage zur Vorgehensweise und die verwendeten Kennwerte für die Berechnung der Nutzerkosten wurden bereits in Abschnitt 2.2.3 und Abschnitt 3.2.3

beschrieben. Der zeitliche Ausgangspunkt der Berechnung ist das Jahr 2023.

Die Berechnung der Nutzerkosten für die nichtmetallischen Varianten erfolgt genauso wie bei der Stahlbetonvariante, mit dem Unterschied, dass die Dauer der Maßnahmen aufgrund von weniger Instandsetzungsarbeiten kürzer sind. Wie bereits in Abschnitt 3.3.3 beschrieben, sind nur 25% der Instandsetzungsarbeiten für die Betoninstandhaltung gegenüber der konventionellen Stahlbewehrung erforderlich. Des Weiteren sind die Betoninstandsetzungen nicht aufgrund von Korrosion erforderlich, sondern aufgrund von Konstruktions- und Ausführungsmängeln, Frost-Tausalz-Schädigungen und Ermüdung. Diese Mängel sind bei der Betoninstandhaltung schneller behebbare, da im Gegensatz zu Betonabplatzungen aufgrund von Korrosion nicht die Bewehrung freigelegt und der Korrosionsschutz aufwändig erneuert werden muss. Der Unterschied der Maßnahmendauer ist vor allem bei Maßnahmen am Unterbau signifikant, wie in Tabelle 3.10 ersichtlich. In Tabelle 3.14 sind die Ergebnisse der Nutzerkosten für einen Lebenszyklus von 100 Jahren dargestellt. Die Ergebnisse beinhalten die Nutzerkosten für die Errichtung und die vier Instandhaltungseingriffe nach je 20 Jahren (20, 40, 60 und 80 Jahren).

Als Ausgangsszenario wird ein Verkehrsaufkommen von einem jährlichen täglichen durchschnittlichen Verkehrsaufkommen (JDTV) von 20.000 auf und 10.000 Fahrzeugen unter der Brücke ausgegangen. Die Geschwindigkeitsreduktion beträgt 50 km/h (von 130 auf 80 km/h).

Tab. 3.14: Nutzerkosten der Brücke mit unterschiedlichen Bewehrungsvarianten (Realwerte).

Bezeichnung		Stahl Stab	Carbon Stab	Glas Stab	Basalt Stab
Nutzerkosten (ND 100 Jahre)	€/m ²	1871 100%	1197 64%	1172 63%	1172 63%

In Tabelle 3.14 ist die signifikante Kostendifferenz der Nutzerkosten über die gesamte Lebensdauer dargestellt. Die nichtmetallisch bewehrten Varianten unterscheiden sich nur in den Klimakosten, wodurch sie sich sehr ähnlich sind. Es ist eine Einsparung von 36% (Carbon) bis 37% (Glas und Basalt) im Vergleich zur konventionellen Stahlbetonvariante vorhanden. Diese Einsparung resultiert aus den wesentlich kürzeren Maßnahmendauern für nichtmetallisch bewehrte Varianten, wie in Tabelle 3.10 ersichtlich.

3.3.5 Entsorgungsphase (C)

Die Entsorgungsphase, ist die dritte Hauptphase der Lebenszyklusanalyse und umfasst die Phase C1-C4, wie in Abbildung 2.14 dargestellt. In der RVS 15.03.11 [86] werden nur Kosten aus der Phase C1-C2, also Abbruch- und Transportkosten, berücksichtigt. Kosten für die Entsorgung (Abfallbehandlung C3 und Deponierung C4) werden nicht berücksichtigt. Die Kosten werden auf aktueller Preisbasis recherchiert und angesetzt. Die Grundlage zur Vorgehensweise und die verwendeten Kostenkennwerte für die Berechnung der Entsorgungskosten wurde bereits in Abschnitt 2.2.4.4 und Abschnitt 3.2.4 beschrieben. Der zeitliche Ausgangspunkt der Berechnung ist das Jahr 2023.

Der Abbruch von Beton mit nichtmetallischer Bewehrung unterscheidet sich nur wenig vom Abbruch von Beton mit konventioneller Bewehrung, wodurch von Kostenparität ausgegangen werden kann. Bei der weiteren Aufbereitung mit Backen- oder Prallbrechern sind ebenfalls

keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Bewehrungsvarianten ersichtlich. Bei den FVK-Varianten mit Glas- und Basalt-Bewehrung ist aufgrund der geringen Herstellungskosten ein Downcycling zum Damm- und Wegebau (ohne Sortierung) vorgesehen, womit der Beton nicht von der Bewehrung getrennt werden muss. Hingegen muss bei der Variante mit Stahl- und Carbonbewehrung die Betonmatrix von der Bewehrung getrennt werden. Die Carbon-Bewehrung wird aufgrund der energieintensiven Herstellung recycelt, wobei die Faser von der Matrix durch Pyro- oder Solvolyse getrennt werden muss. Die Kostenkennwerte zu den eben erwähnten Vorgängen sind in Tabelle 3.11 ersichtlich. In Tabelle 3.15 sind die Ergebnisse der Entsorgungskosten der Phase C1-C4 nach einem Lebenszyklus von 100 Jahren dargestellt.

Tab. 3.15: Entsorgungskosten der Brücke mit unterschiedlichen Bewehrungsvarianten (Realwerte).

Bezeichnung		Stahl Stab	Carbon Stab	Glas Stab	Basalt Stab
Entsorgungskosten (ND 100 Jahre)	€/m ²	466 100%	490 105%	413 89%	413 89%

In Tabelle 3.15 ist deutlich erkennbar, dass die Carbonvariante die höchsten Entsorgungskosten aufweist. Dies ist auf die kosten- und energieintensive Aufbereitung mittels Pyro- oder Solvolyseverfahren zurückzuführen. Im Gegensatz dazu ist die Variante mit Glas- und Basaltbewehrung um 11% kostengünstiger als die Stahlbetonvariante, da der Betonabbruch nicht aufbereitet werden muss, sondern als Sekundärrohstoff verwendet wird.

3.3.6 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die gesamten Lebenszykluskosten über eine Nutzungsdauer von 100 Jahren ermittelt. Die Ergebnisse beziehen sich auf ein spezifisches Verkehrsszenario, nämlich einen Verkehr (JDTV) von 20.000 Fahrzeugen über der Brücke und einem Verkehr (JDTVu) unter der Brücke von 10.000 Fahrzeugen. Die Geschwindigkeitsdifferenz beträgt 50 km/h (Geschwindigkeitsreduktion von 130 auf 80 km/h). Die Berechnung der Lebenszykluskosten berücksichtigt auf Basis der Realwerte eine jährliche Valorisierung (Preisgleitung). Der Zinssatz resultiert aus einem langfristigen Mittelwert für den Baupreisindex des Brückenbaus und wird auf Basis der Empfehlung der RVS 13.05.11 [86] mit 2,5% angenommen. Auf Basis der valorisierten Lebenszykluskosten werden die Barwerte gemäß Abschnitt 2.2.1 ermittelt. Der Diskontierungszinssatz wird auf Basis RVS der 13.05.11 [86] mit 4,0% angenommen. In Tabelle 3.16 werden die Barwerte der untersuchten Varianten am Ende des Betrachtungszeitraums gegenübergestellt. Die Abbildung 3.11 visualisiert die Barwerte der untersuchten Varianten über die gesamte Lebensdauer von 100 Jahren.

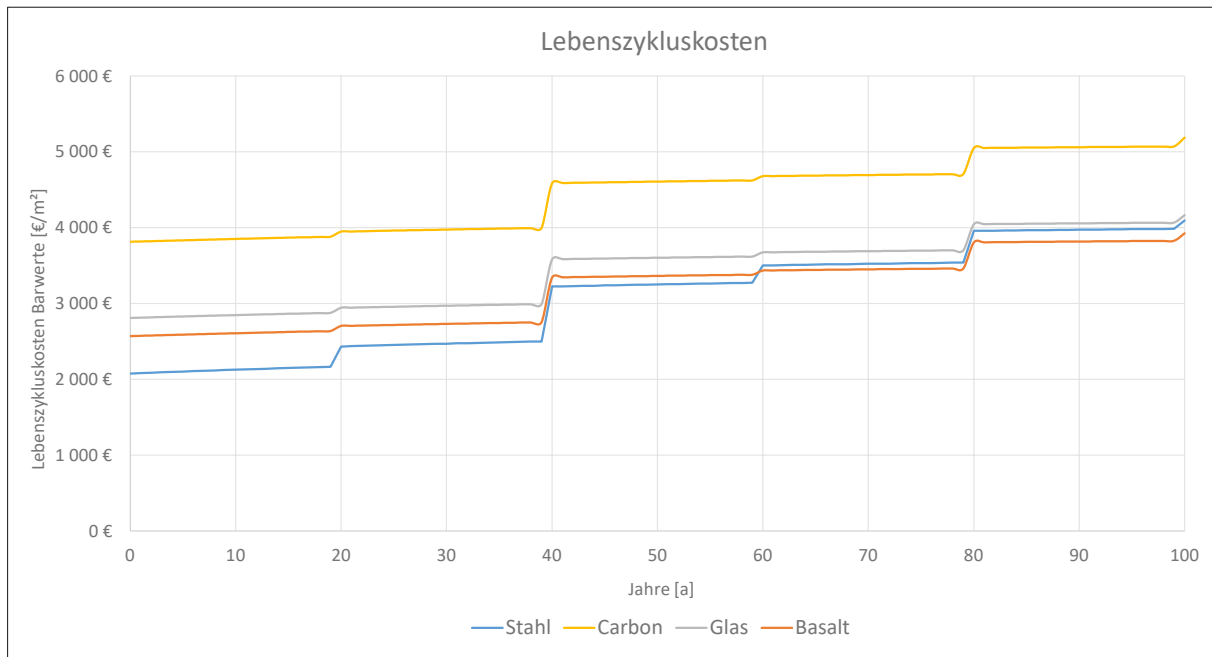


Abb. 3.11: Lebenszykluskosten mit der Barwertmethode (Nutzungsdauer 100 Jahre, Preisgleichung 2,5% und Diskontierungssatz 4%).

Tab. 3.16: Lebenszykluskosten der Brücke mit unterschiedlichen Bewehrungsvarianten mit dem Zinsniveau laut RVS.

Bezeichnung		Stahl Stab	Carbon Stab	Glas Stab	Basalt Stab
Barwert der Brücke (ND 100 Jahre)	€/m ²	4096	5186	4164	3924
		100%	127%	102%	96%

In Abbildung 3.11 ist deutlich erkennbar, dass alle Varianten mit nichtmetallischen Bewehrungen in der Errichtung deutlich teurer sind. Die Variante mit Basaltbewehrung ist die günstigste Option nach der konventionellen Variante aus Stahlbeton, wobei sie Mehrkosten von rund 24% aufweist. Nach 60 Jahren Lebensdauer ist die Variante mit Basaltbewehrung bei einem mittleren Diskontierungszinssatz von 4% kostengünstiger. Im Vergleich dazu ist die Variante mit Glasbewehrung bis zum Ende der Lebensdauer von 100 Jahren etwa 2% teurer als die Stahlbetonvariante. Aufgrund ihrer sehr kostenintensiven Errichtung ist die Variante mit Carbonbewehrung erheblich teurer als die anderen Varianten. Selbst bei einem mittleren Diskontierungszinssatz von 4% ist sie am Ende der Lebensdauer um 27% teurer als die konventionelle Stahlbetonvariante.

Eine so langjährige Betrachtung über eine Nutzungsdauer von 100 Jahren birgt große Unsicherheiten in Bezug auf die Höhe der Zinssätze. Die Lebenszykluskosten sind immer von der Differenz zwischen dem Diskontierungszinssatz und dem valorisierten Zinssatz abhängig, weshalb es nicht notwendig ist, beide Zinssätze separat zu variieren. Der valorisierte Zinssatz wird, gemäß der Empfehlung der RVS 13.05.11 [86], konstant mit einer Höhe von 2,5% angenommen. Der Diskontierungszinssatz wird zwischen 2 und 6% variiert. Die Ergebnisse der verschiedenen Diskontierungszinssätze werden in Abbildung 3.12 normiert auf die Stahlbetonvariante dargestellt.

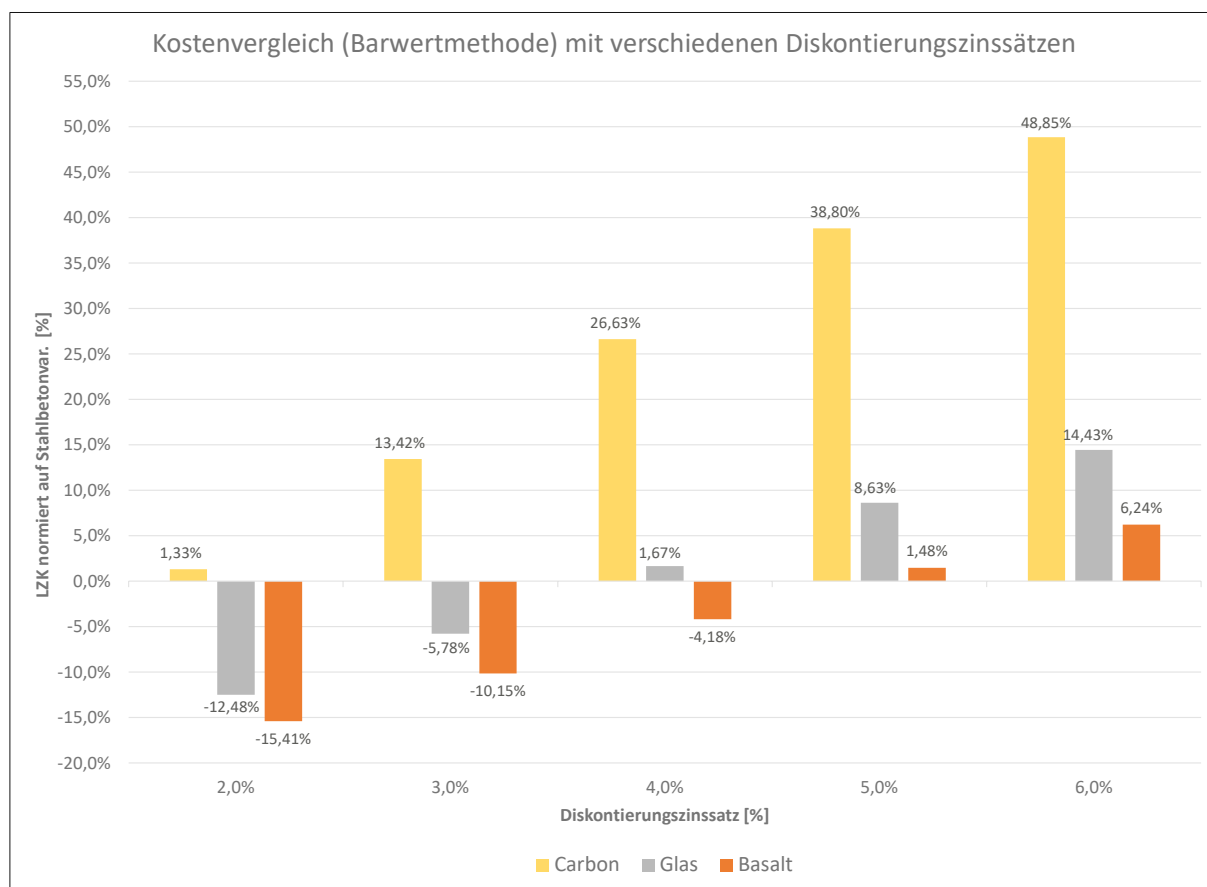


Abb. 3.12: Kostenvergleich nach Barwertmethode für verschiedene Diskontierungszinssätze.

In Abbildung 3.12 ist deutlich erkennbar, dass die Varianten mit Glas- und Basaltbewehrung bei einem niedrigen Diskontierungszinssatz von 2 bis 3% ökonomische Vorteile gegenüber der Stahlbetonvariante bieten. Die Variante mit Basaltbewehrung zeigt auch noch Einsparungspotenzial bei einem Zinssatz von 4%. Im Gegensatz dazu weist die Variante mit Carbonbewehrung bei jedem Diskontierungszinssatz von 2 bis 6% ökonomische Nachteile auf. Dies ist auf die hohen Anschaffungskosten der Carbonbewehrung zurückzuführen. Bei Anwendung eines niedrigen Diskontierungszinssatzes von 2% ist diese Variante nur noch etwa 1% teurer.

Kapitel 4

Diskussion der Ergebnisse

Im letzten Abschnitt 3 wurde die Durchführung und die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse beschrieben. Die Berechnung der Lebenszykluskosten ist von zahlreichen Parametern abhängig, wobei einige einen größeren Einfluss haben als andere. In diesem Kapitel wird daher die Bedeutung bestimmter Parameter analysiert und verschiedene Szenarien basierend auf den Ergebnissen erörtert. Im ersten Schritt ist die prozentuale Verteilung der Kosten über die verschiedenen Lebenszyklusphasen von entscheidender Bedeutung. In Abbildung 4.2 ist die prozentuale Verteilung der untersuchten Varianten über alle Lebenszyklusphasen dargestellt.

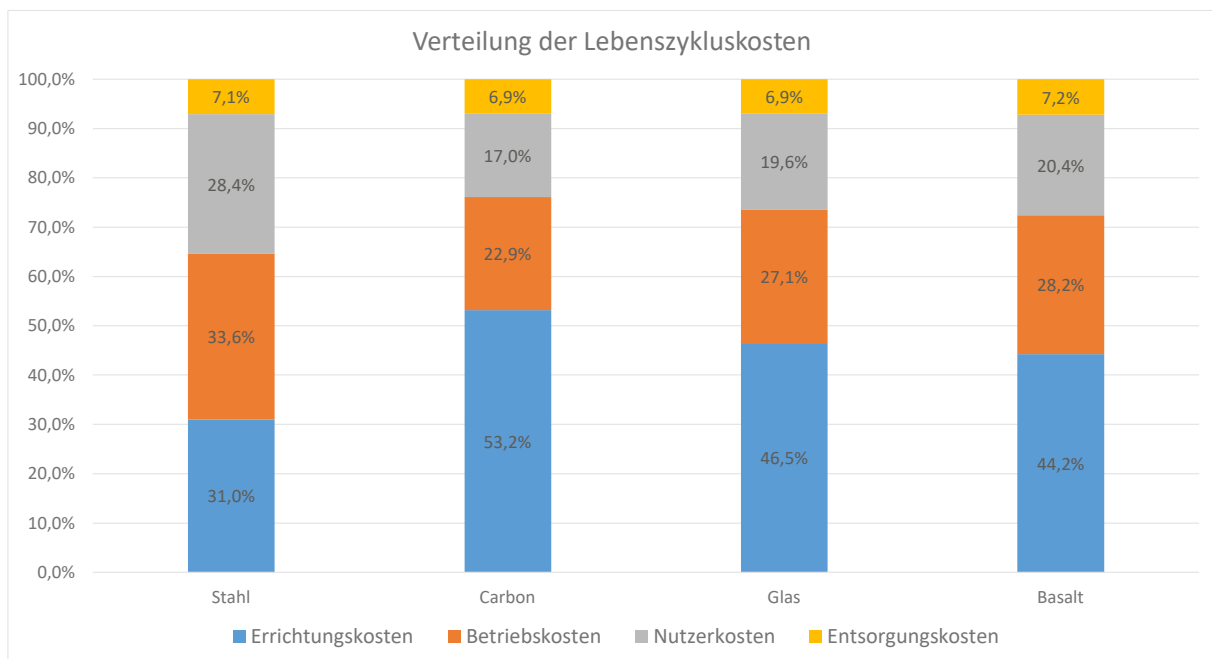


Abb. 4.1: Verteilung der Lebenszykluskosten (Realwerte) der untersuchten Varianten ($JDTV = 20.000$, $JDTV_u = 10.000$).

In Abbildung 4.2 ist deutlich erkennbar, dass selbst bei großen Kosteneinsparungen in der Entsorgung kein großer ökonomischer Vorteil erzielt werden kann. Ein ökonomischer Vorteil kann durch Einsparung von Errichtungskosten erzielt werden, insbesondere bei Varianten aus FVK-Beton. Die Errichtungskosten der Variante mit Carbonbewehrung sind gegenüber den anderen Varianten auffallend kostenintensiv ausgeprägt. Weiteres großes Einsparpotenzial besteht bei den Nutzerkosten, welche wiederum verkürzte Instandhaltungszeiten entstehen. Das Ergebnis in Abbildung 4.2 zeigt die Resultate für ein fixiertes Verkehrsaufkommen ($JDTV = 20.000$, $JDTV_u = 10.000$) und einer bestimmten Verkehrszusammensetzung (Tabelle 3.10). Um Aufschlüsse darüber zu erhalten, ob auch bei anderem Verkehr (Aufkommen, Zusammensetzung) ein ökonomisches Potenzial

vorhanden ist, werden die Eingangsparameter zunächst in Abschnitt 4.1 mithilfe der Sensitivitätsanalyse betrachtet. Die Höhe der Betriebskosten hängt somit vom Instandhaltungsaufwand der Konstruktion ab. Je mehr Bauteile aus FVK-Beton hergestellt werden, desto geringer sind die Betriebskosten.

Die Errichtungskosten machen je nach Variante einen prozentualen Kostenanteil von etwa 31 bis 53% der Gesamtkosten aus (siehe Abbildung 4.2). Der maßgebende Einfluss der Errichtungskosten liegt im Preis für den Bewehrungsbeton. Der abweichende Preis der unterschiedlichen Bewehrungen basiert auf aktuellen Kosten und kann daher nicht einfach geändert werden. Es sollte jedoch in Betracht gezogen werden, ob es sinnvoll ist, weitere Bauteile wie Randbalken aus FVK-Beton herzustellen, um potentielle ökonomische Einsparungen im Betrieb zu erzielen. Diese Maßnahme würde zu höheren Errichtungskosten der FVK-Varianten führen, jedoch ein Einsparungspotenzial in Bezug auf Betriebs- und Nutzerkosten bieten. Alternativ könnte auch in Betracht gezogen werden, weniger Bauteile aus FVK-Beton herzustellen, insbesondere wenn aufgrund fehlender Korrosionsgefährdung dies nicht erforderlich ist. Als Beispiel könnten die Widerlager herangezogen werden, die aus Stahlbeton hergestellt werden können, sofern kein Verkehrsweg unter der Brücke verläuft und sie somit keinem Spritzwasser ausgesetzt sind. Dadurch kann ein wesentlich kostengünstigeres Instandhaltungsmodell für Widerlager aus Stahlbeton (ohne Taumittelangriff) angewendet werden.

Der prozentuale Kostenanteil der Betriebskosten macht einen Anteil je nach Variante von etwa 23 bis 34% der Gesamtkosten aus (siehe Abbildung 4.2). Die Betriebskosten hängen maßgebend von den Errichtungskosten ab. Je mehr Bauteile aus FVK-Beton ausgeführt werden, desto höher sind die Errichtungskosten, und entsprechend niedriger sind die Betriebskosten. Es ist daher entscheidend, dass nur Bauteile aus FVK-Beton eingesetzt werden, die tatsächlich korrosionsgefährdet sind. Andernfalls kann das ökonomische Potenzial von FVK-Beton nicht realisiert werden, da keine Kosteneinsparungen im Betrieb erzielt werden können, die die höheren Errichtungskosten ausgleichen. Je nachdem, welche Bauteile aus FVK-Beton ausgeführt werden, muss auch die Instandhaltung entsprechend angepasst werden. Der geringe Anteil der Betriebskosten, vor allem im Vergleich zu den FVK-Varianten, ist jedoch wichtiger für das Endergebnis, als man es vermuten würde. Denn die Betriebskosten beeinflussen maßgeblich die Nutzerkosten, welche ebenfalls einen nicht zu vernachlässigenden Anteil an den Lebenszykluskosten ausmachen.

Die Entsorgungskosten machen mit etwa 7% der Gesamtkosten den geringsten Kostenanteil aus (siehe Abbildung 4.2). Es werden in allen Szenarien dieselben Entsorgungsstrategien angenommen, wodurch sich die Entsorgungskosten kaum verändern. Eine Änderung der Entsorgungsszenarien wird nicht vorgenommen, da dies keine signifikanten ökonomischen Vorteile bietet.

4.1 Sensitivitätsanalyse

Eine Sensitivitätsanalyse der Lebenszykluskosten ist von großer Bedeutung, da die Lebenszykluskostenanalyse von einer Vielzahl von Parametern abhängt, von denen einige einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis der Berechnung haben. Durch die Identifizierung der wesentlichen Parameter können die Auswirkungen auf die Gesamtkosten erhoben und der ökonomisch optimale Einsatzbereich identifiziert werden. Parameter wie Geschwindigkeitsreduktionen oder der jährliche durchschnittliche Verkehr (JDTV) variieren je nach Art der Straße und dem Verkehrsaufkommen. In Abschnitt 4.1.1 und Abschnitt 4.1.2 werden die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse ausgewertet und bewertet.

4.1.1 Nutzerkosten

Die Nutzerkosten machen je nach Variante einen prozentualen Kostenanteil von etwa 18 bis 31% der Gesamtkosten aus (siehe Abbildung 4.2), wodurch sie einen großen Einfluss auf das Endergebnis haben. Die Höhe der Nutzerkosten hängen einerseits von der Instandhaltungshäufigkeit des Bauwerks sowie der Dauer der durchgeführten Maßnahmen und andererseits von den Eingangsparametern der Berechnung der Nutzerkosten. Es werden alle Parameter in Tabelle 3.10, außer den Maßnahmendauern, um +/- 10% variiert, um die Auswirkungen auf die Nutzerkosten und somit auch die Auswirkungen auf die gesamten Lebenszykluskosten zu verdeutlichen. Anschließend werden die Parameter identifiziert, die den größten Einfluss haben, und Szenarien basierend auf diesen Änderungen gebildet (siehe Abschnitt 4.2 bis 4.7. Eine umfassende Zusammenstellung der Sensitivitätsanalyse ist im Anhang B ersichtlich. In der folgenden Tabelle 4.1 werden nur die Parameter mit dem größten Einfluss dargestellt, um ihre Auswirkungen zu verdeutlichen. Aufgrund der besseren Übersichtlichkeit werden die Ergebnisse für jeden Parameter immer nur für eine Erhöhung oder Verminderung um 10% dargestellt. Da die Sensitivitätsanalyse annähernd betragsmäßig gleich hohe Ergebnisse liefert, ist es nicht erforderlich, beide Ergebnisse darzustellen.

Tab. 4.1: Ausgewählte Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der Nutzerkosten.

Anpassung	Variante	Differenz Nutzerkosten [%]	Differenz Gesamtkosten [%]
Erhöhung JDTV auf Brücke um 10% (20.000 auf 22.000)	Stahl	7,49	1,69
	Carbon	8,97	0,96
	Glas	9,16	1,21
	Basalt	9,16	1,28
Erhöhung JDTV unter Brücke um 10% (10.000 auf 11.000)	Stahl	2,34	0,58
	Carbon	0,56	0,06
	Glas	0,57	0,07
	Basalt	0,57	0,08
Verminderung der Geschwindigkeitsdifferenz um 10% (50 auf 45 km/h)	Stahl	-6,95	-1,61
	Carbon	-6,74	-0,72
	Glas	-6,89	-0,91
	Basalt	-6,89	-0,96

In Tabelle 4.1 sind alle Parameter der Nutzerkosten aufgeführt, mit Ausnahme der Baustellenlänge und des Besetzungsgrads, die einen signifikanten Einfluss (Änderung > 2% auf die Nutzerkosten) auf die gesamten Lebenszykluskosten haben. Obwohl die Baustellenlänge ebenfalls einen erheblichen Einfluss hat, wird sie nicht variiert. Bei einer Rahmenbrücke mit kurzer Länge ist die Baustellenlänge aufgrund der geforderten Sicherheitsabstände nach der RVS 05.05.42 [108] im Wesentlichen vorgegeben, und es gibt keine Gründe, sie zu verlängern. Der Besetzungsgrad wird ebenfalls nicht variiert, da dieser von der Art des Verkehrs abhängt. Er sollte jedoch bei genaueren Informationen über die Verkehrszusammensetzung berücksichtigt werden. Es ist deutlich ersichtlich, dass bei einer Erhöhung des Verkehrsaufkommens die Stahlbetonvariante die größte Zu- bzw. Abnahme der Gesamtkosten aufweist, obwohl die Veränderung der Nutzerkosten geringer ausfällt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der prozentuale Anteil der Nutzerkosten am Gesamtkostenaufwand bei der Stahlbetonvariante im Vergleich zu den anderen FVK-Varianten höher ist. Zu berücksichtigen ist auch die beachtliche Differenz bei der Zunahme bzw. Abnahme des Verkehrsaufkommens unter der Brücke der verschiedenen Varianten. Bei einer Änderung der

Geschwindigkeitsdifferenz ist eine ähnliche, wenn auch nicht so stark ausgeprägte, Auswirkung auf die Kosten zu erkennen. Die Auswirkungen auf die Gesamtkosten sind bei der Stahlbetonvariante bei einer Zu- bzw. Abnahme der Geschwindigkeitsdifferenz deutlich höher im Vergleich zu den FVK-Varianten.

Es werden in Abschnitt 4.3 und Abschnitt 4.5 bis 4.7 verschiedene Szenarien mit einer Erhöhung oder Verminderung des Verkehrsaufkommens auf und unter der Brücke gebildet, um die Auswirkungen des Verkehrsaufkommens auf die Lebenszykluskosten zu verdeutlichen und den optimalen Einsatzbereich der FVK-Varianten hervorzuheben. Zusätzlich wird auch ein Szenario mit einer Verminderung der Geschwindigkeitsdifferenz betrachtet, um die Auswirkung auf die Lebenszykluskosten zu analysieren.

4.1.2 Zinssätze

Die Zinssätze haben einen erheblichen Einfluss auf die gesamten Lebenszykluskosten und werden ebenfalls einer Sensitivitätsanalyse unterzogen. Dabei handelt es sich einerseits um die Preisgleichung, um den valorisierten Wert zu berechnen, und andererseits um die Diskontierung, um den Barwert zu berechnen. In Tabelle 4.2 ist die Sensitivitätsanalyse beider Zinssätze dargestellt, wobei wiederum beide Zinssätze um +/- 10% variiert werden.

Tab. 4.2: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der Nutzerkosten.

Anpassung	Variante	Differenz Gesamtkosten [%]
Erhöhung valorisierter Zinssatz um 10% (2,5 auf 2,75%)	Stahl	6,47
	Carbon	3,73
	Glas	4,55
	Basalt	4,84
Verminderung valorisierter Zinssatz um 10% (2,5 auf 2,25%)	Stahl	-5,56
	Carbon	-3,18
	Glas	-3,89
	Basalt	-4,14
Erhöhung Diskontierungszinssatz um 10% (4,0 auf 4,4%)	Stahl	-8,38
	Carbon	-4,49
	Glas	-5,86
	Basalt	-6,24
Verminderung Diskontierungszinssatz um 10% (4,0 auf 3,6%)	Stahl	10,72
	Carbon	6,20
	Glas	7,56
	Basalt	8,04

In Tabelle 4.2 ist deutlich ersichtlich, dass die Anpassung der Zinssätze einen sehr großen Einfluss auf die gesamten Lebenszykluskosten haben. Die Hauptursache dafür ist, dass sich die Zinssätze auf die Lebenszykluskosten und somit auf einen Kostenanteil von 100% beziehen. Da beide Zinssätze einen großen Einfluss auf die Lebenszyklusanalyse haben, werden diese in jedem Szenario variiert. Die Lebenszykluskosten sind immer von der Differenz zwischen dem Diskontierungszinssatz und dem valorisierten Zinssatz abhängig, weshalb es nicht notwendig ist, beide Zinssätze separat zu variieren. Der valorisierte Zinssatz wird, gemäß der Empfehlung der

RVS 13.05.11 [86], konstant mit einer Höhe von 2,5% angenommen. Der Diskontierungszinssatz wird zwischen 2 und 6% variiert.

4.2 Szenario 1 - Randbalken aus FVK-Beton

Im ersten Szenario werden in den nichtmetallisch bewehrten Varianten auch die Randbalken aus FVK-Beton gefertigt, was zu höheren Errichtungskosten führt. Gleichzeitig ergibt sich jedoch ein Einsparungspotenzial für die Betriebs- und Nutzerkosten. Um die Verwendung von FVK-Randbalken zu rechtfertigen, muss das Instandhaltungsszenario angepasst werden. Da nichtmetallische Bewehrungen, die nahezu nicht korrodieren können, verwendet werden, wird angenommen, dass nur ein Austausch der Randbalken während der 100-jährigen Nutzungsdauer erforderlich ist, wobei dieser Austausch im Rahmen des Instandhaltungseingriffs nach 40 Jahren erfolgt. Der Austausch ist aufgrund der begrenzten Lebensdauer der Abdichtung unter dem Randbalken erforderlich. Zusätzlich kann die Dauer der Maßnahmen beim vierten Instandhaltungseingriff, wie in Tabelle 3.11 ersichtlich, unter der Annahme angepasst werden, dass kein Austausch der Randbalken und der darunter liegenden Abdichtung erforderlich ist. Das Verkehrsaufkommen auf und unter der Brücke sowie die Geschwindigkeitsreduktion werden im Vergleich zum Ausgangsszenario unverändert angenommen, um die potenzielle Kosteneinsparung durch FVK-Randbalken zu verdeutlichen. Die Abbildung 4.2 bildet die Barwerte der untersuchten Varianten über die gesamte Lebensdauer von 100 Jahren ab. In Tabelle 4.3 werden die Barwerte aller Varianten des untersuchten Szenarios am Ende des Betrachtungszeitraums gegenübergestellt.

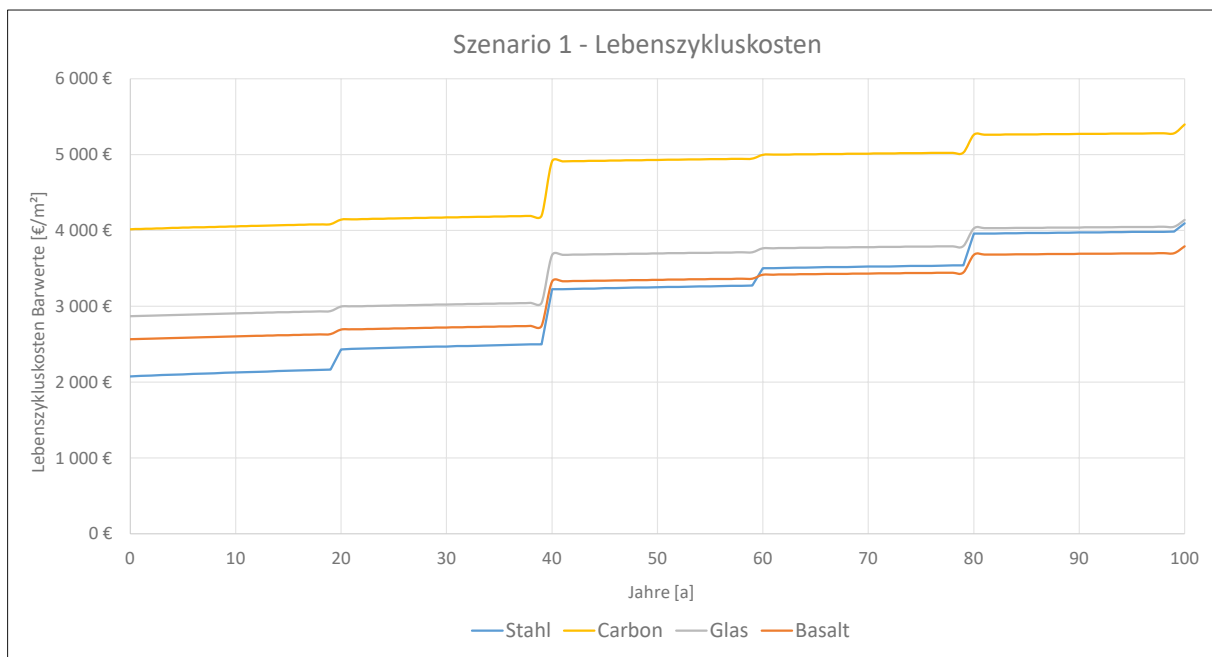


Abb. 4.2: Szenario 1 - Lebenszykluskosten mit der Barwertmethode (Nutzungsdauer 100 Jahre, Preisleitung 2,5% und Diskontierungszinssatz 4%).

Tab. 4.3: Szenario 1 - Lebenszykluskosten der Brücke mit unterschiedlichen Bewehrungsvarianten mit dem Zinsniveau laut RVS.

Bezeichnung		Stahl Stab	Carbon Stab	Glas Stab	Basalt Stab
Barwert der Brücke (ND 100 Jahre)	€/m ²	4096 100%	5398 132%	4141 101%	3793 93%

In Abbildung 4.2 und Tabelle 4.3 ist deutlich erkennbar, dass bei einem mittleren Diskontierungszinssatz von 4% nur bei der Variante mit Basaltbewehrung ein ökonomisches Einsparungspotenzial besteht. Die Variante mit Glasbewehrung ist bereits um etwa 1% teurer. Die Lebenszykluskosten können bei der Variante mit Glas- und Basaltbewehrung um 1 bzw. 3% im Vergleich zu den Randbalken aus Stahlbeton gesenkt werden. Dadurch bietet die Variante mit Basaltbewehrung bereits ein Einsparungspotential von 7% im Vergleich zur Stahlbetonvariante. Die Variante mit Carbonbewehrung weist kein ökonomisches Einsparungspotenzial auf, welches auf die hohen Anschaffungskosten von Carbonbewehrung zurückzuführen ist. Die Variante mit Carbonbewehrung wird sogar nochmals um 5% teurer und weist somit Mehrkosten von 32% gegenüber der Stahlbetonvariante auf. In diesem Szenario wurde das Instandhaltungsintervall des Randbalkens nach 40 Jahren angenommen, da die Abdichtung keine Lebensdauer von 100 Jahren aufweist. Es besteht die Möglichkeit, dass durch den Einsatz hochwertigeren Materials oder eines anderen Abdichtungssystems eine Abdichtung unter dem Randbalken mit einer Lebensdauer von 100 Jahren erreicht werden kann. Dadurch könnte der Instandhaltungsaufwand nach 40 Jahren vermieden werden. Dieses Szenario wird in dieser Arbeit jedoch nicht näher untersucht. Eine Variation des Zinssatzes ($z_D = 2$ bis 6%) zeigt das Ergebnis in Abbildung 4.3.

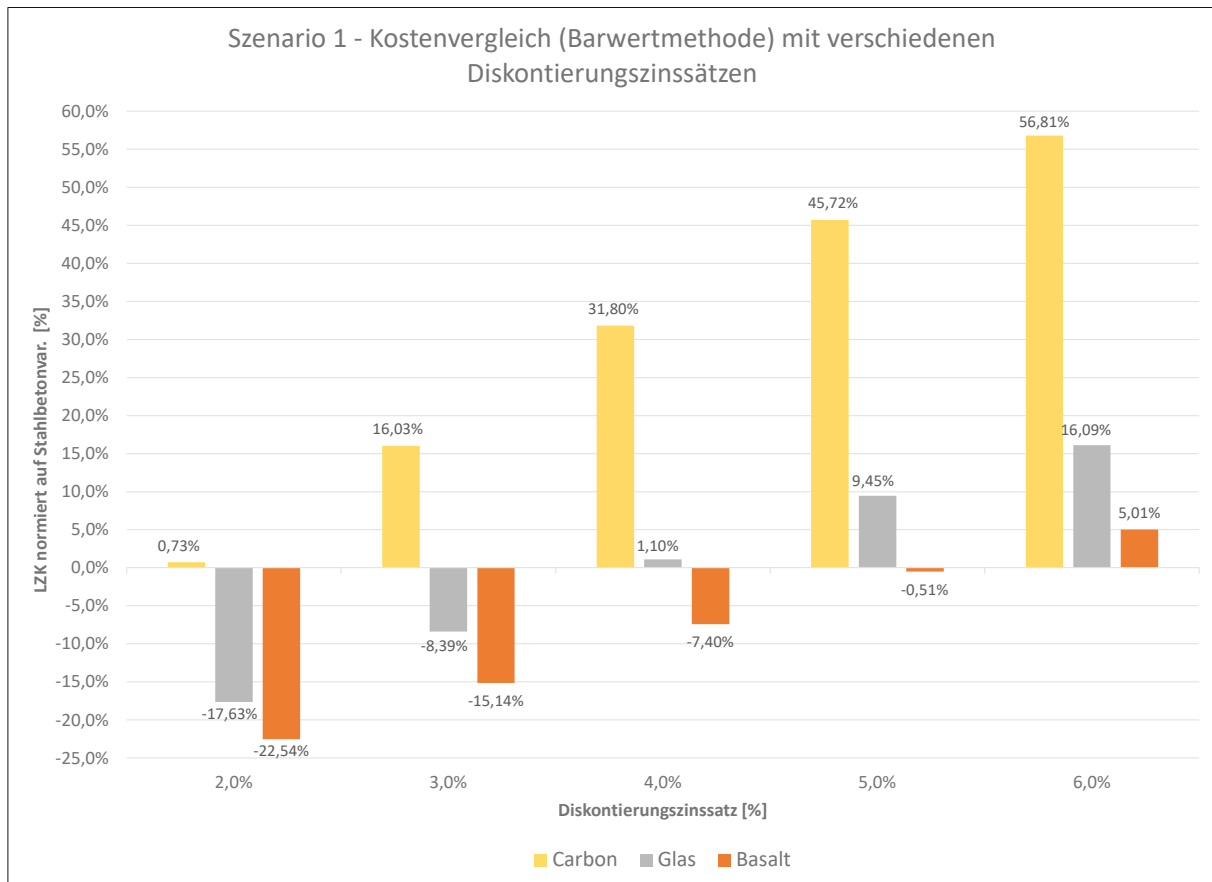


Abb. 4.3: Szenario 1 - Kostenvergleich nach Barwertmethode für verschiedene Diskontierungszinssätze.

In Abbildung 4.3 ist deutlich erkennbar, dass die Variante mit Basaltbewehrung bis zu einem Diskontierungszinssatz von 5% ökonomische Vorteile gegenüber der Stahlbetonvariante bietet. Die Variante mit Glasbewehrung bietet nur bis zu einem Zinssatz von 3% ökonomische Vorteile im Vergleich zur herkömmlichen Stahlbetonvariante. Die Variante mit Carbonbewehrung ist bei jedem Diskontierungszinssatz von 2 bis 6% teurer als die Stahlbetonvariante und weist somit keinen ökonomischen Vorteil auf.

4.3 Szenario 2 - Kein Verkehrsweg unter Brücke

Im zweiten Szenario wird ein anderes Verkehrsaufkommen berücksichtigt. Dieses Szenario bildet eine Brücke ab, unter der kein Verkehrsweg hindurchführt. Daher entstehen keine Nutzerkosten in Bezug auf den Verkehrsweg unter der Brücke, da dieser nicht vorhanden ist. Das Verkehrsaufkommen auf der Brücke sowie die Geschwindigkeitsreduktion bleiben im Vergleich zum Ausgangsszenario unverändert. Des Weiteren werden bei allen Varianten die Widerlager aus Stahlbeton ausgeführt, da diese nicht mehr durch Spritzwasser vom darunterliegenden Verkehrsweg gefährdet sind. Somit kann ein wesentlich kostengünstigeres Instandhaltungsmodell für Widerlager aus Stahlbeton (ohne Taumittelangriff) angewendet werden. Die Abbildung 4.4 bildet die Barwerte der untersuchten Varianten über die gesamte Lebensdauer von 100 Jahren ab. In Tabelle 4.4 werden die Barwerte aller Varianten des untersuchten Szenarios am Ende des Betrachtungszeitraums gegenübergestellt.

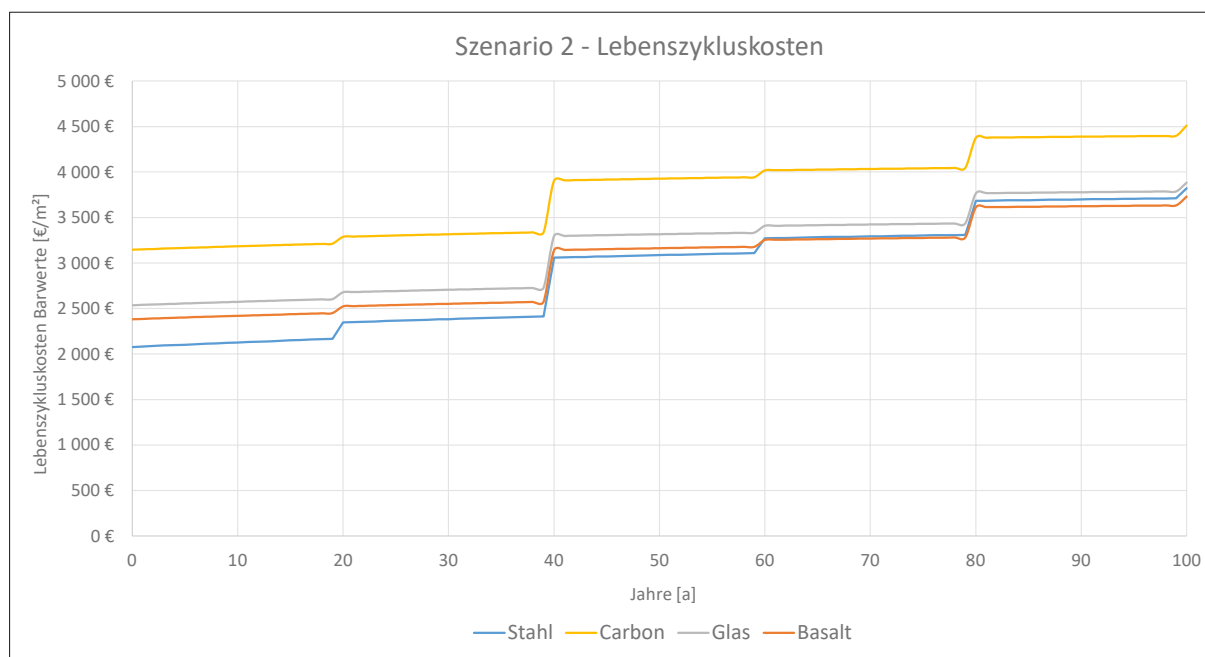


Abb. 4.4: Szenario 2 - Lebenszykluskosten mit der Barwertmethode (Nutzungsdauer 100 Jahre, Preisgleitung 2,5% und Diskontierungszinssatz 4%).

Tab. 4.4: Szenario 2 - Lebenszykluskosten der Brücke mit unterschiedlichen Bewehrungsvarianten mit dem Zinsniveau laut RVS.

Bezeichnung		Stahl Stab	Carbon Stab	Glas Stab	Basalt Stab
Barwert der Brücke (ND 100 Jahre)	€/m ²	3821	4511	3883	3729
		100%	118%	102%	98%

In Abbildung 4.4 und Tabelle 4.4 ist ersichtlich, dass nur bei der Variante mit Basaltbewehrung ein ökonomisches Einsparungspotential besteht. Die Variante mit Basaltbewehrung ist bei einem mittleren Diskontierungszinssatz von 4% bereits um 2% günstiger als die konventionelle Stahlbetonvariante. Die beiden anderen Varianten mit Glas- und Carbonbewehrung zeigen Mehrkosten von 2 bzw. 18% auf. Diese höheren Kosten im Vergleich zu den anderen Szenarien resultieren aus den geringeren Nutzerkosten. Die nichtmetallischen Varianten erzielen im Vergleich zur Stahlbetonvariante deutlich geringere Einsparungen bei den Nutzerkosten, da die Instandhaltungszeiten unter der Brücke bereits im Vergleich zur Stahlbetonvariante wesentlich kürzer sind. Obwohl sich die Nutzerkosten für alle Varianten verringern, da das Verkehrsszenario nur auf der Brücke liegt und kein Verkehr unter der Brücke stattfindet, weist die Stahlbetonvariante durch die deutlich längeren Maßnahmendauern unter der Brücke das größte Einsparpotential auf. Die Ergebnisse für eine Variation des Diskontierungszinssatzes ($z_D = 2$ bis 6%) sind in Abbildung 4.5 dargestellt.

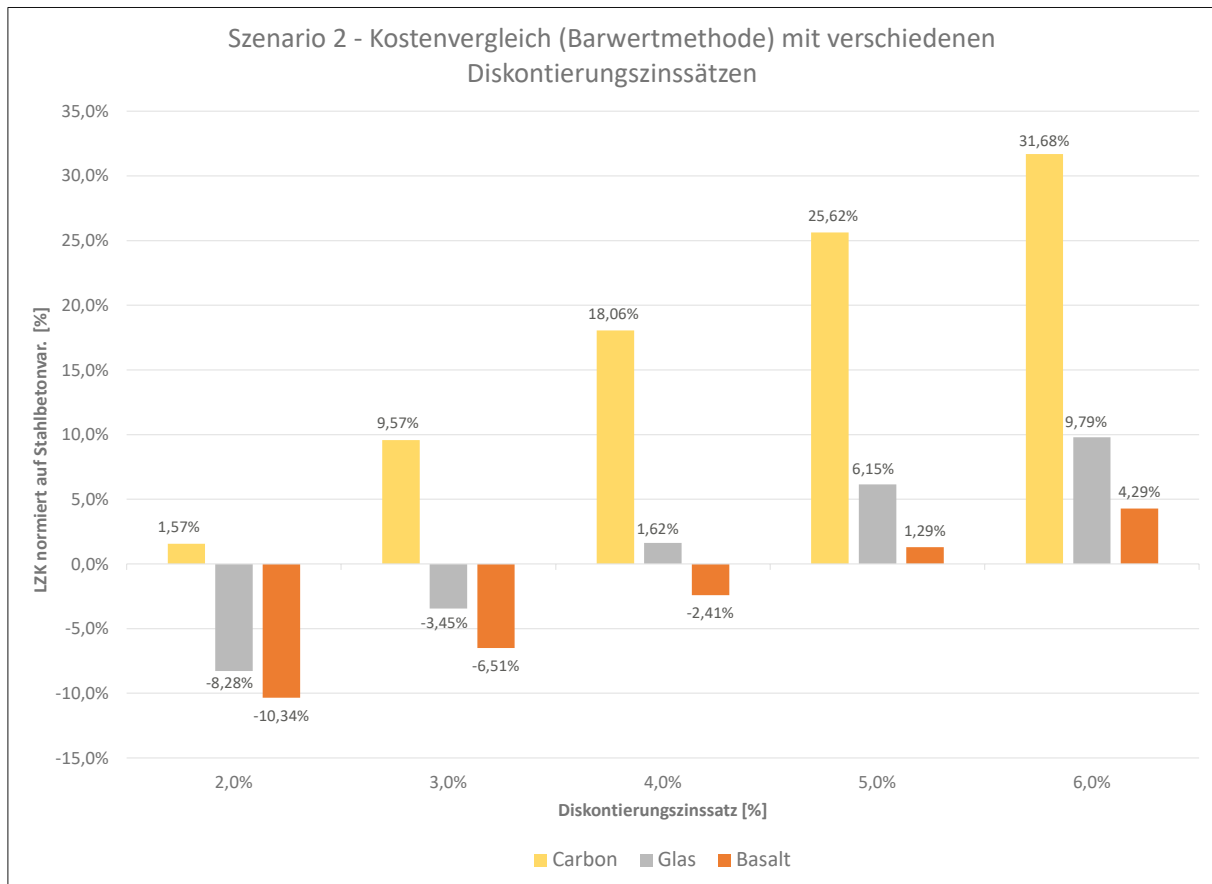


Abb. 4.5: Szenario 2 - Kostenvergleich nach Barwertmethode für verschiedene Diskontierungszinssätze.

Die Basaltvariante erzielt bis zu einem mittleren Zinssatz von 4% ökonomische Vorteile gegenüber der Stahlbetonvariante. Die Variante mit Glasbewehrung bietet nur bei einem Zinssatz von 3% ökonomische Vorteile. Die hohen Anschaffungskosten der Carbonbewehrung sowie der geringe Anteil der Nutzerkosten wirken sich negativ auf das ökonomische Einsparungspotenzial aus, wodurch bei keinem Zinssatz ökonomische Vorteile erzielt werden können.

4.4 Szenario 3 - Reduzierung der Geschwindigkeitsdifferenz

Im dritten Szenario wird eine andere Geschwindigkeitsdifferenz berücksichtigt. Grundsätzlich dient wieder das Standardszenario in Abschnitt 3.3 als Ausgangsbasis für das Szenario 3. In diesem Szenario wird die Geschwindigkeit (auf beiden Verkehrswegen) nicht von 130 auf 80 km/h reduziert, welches einer Geschwindigkeitsdifferenz von 50 km/h entspricht, sondern die Geschwindigkeit wird von 100 auf 80 km/h reduziert. Dies entspricht einer Geschwindigkeitsdifferenz von 20 km/h, womit die Differenz weniger als die Hälfte im Vergleich zu den anderen Szenarien beträgt. In Tabelle 4.5 werden die Barwerte aller Varianten des untersuchten Szenarios am Ende des Betrachtungszeitraums gegenübergestellt. Die Abbildung 4.6 bildet die Barwerte der untersuchten Varianten über die gesamte Lebensdauer von 100 Jahren ab.

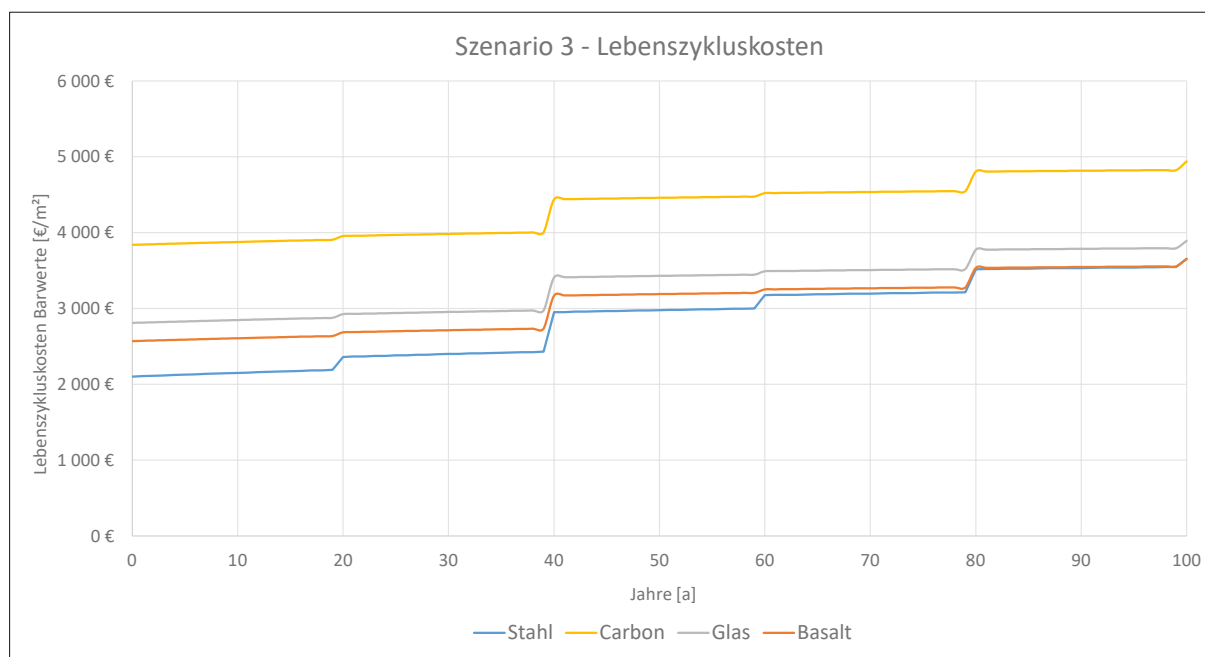


Abb. 4.6: Szenario 3 - Lebenszykluskosten mit der Barwertmethode (Nutzungsdauer 100 Jahre, Preisgleitung 2,5% und Diskontierungszinssatz 4%).

Tab. 4.5: Szenario 3 - Lebenszykluskosten der Brücke mit unterschiedlichen Bewehrungsvarianten mit dem Zinsniveau laut RVS.

Bezeichnung		Stahl Stab	Carbon Stab	Glas Stab	Basalt Stab
Barwert der Brücke (ND 100 Jahre)	€/m ²	3657	4941	3894	3654
		100%	135%	106%	100%

In Abbildung 4.6 und Tabelle 4.5 ist ersichtlich, dass aufgrund der verminderten Geschwindigkeitsdifferenz im Vergleich zum Standardszenario in Abschnitt 3.3.6 (Abbildung 3.11 und Tabelle 3.16) die Lebenszykluskosten niedriger ausfallen. Im Gegensatz zum ersten Standardszenario sind die Lebenszykluskosten der Stahlbetonvariante um etwa 11% geringer. Die Hauptursache dafür sind die verminderten Nutzerkosten durch die verminderte Geschwindigkeitsdifferenz von 50 auf 20 km/h. Im Standardszenario machen die Nutzerkosten je nach Variante einen prozentualen Kostenanteil von etwa 17 bis 28% der Gesamtkosten aus (siehe Abbildung 4.2), wodurch sie einen großen Einfluss auf das Ergebnis haben. In diesem Szenario kann bei einem mittleren Diskontierungszinssatz von 4% nur die Variante mit Basaltbewehrung Kostenparität gegenüber der konventionellen Stahlbetonvariante erzielen (siehe Tabelle 4.5). Die Variante mit Glas- und Carbonbewehrung erzielen keine ökonomischen Vorteile, sondern erzeugen Mehrkosten von 6% bzw. 35% im Vergleich zur Stahlbetonvariante. In Abbildung 4.7 ist das Ergebnis für eine Variation des Zinssatzes ($z_D = 2$ bis 6%) dargestellt.

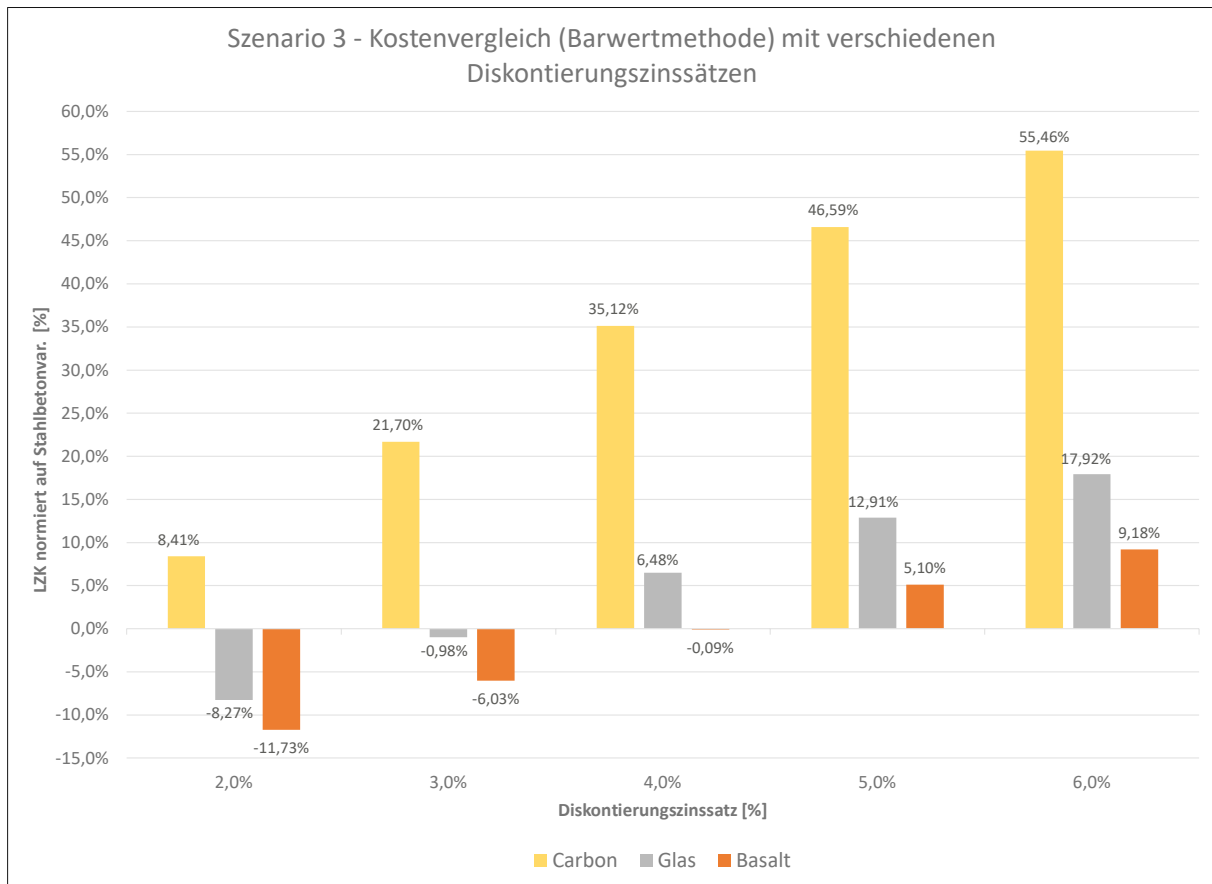


Abb. 4.7: Szenario 3 - Kostenvergleich nach Barwertmethode für verschiedene Diskontierungszinssätze.

Die Variante mit Glas- und Basaltbewehrung bieten nur bis zu einem Diskontierungszinssatz von 3% ökonomische Vorteile. Die hohen Anschaffungskosten der Carbonbewehrung sowie der geringe Anteil der Nutzerkosten (siehe Abbildung 4.2) wirken sich negativ auf das ökonomische Einsparungspotenzial aus. Die Variante mit Carbonbewehrung ist bei jedem Diskontierungszinssatz von 2 bis 6% teurer als die Stahlbetonvariante, wodurch in diesem Szenario kein ökonomischer Vorteil erzielt werden kann.

4.5 Szenario 4 - Erhöhung des JDTV's auf und unter der Brücke um 10.000

Im vierten Szenario wird von einem viel befahrenen Hauptverkehrsweg auf und unter der Brücke ausgegangen. Es wird der jährliche durchschnittliche tägliche Verkehr (JDTV) auf der Brücke von 20.000 auf 30.000 und unter der Brücke von 10.000 auf 20.000 angehoben. Die Geschwindigkeitsdifferenz bleibt gegenüber dem ersten Szenario (50 km/h) unverändert. Die Abbildung 4.8 bildet die Barwerte der untersuchten Varianten über die gesamte Lebensdauer von 100 Jahren ab. In Tabelle 4.6 werden die Barwerte aller Varianten des untersuchten Szenarios am Ende des Betrachtungszeitraums gegenübergestellt.

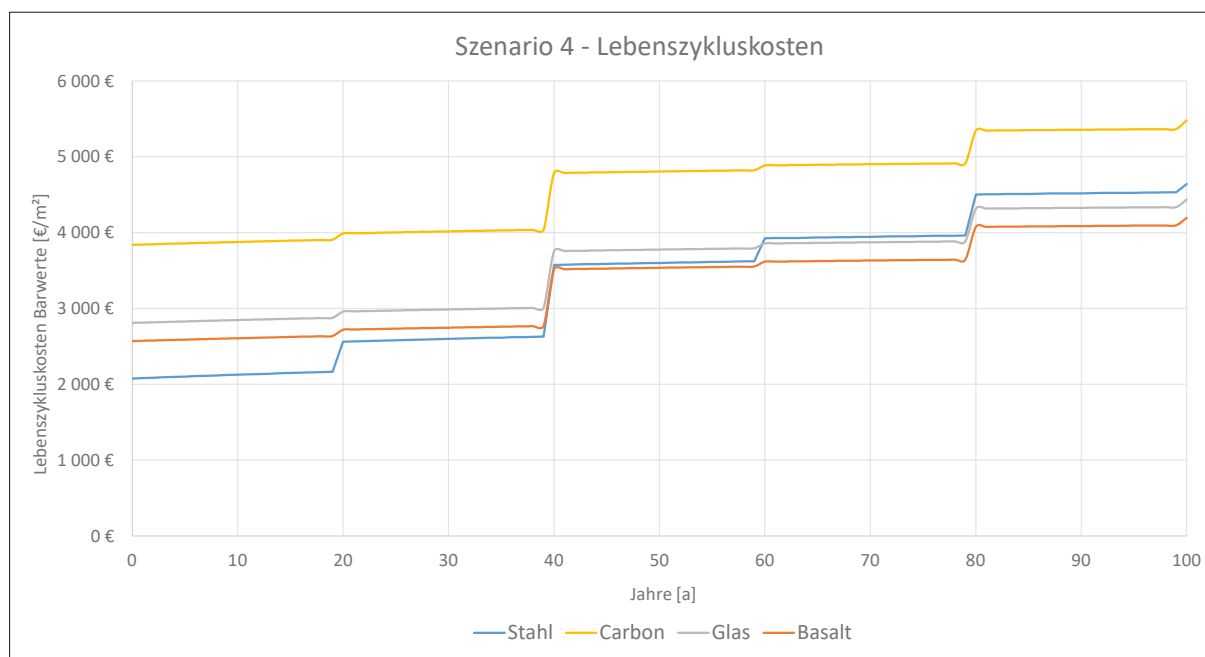


Abb. 4.8: Szenario 4 - Lebenszykluskosten mit der Barwertmethode (Nutzungsdauer 100 Jahre, Preisgleitung 2,5% und Diskontierungszinssatz 4%).

Tab. 4.6: Szenario 4 - Lebenszykluskosten der Brücke mit unterschiedlichen Bewehrungsvarianten mit dem Zinsniveau laut RVS.

Bezeichnung		Stahl	Carbon	Glas	Basalt
		Stab	Stab	Stab	Stab
Barwert der Brücke (ND 100 Jahre)	€/m ²	4642	5482	4434	4194
		100%	118%	96%	90%

In Abbildung 4.8 und Tabelle 4.6 ist deutlich erkennbar, dass durch die Anhebung des Verkehrsaufkommens die Lebenszykluskosten steigen. Dies ist hauptsächlich auf die höheren Nutzerkosten zurückzuführen. Insbesondere bei der konventionellen Stahlbetonvariante steigen die Nutzerkosten aufgrund der längeren Maßnahmendauern stärker an als bei den alternativen nichtmetallischen Varianten. Bei der Variante mit Glas- und Basaltbewehrung ergeben sich bereits bei einem mittleren Diskontierungszinssatz von 4% Kosteneinsparungen von 4 bzw. 10% (siehe Tabelle 4.6). Die Variante mit Carbonbewehrung bleibt aufgrund der hohen Anschaffungskosten immer noch um 18% teurer als die konventionelle Stahlbetonvariante. Eine Variation des Zinssatzes ($z_D = 2$ bis 6%) zeigt das Ergebnis in Abbildung 4.9.

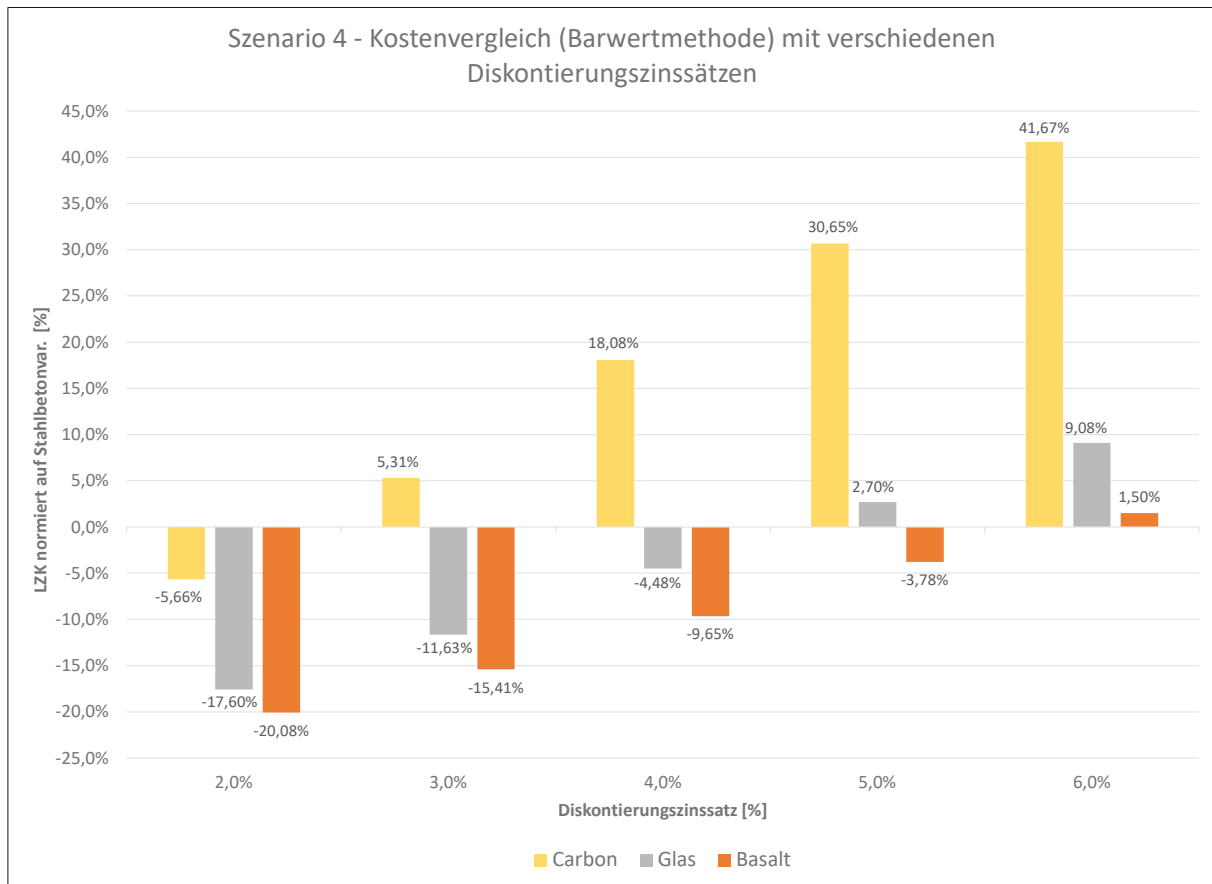


Abb. 4.9: Szenario 4 - Kostenvergleich nach Barwertmethode für verschiedene Diskontierungszinssätze.

In Abbildung 4.9 ist deutlich erkennbar, dass die Variante mit Basaltbewehrung bis zu einem Zinssatz von 5% ökonomische Vorteile gegenüber der Stahlbetonvariante bietet. Die Variante mit Glasbewehrung bietet nur bis zu einem mittleren Zinssatz von 4% ökonomische Vorteile im Vergleich zur konventionellen Stahlbetonvariante. Selbst durch die hohen Einsparungen der Nutzerkosten können die hohen Anschaffungskosten der Carbonbewehrung nicht ausgeglichen werden, wodurch nur bei einem geringen Diskontierungszinssatz von 2% ökonomische Vorteile gegenüber der Stahlbetonvariante entstehen.

4.6 Szenario 5 - Erhöhung des JDTVs auf der Brücke um 20.000

In diesem Szenario wird von einem stark befahrenen Hauptverkehrsweg auf der Brücke ausgegangen, wobei sich das Verkehrsaufkommen unter der Brücke nicht ändert. Es wird der jährlicher durchschnittliche tägliche Verkehr (JDTV) auf der Brücke von 20.000 auf 40.000 angehoben. Die anderen Parameter, wie die Geschwindigkeitsdifferenz, bleiben im Vergleich zum Standardszenario unverändert. Die Abbildung 4.10 bildet die Barwerte der untersuchten Varianten über die gesamte Lebensdauer von 100 Jahren ab. In Tabelle 4.7 werden die Barwerte aller Varianten des untersuchten Szenarios am Ende des Betrachtungszeitraums gegenübergestellt.

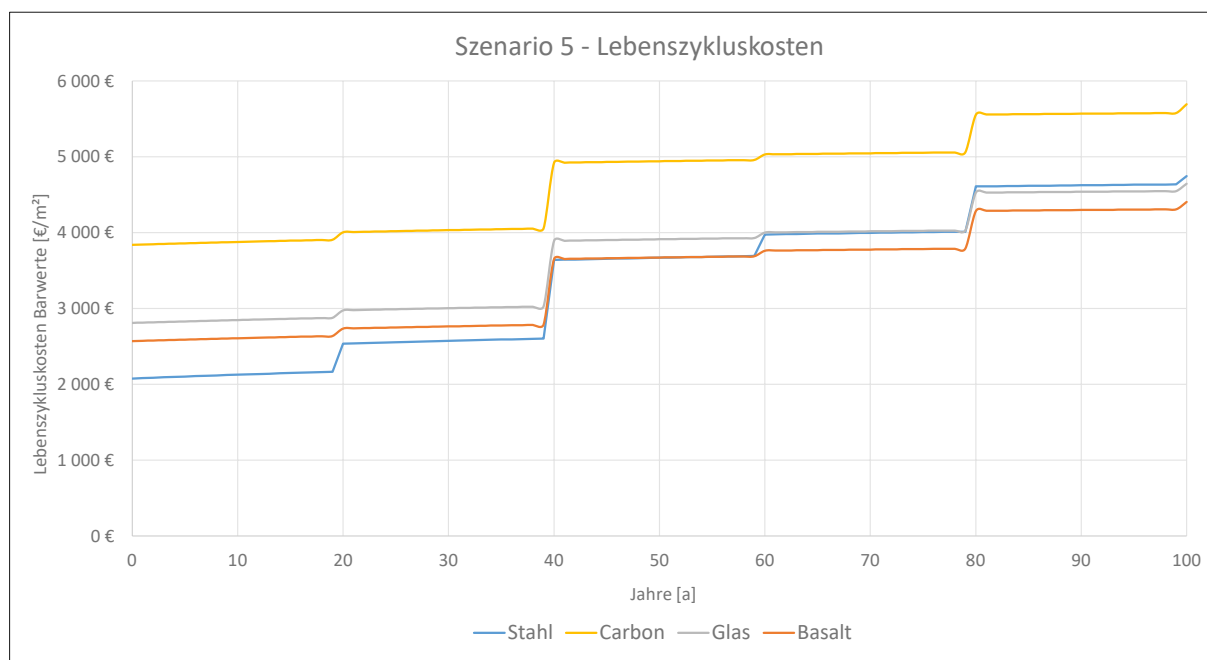


Abb. 4.10: Szenario 5 - Lebenszykluskosten mit der Barwertmethode (Nutzungsdauer 100 Jahre, Preisgleitung 2,5% und Diskontierungszinssatz 4%).

Tab. 4.7: Szenario 5 - Lebenszykluskosten der Brücke mit unterschiedlichen Bewehrungsvarianten mit dem Zinsniveau laut RVS.

Bezeichnung		Stahl Stab	Carbon Stab	Glas Stab	Basalt Stab
Barwert der Brücke (ND 100 Jahre)	€/m ²	4747	5693	4646	4405
		100%	120%	98%	93%

In Abbildung 4.10 und Tabelle 4.7 ist zu erkennen, dass die gesamten Lebenszykluskosten im Vergleich zum vorherigen Szenario 4 in Abschnitt 4.5 weiter steigen. Die Variante mit Glas- und Basaltbewehrung erzielt bereits bei einem mittleren Zinssatz von 4% Kostenvorteile gegenüber der konventionellen Stahlbetonvariante. Die Variante mit Basaltbewehrung erzielt eine Einsparung von 7% (siehe Tabelle 4.7). Im Gegensatz dazu weist die Variante mit Carbonbewehrung weiterhin kein ökonomisches Einsparungspotenzial gegenüber der Stahlbetonvariante auf, sondern ist etwa 20% teurer (siehe Tabelle 4.7). Die Ergebnisse für eine Variation des Diskontierungszinssatzes ($z_D = 2$ bis 6%) sind in Abbildung 4.11 dargestellt.

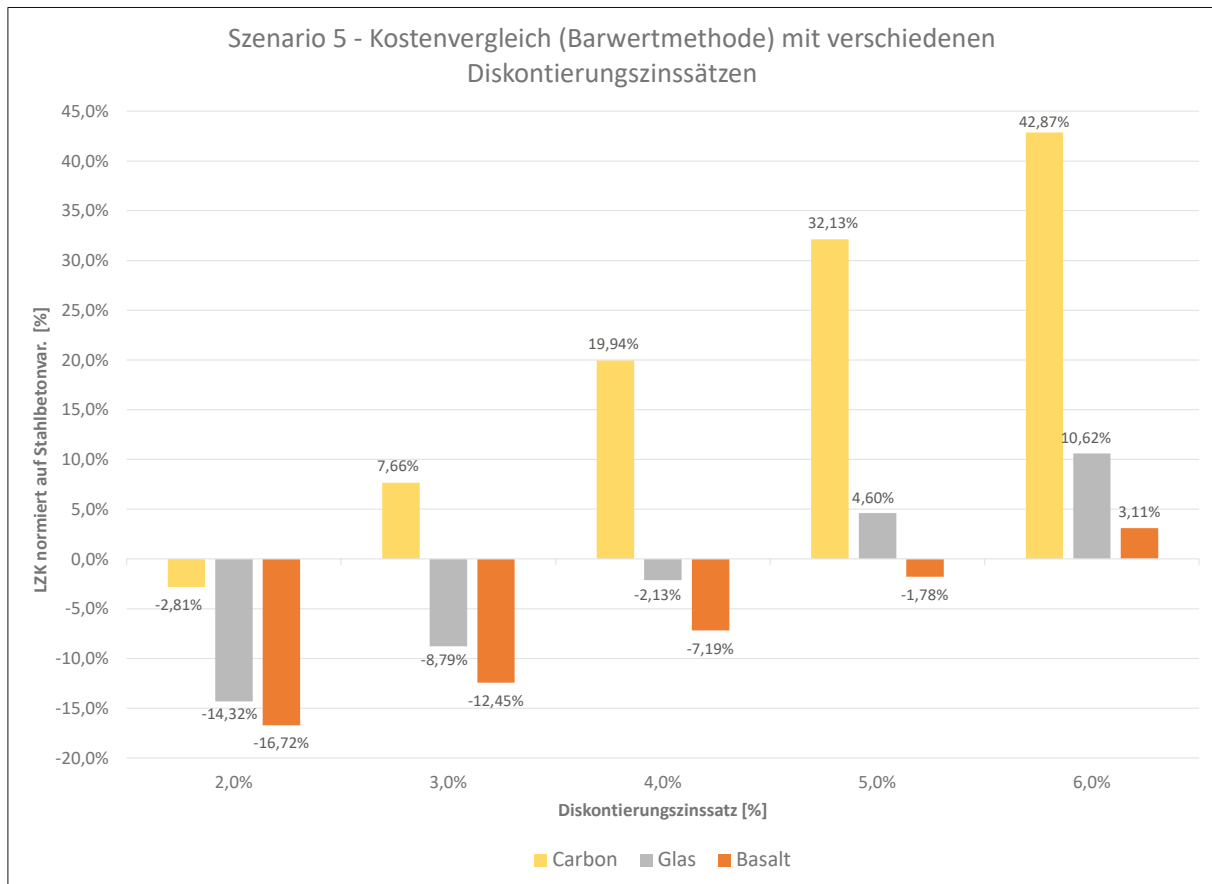


Abb. 4.11: Szenario 5 - Kostenvergleich nach Barwertmethode für verschiedene Diskontierungszinssätze.

Die Variante mit Basaltbewehrung bietet bis auf einen hohen Diskontierungszinssatz von 6% ökonomische Vorteile gegenüber der Stahlbetonvariante. Die Variante mit Glasbewehrung erzielt nur bis zu einem mittleren Zinssatz von 4% Kostenvorteile im Vergleich zur konventionellen Stahlbetonvariante. Weiterhin können die hohen Anschaffungskosten der Carbonbewehrung nur schwer ausgeglichen werden, wodurch nur ein geringer Kostenvorteil bei einem Diskontierungszinssatz von 2% gegenüber der Stahlbetonvariante entsteht.

4.7 Szenario 6 - Erhöhung des JDTV's unter der Brücke um 20.000

In Szenario 6 wird von einem stark befahrenen Hauptverkehrsweg unter der Brücke ausgegangen. Das Verkehrsaufkommen auf der Brücke ändert sich im Vergleich zum Standardszenario in Abschnitt 3.3 nicht. Es wird der jährliche durchschnittliche tägliche Verkehr (JDTV) unter der Brücke von 10.000 auf 30.000 angehoben. Die anderen Parameter bleiben im Vergleich zum Standardszenario unverändert. In Tabelle 4.8 werden die Barwerte aller Varianten des untersuchten Szenarios am Ende des Betrachtungszeitraums gegenübergestellt. Abbildung 4.12 zeigt die Barwerte der untersuchten Varianten über die gesamte Lebensdauer von 100 Jahren.

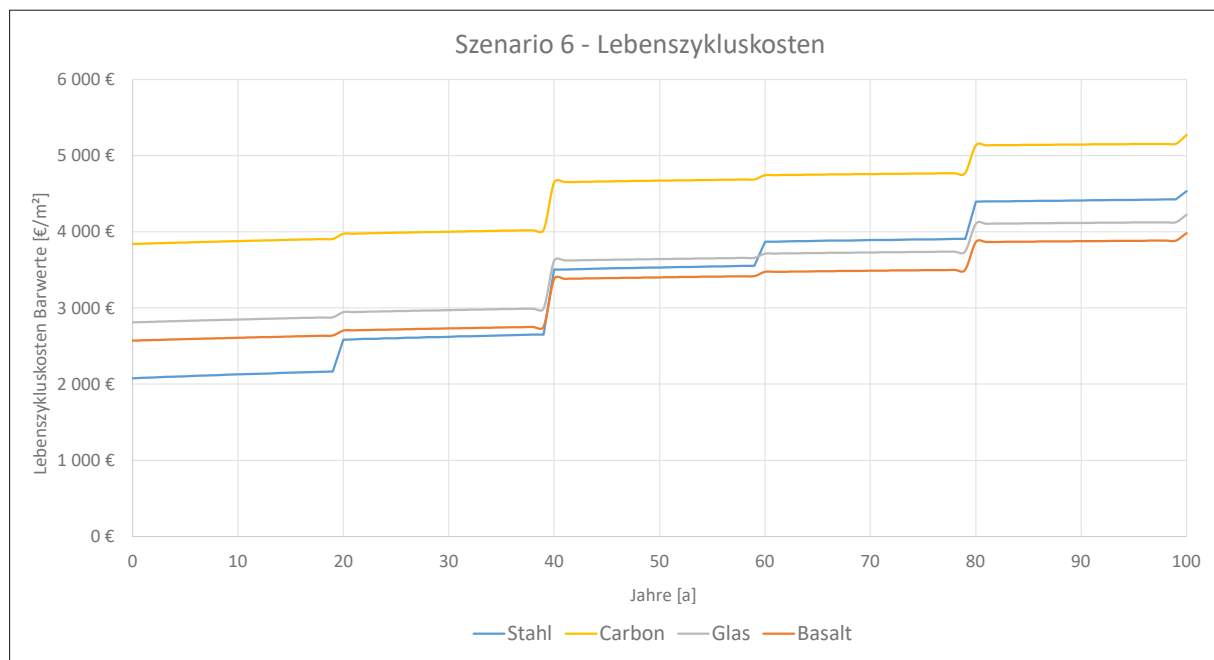


Abb. 4.12: Szenario 6 - Lebenszykluskosten mit der Barwertmethode (Nutzungsdauer 100 Jahre, Preisgleitung 2,5% und Diskontierungszinssatz 4%).

Tab. 4.8: Szenario 6 - Lebenszykluskosten der Brücke mit unterschiedlichen Bewehrungsvarianten mit dem Zinsniveau laut RVS.

Bezeichnung		Stahl	Carbon	Glas	Basalt
		Stab	Stab	Stab	Stab
Barwert der Brücke (ND 100 Jahre)	€/m ²	4534	5270	4223	3983
		100%	116%	93%	88%

In Abbildung 4.12 und Tabelle 4.8 ist ersichtlich, dass die Lebenszykluskosten im Vergleich zu den vorherigen Szenarien 4 und 5 in Abschnitt 4.5 und Abschnitt 4.6 gesunken sind. Die Variante mit Glas- und Basaltbewehrung ergeben bereits bei einem mittleren Diskontierungszinssatz von 4% ökonomische Vorteile von 7 bzw. 12% (siehe Tabelle 4.8). Die Variante Carbonbewehrung erzielt keine Kosteneinsparungen, sondern erzeugt Mehrkosten von 16% (siehe Tabelle 4.8). Aus den Ergebnissen ist deutlich ersichtlich, dass sich eine Erhöhung des Verkehrsaufkommens unter der Brücke stärker auf das ökonomische Einsatzpotenzial von FVK-Bewehrung auswirkt als eine Erhöhung des Verkehrsaufkommens auf dem darüber liegenden Verkehrsweg. In Abbildung 4.13 ist das Ergebnis für eine Variation des Zinssatzes ($z_D = 2$ bis 6%) dargestellt.

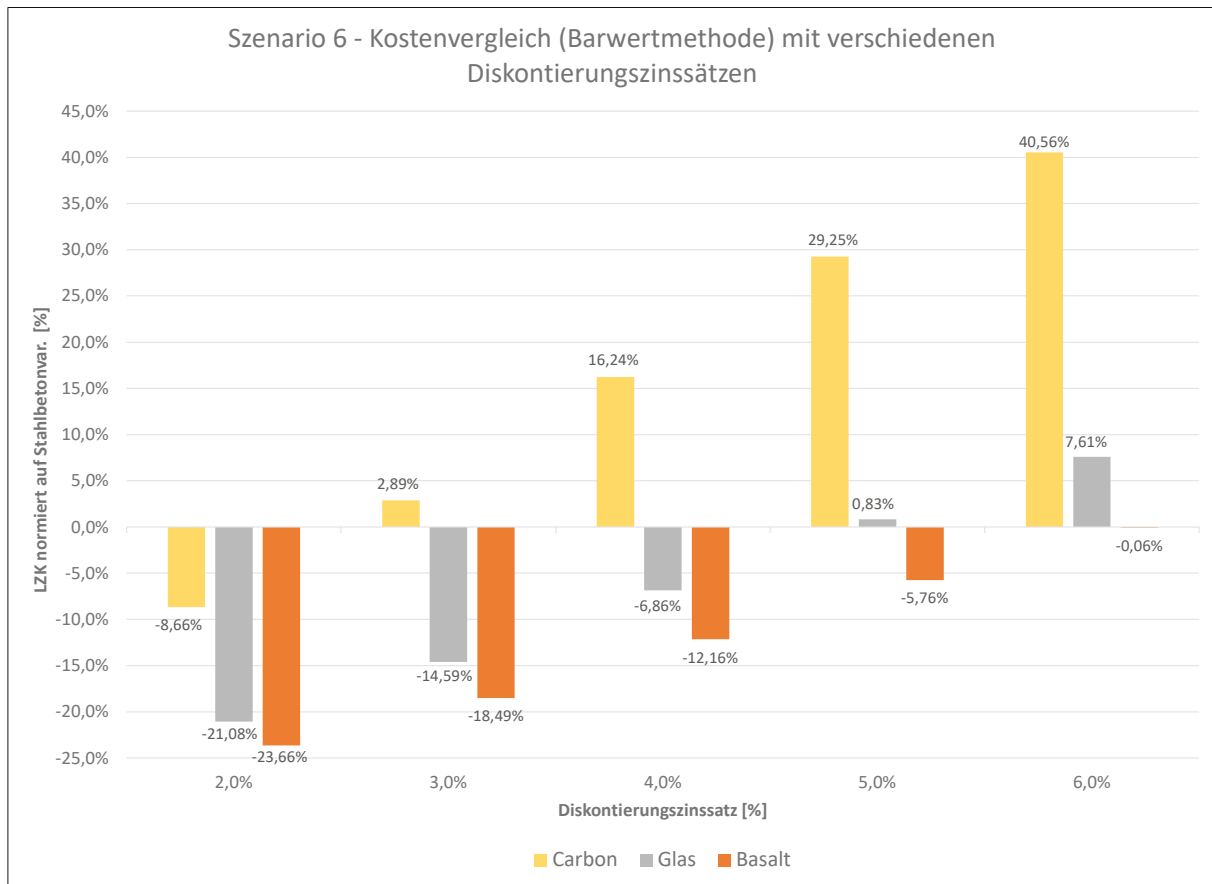


Abb. 4.13: Szenario 6 - Kostenvergleich nach Barwertmethode für verschiedene Diskontierungszinssätze.

Bis zu einem Diskontierungszinssatz von 5% erzielt die Basaltbewehrung ökonomische Vorteile, während bei einem Zinssatz von 6% etwa Kostenparität gegenüber der Stahlbetonvariante besteht. Die Variante mit Glasbewehrung erzielt bis zu einem mittleren Zinssatz von 4% Kostenvorteile im Vergleich zur konventionellen Stahlbetonvariante. Die Variante mit Carbonbewehrung bietet nur bei einem niedrigen Diskontierungszinssatz von 2% ökonomische Vorteile im Vergleich zur Stahlbetonvariante.

Kapitel 5

Zusammenfassung

Im Infrastrukturbau hat insbesondere die chloridinduzierte Korrosion aufgrund der Verwendung von Stahlbewehrung einen großen Einfluss auf die Erhaltungskosten und die Lebensdauer der Bauwerke. Der Einsatz von nichtmetallischer Bewehrung bietet aufgrund der weitaus höheren Korrosionsbeständigkeit vor allem in aggressiver Umgebung, in denen Bauteile chloridhaltigem Wasser (wie Tausalz oder Meerwasser) ausgesetzt sind, große Potentiale. Dies gilt insbesondere für Bauteile, die aufgrund von wechselnden Bedingungen, wie Spritzwasser, Feuchtigkeit und Trockenheit ausgesetzt sind. Faserverstärkte Kunststoffe (FVK) bieten eine vielversprechende Alternative zur Bewältigung der Herausforderung von Korrosionsbeständigkeit und deren damit verbundenen hohen Instandhaltungskosten. Potentielle Einsatzbereiche von faserverstärkten Kunststoffen im Infrastrukturbau haben das Potential Dauerhaftigkeit, Materialeffizienz und Instandhaltung zu verbessern.

5.1 Schlussfolgerung

Bei der Auswahl von Baumaterialien sind für den Auftraggeber ökonomische Vorteile von großer Bedeutung. FVK-Bewehrungen sind in der Anschaffung im Gegensatz zu einer konventionellen Stahlbewehrung deutlich teurer, vor allem die Carbonbewehrung. Jedoch sind nicht nur die Anschaffungskosten, sondern die gesamten Lebenszykluskosten von großer Bedeutung. Falls höhere Anschaffungskosten durch geringere Betriebskosten ausgeglichen werden können, kann dies die höheren Anschaffungskosten rechtfertigen. Die Lebenszykluskosten eines Bauwerks umfassen alle Phasen von der Errichtung bis zum Abbruch des Bauwerks. Des Weiteren können Vor- und Nachteile außerhalb der Systemgrenze geltend gemacht werden. Dies können einerseits Nutzen und Belastungen für die Allgemeinheit sein, die unter Nutzerkosten zusammengefasst werden können, und andererseits das Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs- und Recycling-Potentiale, welches sich positiv auf die Lebenszykluskosten auswirken. Der Nutzen und die Belastung für die Allgemeinheit sind im Zusammenhang mit dem Infrastrukturbau von großer Bedeutung, da die Bauwerke für die Bevölkerung von öffentlichen Auftraggebern (z.B. Bund, Länder) in Österreich errichtet werden. Aus diesem Grund sollten die Nutzerkosten von Bauwerken, die einen großen Einfluss auf die Allgemeinheit haben, immer mit berücksichtigt werden.

Eine Lebenszykluskostenanalyse für eine Autobahnbrücke (15m Spannweite, zweispurig mit Pannestreifen) mit einem durchschnittlichen Verkehrsaufkommen ($JDTV = 20.000$, $JDTV_u = 10.000$) zeigt, dass der Einsatz von nichtmetallischer Bewehrung erheblich höhere Investitionskosten erfordert. Die Mehrkosten variieren je nach Variante zwischen 24 und 85%, wobei die BFVK-Variante die wirtschaftlich attraktivste und die CFVK-Variante die wirtschaftlich unattraktivste ist. Anders als bei den Errichtungskosten können bei den Betriebskosten Kosteneinsparungen von etwa 27% im Vergleich zur konventionellen Stahlbetonvariante erzielt werden. Diese Einsparungen resultieren aus der geringeren Häufigkeit von Schäden an der Betonoberfläche,

wodurch weniger Betoninstandsetzungsarbeiten erforderlich sind. Zwischen den nichtmetallisch bewehrten Varianten gibt es keine Unterschiede der Betriebskosten, da sie sich in keinen Kostenfaktoren unterscheiden. Die Nutzerkosten über die gesamte Lebensdauer unterscheiden sich signifikant. Es können beachtliche ökonomische Vorteile gegenüber der konventionellen Stahlbetonvariante erzielt werden. Die Kosteneinsparungen betragen 36 (Carbon) bis 37% (Glas und Basalt) im Vergleich zur Variante mit Stahlbewehrung. Der einzige Kostenunterschied zwischen den nichtmetallisch bewehrten Varianten sind die Klimakosten, welche nach Bewertung mit CO₂-Zertifikaten hier aber nur eine untergeordnete Rolle bilden, wodurch sie sehr ähnlich ausfallen. Die Entsorgungskosten der Carbonvariante sind um etwa 5% höher als die der konventionellen Stahlbetonvariante. Dies ist der kosten- und energieintensiven Aufbereitung mittels Pyro- oder Solvolyseverfahren geschuldet. Die Varianten mit Glas- und Basaltbewehrung können im Vergleich zur Stahlbetonvariante ökonomische Vorteile erzielen, da der FVK-Beton wiederverwendet (Downcycling) wird und somit der Betonabbruch nicht weiter aufbereitet werden muss. Wenn man nun die gesamten Lebenszykluskosten betrachtet, ist bei dem gewählten Szenario mit einem Diskontierungszinssatz von 4% nur die Variante mit Basaltbewehrung ab einer Lebensdauer von 60 Jahren günstiger. Die Variante mit Glasbewehrung ist im Vergleich zur Stahlbetonvariante um 2% teurer. In diesem Szenario konnte durch die hohen Anschaffungskosten bei der Variante mit Carbonbewehrung kein ökonomisches Potential festgestellt werden.

Im ersten Szenario in Abschnitt 4.2, wo der Randbalken ebenfalls aus FVK-Beton gefertigt wird, konnten bei den Glas- und Basaltbewehrungen ökonomische Vorteile gegenüber dem Randbalken aus Stahlbeton erzielt werden. Die FVK-Variante mit Carbonbewehrung erzielt aufgrund der hohen Anschaffungskosten der Bewehrung keine Kosteneinsparungen im Vergleich zum Randbalken aus Stahlbeton. In weiterer Folge wurden die wichtigsten Parameter mittels einer Sensitivitätsanalyse bestimmt und durch Anpassung dieser Szenarien gebildet. Zu den bedeutendsten Parametern zählen die Zinssätze, das Verkehrsaufkommen und die Geschwindigkeitsreduktion. Aus der Sensitivitätsanalyse geht hervor, dass die Zinssätze den größten Einfluss auf die Lebenszykluskosten haben. Bei einer so langjährigen Betrachtung mit einer Nutzungsdauer von 100 Jahren birgt die Höhe der Zinssätze eine große Unsicherheit. Ein weiteres Ergebnis der Sensitivitätsanalyse ist, dass die Nutzerkosten deutlich von bestimmten Parametern wie dem jährlichen durchschnittlichen täglichen Verkehr (JDTV) auf und unter der Brücke sowie der Geschwindigkeitsdifferenz beeinflusst werden. Diese Parameter werden in verschiedenen Szenarien angepasst. Grundsätzlich kann man sagen, umso höher das Verkehrsaufkommen auf und unter der Brücke ist, umso wirtschaftlicher sind die FVK-Varianten. Bei einem hohen Verkehrsaufkommen entstehen für jede Variante höhere Lebenszykluskosten. Allerdings steigen die Kosten der FVK-Varianten nicht so stark an wie die der Stahlbetonvariante. Dies ist den kürzeren Instandhaltungsmaßnahmen auf und unter der Brücke geschuldet. Eine weitere wichtige Erkenntnis der Sensitivitätsanalyse ist, dass je höher die Geschwindigkeitsdifferenz ist, desto mehr Kosten im Vergleich zur Stahlbetonvariante eingespart werden können. Die untersuchten Szenarien zeigen, dass bei einem hohen Verkehrsaufkommen auf und/oder unter der Brücke nicht nur für die Basaltbewehrung, sondern auch für die Glasfaser erhebliches ökonomisches Potential besteht. Bei einer Erhöhung des JDTV unter der Brücke von 10.000 auf 30.000 kann bei einem mittleren Zinssatz von 4% die Variante mit Glasbewehrung bereits eine Einsparung von 7% im Vergleich zur Stahlbetonvariante erzielen. Die Variante mit Basaltbewehrung erzielt ein noch größeres Einsparungspotential von 12%. Aufgrund der hohen Anschaffungskosten und der generell hohen Lebenszykluskosten zeigt der Einsatz von Carbonbewehrung bei einem mittleren Zinssatz von 4% in keinem Szenario ein ökonomisches Potential gegenüber der Stahlbetonvariante auf.

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass bei Verwendung von nichtmetallischen Bewehrungen mit höheren Errichtungskosten zu rechnen ist. Grundsätzlich besteht ein höheres ökonomisches Potential, je niedriger der Diskontierungszinssatz ist. Dies ist auf die hohen Anschaffungskosten der nichtmetallischen Bewehrung zurückzuführen. Darüber hinaus hängen die Ergebnisse der Lebenszykluskosten sowie das ökonomische Einsparungspotenzial wesentlich von der Verkehrssituation ab. Die Betrachtung der Lebenszykluskosten unter den angenommenen Voraussetzungen¹ zeigte insbesondere bei der Basalt- und Glasbewehrung ein ökonomisches Einsatzpotential. Die hohen Anschaffungskosten sowie die energieintensive Herstellung von Carbonbewehrung bieten aus heutiger Sicht kein ökonomisches, als auch ökologisches Einsatzpotential für die untersuchte kurze Autobahnbrücke.

5.2 Ausblick

Die Ergebnisse dieser Arbeit beziehen sich ausschließlich auf eine Rahmenbrücke mit Rechteckquerschnitt und einer Spannweite von 15 Metern. Es wäre jedoch sinnvoll, auch größere Brücken mit verschiedenen Querschnittsformen zu untersuchen. Um das Einsatzpotential für andere Infrastrukturbauten zu bestimmen, sollten Bauteile unterschiedlicher Größe in Betracht gezogen werden. Ein vielversprechender Ansatz für zukünftige Forschungen könnte darin bestehen, die potentiellen Auswirkungen technologischer Fortschritte auf die Preisentwicklung der Ausgangsmaterialien in Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen zu analysieren. Aus diesem Grund sollte man weiterhin das ökonomische Einsparpotential im Infrastrukturbau beachten und auch im Kontext der Technologieoffenheit stets eine Lösung mit nichtmetallischer Bewehrung in Betracht ziehen.

¹ Autobahn, zweispurig mit Pannestreifen und einer Geschwindigkeitsdifferenz von 50 km/h für folgende Verkehrsaufkommen: $JDTV = 30.000$ und $JDTV_u = 20.000$; $JDTV = 40.000$ und $JDTV_u = 10.000$; $JDTV = 20.000$ und $JDTV_u = 30.000$;

Literatur

- [1] A. Younis, U. Ebead und S. Judd. „Life cycle cost analysis of structural concrete using seawater, recycled concrete aggregate, and GFRP reinforcement“. In: *Construction and Building Materials* 175 (2018), S. 152–160.
- [2] D. Yilmaz und U. Angst. „Korrosionsbedingte Kosten an Ingenieurbauwerken im Schweizer Straßennetz“. In: *Beton-und Stahlbetonbau* 115.6 (2020), S. 448–458.
- [3] A. Schießl-Pecka, U. Willberg, G. Mueller und C. Gehlen. „100 Jahre Dauerhaftigkeit für Brücken-und Tunnelbauwerke“. In: *28. Dresdner Brückenbausymposium: Planung, Bauausführung, Instandsetzung und Ertüchtigung von Brücken Technische Universität Dresden (DEU), Institut für Massivbau*. Dresden, 2018.
- [4] S. Reichenbach, P. Preinstorfer, M. Hammerl und B. Kromoser. „A review on embedded fibre-reinforced polymer reinforcement in structural concrete in Europe“. In: *Construction and Building Materials* 307 (2021), S. 124946.
- [5] A. C. Berg, L. C. Bank, M. G. Oliva und J. S. Russell. „Construction and cost analysis of an FRP reinforced concrete bridge deck“. In: *Construction and Building Materials* 20 (2005), S. 515–526.
- [6] B. Kromoser, S. Reichenbach, N. Stoiber, P. Preinstorfer und T. Huber. *Potentiale von nichtmetallischer Bewehrung im Infrastruktur-Betonbau NIMETBEW*. Forschungsber. Verkehrsinfrastrukturforschung, 2022. 201 S.
- [7] *ÖNORM EN 1992-1-1: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Wien: Austrian Standards Institute, 2015.
- [8] S. Nolan, M. Rossini, C. Knight und A. Nanni. „New directions for reinforced concrete coastal structures“. In: *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience* 2.1 (2021), S. 1–12.
- [9] A. F. Al-Khafaji, R. T. Haluza, V. Benzecry, J. J. Myers, C. E. Bakis und A. Nanni. „Durability assessment of 15-to 20-year-old GFRP bars extracted from bridges in the US. II: GFRP bar assessment“. In: *Journal of composites for construction* 25.2 (2021), S. 04021008.
- [10] A. Apitz, F. Jesse und M. Schlaich. „Nachhaltige Brücken aus vorgespanntem Carbonbeton“. In: *31. Dresdner Brückenbausymposium: Planung, Bauausführung, Instandsetzung und Ertüchtigung von Brücken - Technische Universität Dresden (DEU), Institut für Massivbau*. Dresden, 2021.
- [11] *DAfStb-Richtlinie: Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung - Entwurf*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin, Deutschland, Nov. 2022.
- [12] W. Seifert und M. Lieboldt. „Ressourcenverbrauch im globalen Stahlbetonbau und Potenziale der Carbonbetonbauweise: Globale Herausforderungen des Bauwesens“. In: *Beton-und Stahlbetonbau* 115.6 (2020), S. 469–478.
- [13] M. Barisic. „Untersuchungen zum Einsatz von nichtmetallischen Bewehrungen im Infrastrukturbau“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2021.

- [14] *ÖNORM EN 1992-1-1: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Allgemeine Regeln und Regeln für Hochbauten, Brücken und Ingenieurbauwerke*. Wien: Austrian Standards Institute, 2023.
- [15] P. Preinstorfer, S. Reichenbach, T. Huber und B. Kromoser. „Potential fields of application for CFRP reinforcement in concrete infrastructure engineering: Material availability, application areas and static parametric study with consideration of the GWP“. In: *Proceedings of the Concrete Structures: New Trends for Eco-Efficiency and Performance, Lisbon, Portugal* (2021), S. 14–16.
- [16] T. Huber, P. Preinstorfer, P. Grasl, M. Kleiser und B. Kromoser. „Lebenszykluskostenanalysen von Straßenbrücken mit nichtmetallischer Bewehrung“. In: (2024), eingereicht.
- [17] *RVS 02.01.22 - Nutzen - Kosten - Untersuchungen im Verkehrswesen*. Wien: FSV, Okt. 2010.
- [18] A. Nanni, A. De Luca und H. J. Zadeh. *Reinforced concrete with FRP bars: Mechanics and design*. Miami: CRC press, 2014. ISBN: 978-0-203-87429-5.
- [19] F. Micelli und A. Nanni. „Durability of FRP rods for concrete structures“. In: *Construction and Building materials* 18.7 (2004), S. 491–503.
- [20] A. Schumann, M. May und M. Curbach. „Carbonstäbe im Bauwesen: Teil 1: Grundlegende Materialcharakteristiken“. In: *Beton-und Stahlbetonbau* 113.12 (2018), S. 868–876.
- [21] S. L. Burtscher. „Faserverbundwerkstoffe“. In: *Betonbau 3 Vorlesung* (2013), S. 6.
- [22] M. Curbach und F. Jesse. „Eigenschaften und Anwendung von Textilbeton“. In: *Beton-und Stahlbetonbau* 104.1 (2009), S. 9–16.
- [23] Fédération Internationale du Béton (fib). „FRP reinforcement in RC structures“. In: *fib Bulletin* 40 (2007).
- [24] M. Kirsten, C. Freudenberg und C. Cherif. „Carbonfasern, der Werkstoff des 21. Jahrhunderts: Textile Ausgangsbasis für filigrane, hochtragende Betonbauteile“. In: *Beton-und Stahlbetonbau* 110.S1 (2015), S. 8–15.
- [25] B. Kromoser, M. Butler, M. Hunger, M. Kimm, F. Kopf, V. Mechtcherine, N. Pressmair und M. Traverso. „Article of RILEM TC 292-MCC: life cycle assessment (LCA) of non-metallic reinforcement for reinforcing concrete: manufacturing, durability, dismantling, recycling and reuse: a review“. In: *Materials and Structures* 56.7 (2023), S. 126.
- [26] J. Hegger, M. Curbach, F. Schladitz, M. Tietze und M. Lieboldt. *Handbuch Carbonbeton - Einsatz nichtmetallischer Bewehrung*. Berlin: John Wiley & Sons, 2023. ISBN: 978-3-433-03206-0.
- [27] P. Purnell, N. R. Short, C. L. Page und A. J. Majumdar. „Microstructural observations in new matrix glass fibre reinforced cement“. In: *Cement and concrete research* 30.11 (2000), S. 1747–1753.
- [28] E. Monaldo, F. Nerilli und G. Vairo. „Basalt-based fiber-reinforced materials and structural applications in civil engineering“. In: *Composite Structures* 214 (2019), S. 246–263.
- [29] J. Sim, C. Park et al. „Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures“. In: *Composites Part B: Engineering* 36.6-7 (2005), S. 504–512.
- [30] T. Büttner, A. Keil und M. Raupach. „Improvement of the load-bearing capacity and durability of textile-reinforced concrete due to the use of polymers“. In: *15th Congress of the Glassfibre Reinforced Concrete Association International, Prague, Czech Republic*. 2008, S. 20–23.

- [31] *CSA-S806-12: Design an construction of building structures with fibre-reinforced polymers*. Canada: Canadian Standards Association, 2017.
- [32] T. Helbig, K. Unterer, C. Kulas, S. Rempel und J. Hegger. „Fuß- und Radwegbrücke aus Carbonbeton in Albstadt-Ebingen: Die weltweit erste ausschließlich carbonfaserbewehrte Betonbrücke“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 111.10 (2016), S. 676–685.
- [33] M. Raupach und C. M. Cruz. „Loadbearing and self-supporting new building structures with prefabricated textile-reinforced concrete“. In: *Textile Fibre Composites in Civil Engineering* (2016), S. 275.
- [34] T. Cadenazzi, G. Dotelli, M. Rossini, S. Nolan, A. Nanni et al. „Life-cycle cost and life-cycle assessment analysis at the design stage of a fiber-reinforced polymer-reinforced concrete bridge in Florida“. In: *Advances in Civil Engineering Materials* 8.2 (2019), S. 128–151.
- [35] P. Preinstorfer, S. Yanik, J. Kirnbauer, J. M. Lees und A. Robisson. „Cracking behaviour of textile-reinforced concrete with varying concrete cover and textile surface finish“. In: *Composite Structures* 312 (2023).
- [36] F. Ceroni, E. Cosenza, M. Gaetano und M. Pecce. „Durability issues of FRP rebars in reinforced concrete members“. In: *Cement and concrete composites* 28.10 (2006), S. 857–868.
- [37] G. Wu, X. Wang, Z. Wu, Z. Dong und Q. Xie. „Degradation of basalt FRP bars in alkaline environment“. In: *Science and Engineering of Composite Materials* 22.6 (2015), S. 649–657.
- [38] A. Spelter, S. Bergmann, J. Bielak und J. Hegger. „Long-term durability of carbon-reinforced concrete: An overview and experimental investigations“. In: *Applied Sciences* 9.8 (2019), S. 1651.
- [39] A. Machida. „State-of-the-art report on continuous fiber reinforcing materials“. In: *Second Research Committee on CFRM, Japan Society of Civil Engineers: Concrete Engineering Series* 3 (1993).
- [40] R. J. Hamad, M. M. Johari und R. H. Haddad. „Mechanical properties and bond characteristics of different fiber reinforced polymer rebars at elevated temperatures“. In: *Construction and building materials* 142 (2017), S. 521–535.
- [41] *ASTRA 82023: Dokumentation Basaltfaser-Bewehrung - Sachstandsbericht*. Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern, Schweiz, 2023.
- [42] G. L. Balázs und A. Borosnyói. „Long-term behavior of FRP“. In: *Composites in Construction: A Reality*. 2001, S. 84–91.
- [43] L. C. Bank, T. R. Gentry, B. P. Thompson und J. S. Russell. „A model specification for FRP composites for civil engineering structures“. In: *Construction and building materials* 17.6-7 (2003), S. 405–437.
- [44] J. Michels, R. Widmann, C. Czaderski, R. Allahvirdizadeh und M. Motavalli. „Glass transition evaluation of commercially available epoxy resins used for civil engineering applications“. In: *Composites Part B: Engineering* 77 (2015), S. 484–493.
- [45] P. L. Nguyen, X. H. Vu und E. Ferrier. „Characterization of pultruded carbon fibre reinforced polymer (P-CFRP) under two elevated temperature-mechanical load cases: Residual and thermo-mechanical regimes“. In: *Construction and Building Materials* 165 (2018), S. 395–412.

- [46] A. Younes, A. Seidel, T. Engler, C. Cherif und D. Ehlig. „Mechanical behaviour of carbon and glass filament yarns under high temperatures for composite applications“. In: *Journal of The Textile Institute* 104.3 (2013), S. 251–259.
- [47] M. Leone, S. Matthys und M. A. Aiello. „Effect of elevated service temperature on bond between FRP EBR systems and concrete“. In: *Composites Part B: Engineering* 40.1 (2009), S. 85–93.
- [48] P. Kapsalis, M. El Kadi, J. Vervloet, M. De Munck, J. Wastiels, T. Triantafillou und T. Tysmans. „Thermomechanical behavior of textile reinforced cementitious composites subjected to fire“. In: *Applied Sciences* 9.4 (2019), S. 747.
- [49] E. Nigro, G. Cefarelli, A. Bilotta, G. Manfredi und E. Cosenza. „Fire resistance of concrete slabs reinforced with FRP bars. Part I: Experimental investigations on the mechanical behavior“. In: *Composites Part B: Engineering* 42.6 (2011), S. 1739–1750.
- [50] H. Mazaheripour, J. A. Barros, F. Soltanzadeh und J. Sena-Cruz. „Deflection and cracking behavior of SFRSCC beams reinforced with hybrid prestressed GFRP and steel reinforcements“. In: *Engineering Structures* 125 (2016), S. 546–565.
- [51] A. Jain, M. Hack, I. Verpoest, S. Lomov, W. Van Paeppegem und J. Seyfarth. „Betriebsfestigkeitsbewertung von Faserverbundwerkstoffen“. In: (2012), S. 1–16.
- [52] J. Hegger, C. Kulas, M. Raupach und T. Büttner. „Tragverhalten und Dauerhaftigkeit einer schlanken Textilbetonbrücke: Eine 97 m lange Fußgängerbrücke mit einer Bewehrung aus AR-Glasfilamenten“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 106.2 (2011), S. 72–80.
- [53] *Technische Information für allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-1.6-238 - Schöck Combar*. Baden-Baden: Schöck Bauteile GmbH, 2019.
- [54] *ACI-440.1R-15: Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars*. American Concrete Institute, Michigan, United States, März 2015.
- [55] *AASHTO LRFD Bridge: Design Guide Specifications for GFRP-Reinforced Concrete*. American Association of State Highway und Transportation Officials, Washington DC, 2018.
- [56] *CNR-DT 203: Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars*. CNR Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, Rom, Italien, 2006.
- [57] *JSCE: Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing material*. Japan Society of Civil Engineers, Research Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials, 1997.
- [58] *ISO-10406-1: Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete — Test methods — Part 1: FRP bars and grids*. Switzerland, 2015.
- [59] A. R. Emparanza, R. Kampmann und F. De Caso y Basalo. „State-of-the-practice of global manufacturing of FRP rebar and specifications“. In: *ACI Fall Conv* 327 (2017), S. 45–1.
- [60] O. Steinbock, T. Bösche und A. Schumann. „Carbonbeton—eine neue Verstärkungsmethode für Massivbrücken: Teil 2: Carbonbeton im Brückenbau und Informationen zur Zustimmung im Einzelfall für das Pilotprojekt Brücken über die Nidda im Zuge der BAB A 648“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 116.2 (2021), S. 109–117.

- [61] L. Krug. „Untersuchungen zum Einsatzpotential nichtmetallischer Bewehrungen im Betonbau“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2020.
- [62] *CSA S6:19: Canadian Highway Bridge Design Code*. Canada: Canadian Standards Association, 2019.
- [63] *ÖNORM EN 1992-1-1: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Allgemeine Regeln und Regeln für Hochbauten, Brücken und Ingenieurbauwerke*. Europäisches Komitee für Normung, 2015.
- [64] P. Preinstorfer, T. Huber, S. Reichenbach, J. M. Lees und B. Kromoser. „Parametric design studies of mass-related global warming potential and construction costs of FRP-reinforced concrete infrastructure“. In: *Polymers* 14.12 (2022), S. 2383.
- [65] solidian. *solidian-REBAR-Dxx-CCE_Ccarbon – Technische – Produktdatenblätter – v2303*. Datenblatt. Deutschland. 2023.
- [66] Deutsche Basalt Faser GmbH. *Technisches Datenblatt Basalt Rebar*. Datenblatt. Deutschland. 2023.
- [67] N. Stoiber, M. Hammerl und B. Kromoser. „Cradle-to-gate life cycle assessment of CFRP reinforcement for concrete structures: Calculation basis and exemplary application“. In: *Journal of Cleaner Production* 280 (2021), S. 124300.
- [68] *ÖNORM EN 15804: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*. Wien: Austrian Standards, 2020.
- [69] B. Kromoser. „Ressourceneffizientes Bauen mit Betonfertigteilen Material-Struktur-Herstellung“. In: *Beton Kalender 2021: Fertigteile Integrale Bauwerke* (2021), S. 305–356.
- [70] J. Goerlitz. „Literatur- u. Machbarkeitsstudie zum Recycling nichtmetallisch bewehrter Betonbauteile“. Diplomarbeit. Universität für Bodenkultur Wien, 2022.
- [71] *Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle*. Europäisches Parlament, 2018.
- [72] Land Steiermark. *Landesabfallwirtschaftsplan Steiermark*. 2019. URL: <https://www.abfallwirtschaft.steiermark.at/cms/beitrag/10177492/136114083> (Zugriff am 12.10.2023).
- [73] *Recycling Baustoffverordnung*. Jan. 2016.
- [74] *Leitfaden zum richtigen Umgang mit Baurestmassen auf Baustellen - Broschüre Baurestmassen*. Wirtschaftskammer Österreich, 2018.
- [75] Fachverband Mineralikverwertung und Recycling. *Österreich beschließt Deponieverbot für Beton, Asphalt und Straßenaufbruch*. 2021. URL: <https://www.bvse.de/gut-informiert-mineralik/nachrichten-mineralik/7081-oesterreich-beschliesst-deponieverbot-fuer-beton-asphalt-und-strassenaufbruch.html> (Zugriff am 12.10.2023).
- [76] *ÖNORM B 4710-1:2018 01 01: Beton — Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität - Teil 1: Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206 für Normal- und Schwerkton*. Wien: Austrian Standards, Jan. 2018.
- [77] *ÖNORM EN 12620:2014 02 15: Gesteinskörnungen für Beton*. Wien: Austrian Standards, Feb. 2014.
- [78] *Leitfaden zum Einsatz von R-Beton*. Baden-Württemberg, Sep. 2017.

- [79] *DIN-EN-206-1:2001: Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206-1:2000*. Juli 2001.
- [80] *DIN-1045-2:2008: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1*. Aug. 2008.
- [81] *Badische Stahlwerke: EPD Betonstahl zur Bewehrung von Beton*. ift Rosenheim, Juni 2013.
- [82] *ÖNORM B 4707:2017 06 01: Bewehrungsstahl - Anforderungen, Klassifizierung und Prüfung*. Wien: Austrian Standards, Juni 2017.
- [83] *DIN EN 15804: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2021.
- [84] T. Cadenazzi, G. Dotelli, M. Rossini, S. Nolan, A. Nanni et al. „Life-cycle cost and life-cycle assessment analysis at the design stage of a fiber-reinforced polymer-reinforced concrete bridge in Florida“. In: *Advances in Civil Engineering Materials* 8.2 (2019), S. 128–151.
- [85] L. Shen, M. Soliman und S. A. Ahmed. „A probabilistic framework for life-cycle cost analysis of bridge decks constructed with different reinforcement alternatives“. In: *Engineering Structures* 245 (2021), S. 112879.
- [86] *Lebenszyklusermittlung für Brücken*. Wien: FSV, Apr. 2017.
- [87] J. E. Bakaba, M. Enke, A. Heine, C. Lippold, R. Maier, J. Ortlepp und R. Schulz. *Untersuchung der Verkehrssicherheit im Bereich von Baustellen auf Bundesautobahnen*. Forschungsber. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft, 2012. 63 S.
- [88] D. Lewandrowski und N. Pauly. *Auktionierung (EU-ETS) Deutsche Versteigerungen von Emissionsberechtigungen*. 2023.
- [89] solidian. *solidian Preisliste 2023: Bewehrungen*. Preisliste. Deutschland. 2023.
- [90] J. Otto und R. Adam. „Carbonbeton und Stahlbeton im wirtschaftlichen Vergleich“. In: *Bauingenieur* 94.6 (2019).
- [91] T. Cadenazzi, S. Nolan, G. Mazzocchi, Z. Stringer und A. Nanni. „Bridge case study: what a contractor needs to know on an FRP reinforcement project“. In: *Journal of Composites for Construction* 24.2 (2020), S. 05020001.
- [92] J. Brown. „Glass fibre reinforced polymer bars in concrete compression members“. In: (2015).
- [93] J. Kortmann. *Verfahrenstechnische Untersuchungen zur Recyclingfähigkeit von Carbonbeton*. Springer, 2020.
- [94] V. Horstmann. „Vergleichende Untersuchungen zur mechanischen Aufbereitung von Carbonbeton“. Diplomarbeit. Bauhaus Universität Weimar, 2018.
- [95] M. Kimm, N. Gerstein, P. Schmitz, M. Simons und T. Gries. „On the separation and recycling behaviour of textile reinforced concrete: An experimental study“. In: *Materials and Structures* 51 (2018), S. 1–13.
- [96] C. Neubauer. „Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich Statusbericht 2023 für das Referenzjahr 2021“. In: *Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie: Abteilung 3* (2020).
- [97] C. Neunzig. „Greencrete - Nachhaltigkeitsaspekte bei der Produktion und Anwendung von dünnwandigen Fassaden aus Textilbeton“. In: 55. Aachener Baustofftag (26. März 2019). Aachen, 2019.

- [98] Rieder Sales GmbH. *EPD-RSE-20180069-IAD1-DE Glaserfaserbeton concrete Skin and öko Skin*. 2018. URL: https://www.rieder.cc/wp-content/uploads/2017/07/EPD_RSE_2012111_D.pdf (Zugriff am 27. 09. 2023).
- [99] *Rahmenbrückennormale*. Wien: FSV, Juli 2019.
- [100] solidian. *solidian-GRID-Qxx-CCE-xx-Technische-Produktdatenblätter-v2302*. Datenblatt. Deutschland. 2023.
- [101] *ÖNORM EN 1991-2: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken*. Wien: Austrian Standards Institute, 2021.
- [102] *ÖNORM EN 1990: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung*. Wien: Austrian Standards Institute, 2013.
- [103] *EN 1991-2: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken*. Europäisches Komitee für Normung, 2021.
- [104] *ÖNORM EN 1991-1-1: ÖNORM B 1991-1-1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen - Wichten, Eigengewicht, Nutzlasten im Hochbau*. Wien: Austrian Standards Institute, Jan. 2020.
- [105] *Asfinag Regelpläne-Brücke - Planunterlagen zur Technischen Richtlinie 800.300.1500*. Wien, Aug. 2011.
- [106] F. G. Nabil, E. A. Jensen, C. D. Eamon und X. Shi. „Life-Cycle Cost Analysis of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Reinforced Concrete Bridges“. In: *ACI Structural Journal* 109 (2012), S. 8.
- [107] K. Lemke, M. Derbort, G. Deußen, C. Höfgen, C. Mueller, S. Piszczek, M. Rose, R. Schult und R. Wasmaier. „Leitfaden zum Arbeitsstellenmanagement auf Bundesautobahnen“. In: *Bauzeitenkatalog* (2011).
- [108] *Straßen mit getrennten Richtungsfahrbahnen*. Wien: FSV, Mai 2012.
- [109] N. Sedlacek, I. Steinacher, R. Neustifter und M. Donaubauer. „Unfallkostenrechnung Straße 2022“. In: *BMK* (2022).
- [110] M. Car. „Ausgewählte Baustoff-Recycling Annahme-/Abgabepreise“. In: *Österreichischen Baustoff-Recycling Verband (BRV)* (2018).
- [111] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall. „Entsorgung faserhaltiger Abfälle - Abschlussbericht“. In: *LAGA* (2019).
- [112] *ÖNORM EN B 1991-2: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken*. Europäisches Komitee für Normung, 2021.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Anzutreffende Kombinationen aus Faser- und Matrixmaterial und deren Produktgruppen von Herstellern in Europa, entnommen aus [4].	15
2.2	Beispiele von Bewehrungsstäben mit unterschiedlicher Oberflächenbehandlung. (a) CFVK-Stab gerillt, (b) CFVK-Stab mit gedrehtem Carbon-Roving umwickelt, (c) CFVK-Stab mit flachem Carbon-Roving umwickelt, (d) GFVK-Stab mit gedrehtem Basalt-Roving umwickelt, (e) GFVK-Stab besandet, (f) BFVK-Stab besandet, (g) BFVK-Stab mit Faden umwickelt, (h) BFVK-Stab mit Faden umwickelt, entnommen aus [4].	17
2.3	Beispiele von zwei- und dreidimensionalen Bewehrungen - Textilien. (a) 2D-CFVK-Textil gestrickt, (b) 2D-CFVK-Textil gestrickt, (c) 2D-CFVK-Textil gestrickt, (d) zwei verschiedene 2D-Textilien aus BFVK-Stäben zusammengesetzt, (e) 2D-GFVK-Textil gestrickt, (f) 3D-GFVK/CFVK-Textil gestrickt, (g) 3D-GFVK-Textil gestrickt, (h) 2D-GFVK-Textil gewebt, entnommen aus [4].	18
2.4	Fuß- und Radwegbrücke aus Carbonbeton in Albstadt-Ebingen, entnommen aus [32].	19
2.5	Fußgängerbrücke in Albstadt-Lautlingen, entnommen aus [33].	20
2.6	Luftbild der Halls River Bridge, entnommen aus [34].	20
2.7	Spannungs-Dehnungsbeziehung von unterschiedlichen Textilien Zugfestigkeit in Relation zum Elastizitätsmodul für verschiedene FVK-Bewehrungen in Abhängigkeit des Faser- und Matrixmaterials, der Herstellmethode und der Querschnittsgröße, entnommen aus [4, 35].	21
2.8	Abnahme der Zugfestigkeit einer CFVK-Bewehrung (Stab) über eine Lebensdauer von 150 Jahren.	24
2.9	Abnahme der Zugfestigkeit einer CFVK-Bewehrung (Gewebe) über eine Lebensdauer von 150 Jahren.	24
2.10	Abnahme der Zugfestigkeit einer GFVK-Bewehrung (Stab) über eine Lebensdauer von 150 Jahren.	25
2.11	Abnahme der Zugfestigkeit einer BFVK-Bewehrung (Stab) über eine Lebensdauer von 150 Jahren.	25
2.12	Nachweise einer basaltbewehrten Flügelmauer und Darstellung des damit verknüpften Treibhauspotential (GWP) und den damit verbundenen Kosten (MK), Ökologie (links) und Ökonomie (rechts).	31
2.13	Schematische Darstellung des Recyclingprozesses für BFVK-, GFVK- und CFVK-bewehrte Betonbauteile, Kennzeichnung der zwei Recyclingszenarien wie auch der unterschiedlichen Prozessschritte für das Recycling von Betonbauteilen mit nicht-metallischer Bewehrung und die mögliche Verwertung der aufbereiteten Produkte, entnommen aus [6].	34
2.14	Darstellung von Lebenszyklusphasen für die Nachhaltigkeitsbewertung von Bauwerken, in Anlehnung an [83].	36
2.15	Schema LZK-Grundmodell (theoretische Nutzungsdauer von 100 Jahren, entnommen aus [86].	39

2.16	Verteilung der Schadensursachen an Betonoberflächen von Brückenbauwerken im deutschen Autobahnnetz, in Anlehnung an [3].	45
3.1	Längsschnitt und Querschnitt der untersuchten Rahmenbrücke, in Anlehnung an [6].	47
3.2	Berechnungsergebnisse der Bauteilabmessungen einer Rahmenbrücke in Stahlbetonbauweise gemäß RVS 15.02.31, in Anlehnung an [99].	47
3.3	Nachweise der stahlbewehrten Variante der Fahrbahnplatte, sowie die Darstellung der damit verknüpften Kosten, LK1 (links) und LK2 (rechts).	50
3.4	Nachweise der CFVK-bewehrten Variante der Fahrbahnplatte, sowie die Darstellung der damit verknüpften Kosten, LK1 (links) und LK2 (rechts).	50
3.5	Nachweise der GFVK-bewehrten Variante der Fahrbahnplatte, sowie die Darstellung der damit verknüpften Kosten, LK1 (links) und LK2 (rechts).	51
3.6	Nachweise der BFVK-bewehrten Variante der Fahrbahnplatte, sowie die Darstellung der damit verknüpften Kosten, LK1 (links) und LK2 (rechts).	51
3.7	Nachweise der stahl- und carbonbewehrten Variante der Flügelmauern und Darstellung der damit verknüpften Kosten, Stahl (links) und Carbon (rechts).	53
3.8	Nachweise der glas- und basaltbewehrten Variante der Flügelmauern und Darstellung der damit verknüpften Kosten, Glas (links) und Basalt (rechts).	54
3.9	Massenermittlung für die Errichtung (Modul E1) und zugrunde gelegte Alterungsmodelle für die Lebenszykluskostenanalyse.	61
3.10	Massenermittlung für die Betriebsphase (Modul B1) für die Lebenszykluskostenanalyse.	61
3.11	Lebenszykluskosten mit der Barwertmethode (Nutzungsdauer 100 Jahre, Preisgleitung 2,5% und Diskontierungssatz 4%).	66
3.12	Kostenvergleich nach Barwertmethode für verschiedene Diskontierungszinssätze.	67
4.1	Verteilung der Lebenszykluskosten (Realwerte) der untersuchten Varianten ($JDTV = 20.000$, $JDTV_u = 10.000$).	68
4.2	Szenario 1 - Lebenszykluskosten mit der Barwertmethode (Nutzungsdauer 100 Jahre, Preisgleitung 2,5% und Diskontierungszinssatz 4%).	72
4.3	Szenario 1 - Kostenvergleich nach Barwertmethode für verschiedene Diskontierungszinssätze.	74
4.4	Szenario 2 - Lebenszykluskosten mit der Barwertmethode (Nutzungsdauer 100 Jahre, Preisgleitung 2,5% und Diskontierungszinssatz 4%).	75
4.5	Szenario 2 - Kostenvergleich nach Barwertmethode für verschiedene Diskontierungszinssätze.	76
4.6	Szenario 3 - Lebenszykluskosten mit der Barwertmethode (Nutzungsdauer 100 Jahre, Preisgleitung 2,5% und Diskontierungszinssatz 4%).	77
4.7	Szenario 3 - Kostenvergleich nach Barwertmethode für verschiedene Diskontierungszinssätze.	78
4.8	Szenario 4 - Lebenszykluskosten mit der Barwertmethode (Nutzungsdauer 100 Jahre, Preisgleitung 2,5% und Diskontierungszinssatz 4%).	79
4.9	Szenario 4 - Kostenvergleich nach Barwertmethode für verschiedene Diskontierungszinssätze.	80
4.10	Szenario 5 - Lebenszykluskosten mit der Barwertmethode (Nutzungsdauer 100 Jahre, Preisgleitung 2,5% und Diskontierungszinssatz 4%).	81
4.11	Szenario 5 - Kostenvergleich nach Barwertmethode für verschiedene Diskontierungszinssätze.	82

4.12 Szenario 6 - Lebenszykluskosten mit der Barwertmethode (Nutzungsdauer 100 Jahre, Preisgleitung 2,5% und Diskontierungszinssatz 4%).	83
4.13 Szenario 6 - Kostenvergleich nach Barwertmethode für verschiedene Diskontierungszinssätze.	84
A.1 Statische System der Rahmenbrücke mit Lastansätze, in Anlehnung an [13]. . . .	100

Tabellenverzeichnis

2.1	Mechanische Eigenschaften der für die Herstellung von Bewehrungen hauptsächlich verwendete Fasermaterialien (zusammengefasst von [4, 23])	15
2.2	Übersicht der Regelwerke zu Design und Bemessung von FVK-bewehrten Betonbauteilen, in Anlehnung an [61]	27
2.3	Vergleich der Langzeitzugfestigkeit und Bemessungswert der Zugfestigkeit	29
2.4	Ökologische Kennzahlen für den Herstellungsprozess (A1-A3) verschiedener Bewehrungsmaterialien in Stabform pro kg Baustoff	32
2.5	Preistabelle für verschiedene Bewehrungstypen, gemäß Angaben verschiedener Hersteller per E-Mail und Preislisten [6, 89].	43
3.1	Materialkennwerte für verschiedene nichtmetallische Bewehrungen und Vergleich zur Stahlbewehrung	48
3.2	Materialeigenschaften der Betone	49
3.3	Festlegungen für die Fahrbahnplatte und die Stirnwände.	50
3.4	Auswertung Parameterstudie für ein Kostenoptimum - Fahrbahnplatte und die Stirnwände.	52
3.5	Festlegungen für die Flügelmauern.	53
3.6	Auswertung Parameterstudie für ein Kostenoptimum - Flügelmauern.	55
3.7	Auswertung des Randbalkens.	55
3.8	Einheitspreise für bewehrten Beton für unterschiedliche Bewehrungen.	57
3.9	Erhaltungskosten für eine Straßenbrücke (Stahlbetonrahmen, 15 m Spannweite, 100 Jahre Nutzungsdauer) beim Einsatz von Stahlbewehrung (nach [86]) und FVK-Bewehrung.	58
3.10	Erhaltungsszenarien und Verkehr zur Berechnung der Nutzerkosten.	59
3.11	Entsorgungskosten für Rahmenbrücken mit unterschiedliche Bewehrungen.	60
3.12	Errichtungskosten der Brücke mit unterschiedlichen Bewehrungsvarianten (Realwerte).	62
3.13	Betriebskosten der Brücke mit unterschiedlichen Bewehrungsvarianten (Realwerte).	63
3.14	Nutzerkosten der Brücke mit unterschiedlichen Bewehrungsvarianten (Realwerte).	64
3.15	Entsorgungskosten der Brücke mit unterschiedlichen Bewehrungsvarianten (Realwerte).	65
3.16	Lebenszykluskosten der Brücke mit unterschiedlichen Bewehrungsvarianten mit dem Zinsniveau laut RVS.	66
4.1	Ausgewählte Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der Nutzerkosten.	70
4.2	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der Nutzerkosten.	71
4.3	Szenario 1 - Lebenszykluskosten der Brücke mit unterschiedlichen Bewehrungsvarianten mit dem Zinsniveau laut RVS.	73
4.4	Szenario 2 - Lebenszykluskosten der Brücke mit unterschiedlichen Bewehrungsvarianten mit dem Zinsniveau laut RVS.	75

4.5	Szenario 3 - Lebenszykluskosten der Brücke mit unterschiedlichen Bewehrungsvarianten mit dem Zinsniveau laut RVS.	77
4.6	Szenario 4 - Lebenszykluskosten der Brücke mit unterschiedlichen Bewehrungsvarianten mit dem Zinsniveau laut RVS.	79
4.7	Szenario 5 - Lebenszykluskosten der Brücke mit unterschiedlichen Bewehrungsvarianten mit dem Zinsniveau laut RVS.	81
4.8	Szenario 6 - Lebenszykluskosten der Brücke mit unterschiedlichen Bewehrungsvarianten mit dem Zinsniveau laut RVS.	83
A.1	Lasten	101
A.2	Kombinations- und Teilsicherheitsbeiwerte	101
B.1	Gesamten Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der Nutzerkosten.	102

Anhang A

Statische Berechnung der Straßenbrücke in Rahmenbauweise

Das statische System der Rahmenbrücke ist ein gelenkig gelagerter Rahmen. Er hat eine Breite von 8 m und eine Spannweite von 15 m. Die mittels der Parameterstudie berechnete Dicke des Riegels wird auch für die Stiele angewendet. In Abbildung A.1 ist das statische System der Straßenbrücke in Rahmenbauweise mit den entsprechenden Lastansätzen dargestellt.

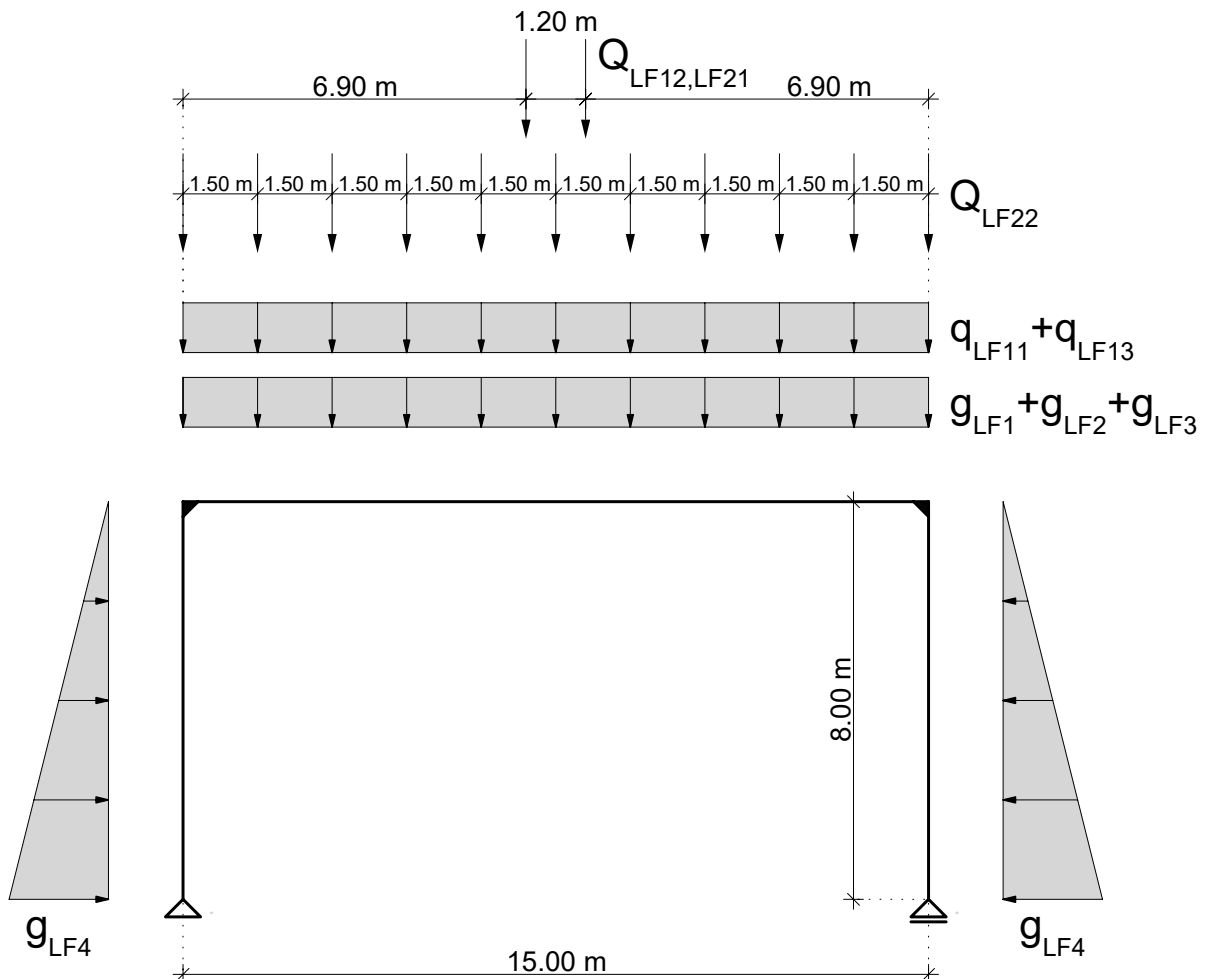


Abb. A.1: Statische System der Rahmenbrücke mit Lastansätze, in Anlehnung an [13].

Im Zuge der wissenschaftlichen Arbeit wurden die Lastaufstellung und Lastkombination von Barisic [13] überarbeitet. Die Belastungen werden über die gesamte Tragwerksbreite verteilt und

vereinfacht auf einen Meter Plattenstreifen angesetzt. Die berücksichtigten Lasten umfassen das Eigengewicht der Tragstruktur (LF1), die Belastungen durch den Aufbau (LF2), die Brückenkappe (LF3) und den Erddruck der Hinterfüllung (LF4). Die veränderlichen Lasten werden gemäß [103, 112] angesetzt. Es wird das Lastmodell 1 (LM1) und das Lastmodell 3 (LM3) angesetzt. Im LM1 hat eine gleichmäßig verteilte Last (LF11) und zwei Achslasten unterschiedlicher Größe auf allen Fahrstreifen (LF12). Im LM3 wird das Bemessungsfahrzeug 3000/200 mit einer Geschwindigkeit von von 5km/h (LF21) auf den ersten Fahrstreifen aufgebracht. Das Sonderfahrzeug hat eine Gesamtlast von 3000 kN, die auf 15 Achsen mit je 200 kN wirkt. Das LM1 wird in häufiger Kombination auf die anderen Fahrstreifen (LF22 und LF23) aufgebracht. LF22 sind die Achslasten und LF23 ist die verteilte Last. Des Weiteren werden in beiden Fahrstreifen Nutzlasten des Randbalkens (LF13) berücksichtigt. Die eben beschriebenen Lasten, sowie deren Kombinations- und Teilsicherheitsbeiwerte sind in Tabelle A.1 und Tabelle A.2 ersichtlich.

Tab. A.1: Lasten

Lasten	LF1	LF2	LF3	LF4	LF11	LF12	LF13	LF21	LF22	LF23
g_k/q_k	var.	3,05	3,05	40	2,41 ¹ /1,45	-	1,12	-	-	1,45
Q_k	-	-	-	-	-	53,57	-	17,86	26,89	-

¹nur am ersten Fahrstreifen;

Tab. A.2: Kombinations- und Teilsicherheitsbeiwerte

Beiwerte	LF1	LF2	LF3	LF4	LF11	LF12	LF13	LF21	LF22	LF23
γ_D	1,35	1,35	1,35	1,00	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35
γ_0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
γ_2	1,00	1,00	1,00	0,40	0,75	0,40	1,00	1,00	0,60	0,40

Anhang B

Sensitivitätsanalyse

Da die Sensitivitätsanalyse für die Parameter der Nutzerkosten sehr umfangreich ist, wurden nur die einflussreichsten Parameter in Abschnitt 4.1.1 dargestellt. In Tabelle B.1 finden Sie die vollständige Sensitivitätsanalyse aller Parameter der Nutzerkostenberechnung.

Tab. B.1: Gesamten Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der Nutzerkosten.

Anpassung	Variante	Differenz Nutzerkosten [%]	Differenz Gesamtkosten [%]	Sensitivität
Erhöhung JDTV auf Brücke um 10% (20.000 auf 22.000)	Stahl	7,49	1,69	Hoch
	Carbon	8,97	0,96	
	Glas	9,16	1,21	
	Basalt	9,16	1,28	
Verminderung JDTV auf Brücke um 10% (20.000 auf 18.000)	Stahl	-7,49	-1,69	Hoch
	Carbon	-8,97	-0,96	
	Glas	-9,16	-1,21	
	Basalt	-9,16	-1,28	
Erhöhung JDTV unter Brücke um 10% (10.000 auf 11.000)	Stahl	2,34	0,58	Hoch
	Carbon	0,56	0,06	
	Glas	0,57	0,07	
	Basalt	0,57	0,08	
Verminderung JDTV unter Brücke um 10% (10.000 auf 9.000)	Stahl	-2,34	-0,58	Hoch
	Carbon	-0,56	-0,06	
	Glas	-0,57	-0,07	
	Basalt	-0,57	-0,08	
Erhöhung der Geschwindigkeitsdifferenz um 10% (50 auf 55 km/h)	Stahl	6,44	1,49	Hoch
	Carbon	6,24	0,67	
	Glas	6,38	0,84	
	Basalt	6,38	0,84	
Verminderung der Geschwindigkeitsdifferenz um 10% (50 auf 45 km/h)	Stahl	-6,95	-1,61	Hoch
	Carbon	-6,74	-0,72	
	Glas	-6,89	-0,91	
	Basalt	-6,89	-0,96	
Erhöhung der Baustellenlänge um 10% (650 auf 715 m)	Stahl	9,83	2,27	Hoch
	Carbon	8,41	0,90	
	Glas	8,59	1,13	
	Basalt	8,59	1,20	

Anpassung	Variante	Differenz Nutzerkosten [%]	Differenz Gesamtkosten [%]	Sensitivität
Verminderung der Baustellenlänge um 10% (650 auf 585 m)	Stahl	-9,83	-2,27	Hoch
	Carbon	-9,53	-1,02	
	Glas	-9,73	-1,28	
	Basalt	8,59	1,20	
Erhöhung Schwerlastverkehr um 10% (8 auf 8,8%)	Stahl	1,36	0,31	Mittel
	Carbon	0,68	0,07	
	Glas	0,70	0,09	
	Basalt	0,70	0,10	
Verminderung Schwerlastverkehr um 10% (8 auf 7,2%)	Stahl	-1,36	-0,31	Mittel
	Carbon	-1,80	-0,19	
	Glas	-1,84	-0,24	
	Basalt	-1,84	-0,26	
Erhöhung Fernverkehr um 10% (30 auf 33%)	Stahl	0,38	0,09	Gering
	Carbon	-0,21	-0,02	
	Glas	-0,22	-0,03	
	Basalt	-0,22	-0,03	
Verminderung Fernverkehr um 10% (30 auf 27%)	Stahl	-0,38	-0,09	Gering
	Carbon	-0,91	-0,10	
	Glas	-0,93	-0,12	
	Basalt	-0,93	-0,13	
Erhöhung Geschäftsverkehr um 10% (13 auf 14,3%)	Stahl	0,99	0,22	Gering
	Carbon	-0,74	-0,08	
	Glas	-0,76	-0,10	
	Basalt	-0,76	-0,10	
Verminderung Geschäftsverkehr um 10% (13 auf 12,7%)	Stahl	-1,17	-0,27	Gering
	Carbon	-0,21	-0,20	
	Glas	-1,90	-0,25	
	Basalt	-1,90	-0,26	
Erhöhung Pendelverkehr um 10% (30 auf 33%)	Stahl	-1,07	-0,24	Gering
	Carbon	-1,73	-0,18	
	Glas	-1,77	-0,23	
	Basalt	-1,77	-0,25	
Verminderung Pendelverkehr um 10% (30 auf 27%)	Stahl	0,89	0,20	Gering
	Carbon	0,61	0,07	
	Glas	0,62	0,08	
	Basalt	0,62	0,09	
Erhöhung Anderer Verkehr um 10% (57 auf 62,7%)	Stahl	-2,99	-0,68	Mittel
	Carbon	-4,03	-0,43	
	Glas	-4,12	-0,54	
	Basalt	-4,12	-0,57	

Anpassung	Variante	Differenz Nutzerkosten [%]	Differenz Gesamtkosten [%]	Sensitivität
Verminderung Anderer Verkehr um 10% (57 auf 51,3%)	Stahl	2,81	0,63	Mittel
	Carbon	2,91	0,31	
	Glas	2,97	0,39	
	Basalt	2,97	0,42	
Erhöhung Besetzungsgrad um 10% (1,3 auf 1,43)	Stahl	4,69	1,06	Hoch
	Carbon	5,17	0,56	
	Glas	5,28	0,70	
	Basalt	5,28	0,74	
Erhöhung Besetzungsgrad um 10% (1,3 auf 1,17)	Stahl	-4,87	-1,10	Hoch
	Carbon	-6,29	-0,67	
	Glas	-6,42	-0,84	
	Basalt	-6,42	-0,90	