

## Diplomarbeit Masterthesis

# Vergleich der ökologischen Auswirkungen von carbonbewehrten ultrahochfesten - mit konventionellen Betonbaukonstruktionen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
des eines Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Benjamin Kromoser B.Sc.

E212 - 2

Institut für Tragkonstruktionen  
Abteilung für Stahlbeton – und Massivbau

Eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen

Von

Anreas Kinast  
0741479  
Silbermayrstrasse 13/6  
4663 Laakirchen

Wien, am

Unterschrift



## **Danksagung**

Ich bin an dieser Stelle all jenen sehr dankbar, die mich im Rahmen dieser Diplomarbeit und während der gesamten Studienzeit unterstützt und begleitet haben.

Ich möchte dabei ganz besonders Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Benjamin Kromosefür B.Sc. für die Bereitstellung des interessanten Diplomarbeitsthemas und für die Möglichkeit einen Beitrag zu diesem Forschungsprojekt zu leisten, danken. Nur durch seine kompetente Betreuung und sein großes Fachwissen konnte ich mich diesem Forschungsthema so intensiv widmen.

Des Weiteren bedanke ich mich bei Michael Sturges für das Veranschaulichen der ELCD – Datenbank.

Großen Dank gebührt auch Herrn Huber von der Fa. BASF für die Analyse der Betonsorten.

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

Danken möchte ich auch meinen Studienfreunden Markus, Lukas und Dominic für die unvergesslich schönen Jahre in Wien.



## **Kurzfassung**

Im Zuge des Forschungsprojekts „Sustainable building with textile reinforced ultra high performance concrete“ am Institut für Tragkonstruktionen der TU – Wien wird der Einsatz von Hochleistungswerkstoffen untersucht. Durch die Kombination der beiden Materialien UHPC und Carbonbewehrung können Bauteile wesentlich schlanker dimensioniert werden.

Carbonbewehrung zeichnet sich durch seine hohe Zugfestigkeit, sein geringes Gewicht und eine hohe Korrosionsbeständigkeit aus.

Als „Ultra high performance concrete (UHPC)“ werden Betone bezeichnet, die eine Druckfestigkeit von  $> 150$  MPa aufweisen. Diese Festigkeit wird durch eine große Gefügedichte, sowie einen geringen Wasserzementwert erreicht, wodurch filigrane, leichte und ressourcenschonende Bauteile hergestellt werden können.

Aus rein technischen Gesichtspunkten wäre es daher plausibel, den Einsatz von carbonbewehrten UHPC – Konstruktionen in der Baubranche zu forcieren.

Aus ökologischer Sicht wäre der vermehrte Einsatz dieser Konstruktionsweise auf Grund der Materialeffizienz zu befürworten. Sollten jedoch der Ressourcenverbrauch sowie die Emissionen durch die Produktion dieser Hochleistungsmaterialien die erzielte Einsparung im Vergleich zum konventionellen Stahlbetonbau kompensieren oder sogar übertreffen, wäre von dieser Konstruktionsweise abzuraten.

Diese Diplomarbeit widmet sich dieser Frage und vergleicht anhand von konkreten statischen Aufgabenstellungen die ökologischen Auswirkungen von carbonbewehrten UHPC - mit klassischen Betonbaukonstruktionen.



## **Abstract – Comparison of the ecological impact of carbon reinforced ultra high performance concrete - with conventional concrete structures**

As part of the research project „sustainable building with textile reinforced ultra high performance concrete“ the Institute for Structural Engineering at the TU Wien investigates the use of high-performance materials. The combination of both materials ultra high performance concrete (UHPC) and carbon fiber reinforced polymer (CFRP) as reinforcement allows to create construction elements, which are much lighter and thinner compared to conventional concrete elements. CFRP is characterized by a very high tensile strength, a low dead load and its corrosion-resistance.

UHPC are defined by a compressive strength of more than 150MPa, which is created by its high structural density and low water-cement factor. These characteristics enable the manufacturing of delicate and light construction elements in a resource-friendly manner. Evaluating based on technical arguments the advantages of these CFRP-reinforced UHPC are clearly indicating an advisable growth of using these materials in the building industry. But how does the ecological footprint of these materials look like? Does the manufacturing process of the CRFP-reinforced UHPC deliver advantages or disadvantages in respect to sustainability issues, when it is compared to conventional steel reinforced concrete?

The content of this thesis discuss the ecological impact of CFRP-reinforced UHPC by focusing on the consumption of raw materials and the emissions of its manufacturing process. This scientific work compares the consequences based on real structural examples.

## Inhaltsverzeichnis

Allgemeines .....	1
1 Einleitung.....	1
1.1 Allgemeines zu Karbonfasern.....	4
1.2 Herstellungsprozess .....	4
1.3 Physikalische Eigenschaften Karbonfaser .....	7
2 Studie Wuppertal.....	9
MIPS – Konzept.....	9
2.1 Einführung .....	9
2.2 MIPS – Konzept: Karbonfaser .....	13
2.3 MIPS – Konzept: Epoxidharz .....	14
2.4 MIPS – Konzept: Stahl .....	16
2.5 Vergleich der Materialflüsse für textile Bewehrungsmatte und Stahl .....	17
3 Auswertung ELCD - Datenbank.....	19
3.1 Einführung : Der Lebenszyklus Ansatz - IPP .....	19
3.2 Allgemeines zu den Datensätzen .....	22
3.3 ELCD Datensatz für Polyacrylnitril (PAN).....	23
3.4 ELCD Datensatz für Stahl.....	24
3.5 Die Auswertung der Datensätze.....	25
3.6 Parameter zur Beschreibung der Umweltwirkungen .....	28
3.7 Methode zur Auswertung in Ökobilanzen .....	32
3.8 Die Auswertung.....	33
3.8.1 Ökologische Gefährdung.....	34
3.8.2 Distance-to-Target .....	34
3.9 Einstufung „Verknappung von abiotischen Ressourcen“ .....	35
3.9.1 Ökologische Gefährdung.....	35
3.9.2 Distance to Target.....	37
3.10 Einstufung „Versauerungspotential von Boden und Wasser“ .....	39
3.10.1 Ökologische Gefährdung.....	39
3.10.2 Distance to Target.....	40
3.11 Einstufung „Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht“ .....	40
3.11.1 Ökologische Gefährdung.....	40
3.11.2 Distance to Target.....	40
3.12 Einstufung „Treibhauspotential“ .....	41
3.12.1 Ökologische Gefährdung.....	41
3.12.2 Distance to Target.....	42
3.13 Ökologische Priorität.....	43
3.14 Ökologische Mehrbelastung Produktion .....	43

3.15	Ökologische Mehrbelastung je MPa Zugfestigkeit.....	45
3.16	Recyclingverfahren Karbonfaser .....	47
3.16.1	Allgemeineis.....	47
3.16.2	Fazit.....	51
4	Anwendung der EPD – Daten an baustatischen Aufgabenstellungen.....	52
4.1	CFRP bewehrte T –Träger .....	52
4.1.1	Massenermittlung der beiden T – Träger Konfigurationen .....	55
4.2	Bewehrungsstahl bewehrter Träger.....	56
4.3	Vergleich der ökologischen Auswirkung des CFRP – T – Trägers Konfiguration 1 mit Rechteckquerschnitt.....	58
4.4	CFRP bewehrtes Deckenelement.....	66
4.4.1	Massenermittlung der Deckenkonfigurationen.....	68
4.5	Stahlbetonmassivdecke: $M_{e,d} = 112,0$ kNm .....	69
4.5.1	Bemessung Stahlbetonmassivdecke: $M_{e,d} = 112,0$ kNm .....	69
4.6	Vergleich der ökologischen Auswirkungen CFRP bewehrtes Deckenelement Konfiguration 4 mit Stahlbetonmassivdecke $M_{e,d} = 112$ kNm.....	71
4.7	Stahlbetonmassivdecke: $g_k = 2,0$ kN/m <sup>2</sup> ; $q_k = 3,0$ kN/m <sup>2</sup> .....	75
4.7.1	Bemessung Stahlbetonmassivdecke: $g_k = 2,0$ kN/m <sup>2</sup> ; $q_k = 3,0$ kN/m <sup>2</sup> .....	75
4.8	Vergleich der ökologischen Auswirkungen CFRP bewehrtes Deckenelement Konfiguration 4 mit Stahlbetonmassivdecke $g_k = 2,0$ kN/m <sup>2</sup> ; $q_k = 3,0$ kN/m <sup>2</sup> .....	77
4.9	Cobiax - Flachdecke $M_{e,d} = 112,0$ kNm.....	81
4.9.1	Nachweis über die Reduktion von CO <sub>2</sub> – Emissionen durch die Anwendung der Cobiax Technologie am Beispiel des Projekts „Zollverein School of Management and Design“ in Essen 82	
4.9.2	Bemessung Cobiax Flachdecke ( $M_{r,d} = 112,0$ kNm).....	84
4.10	Vergleich der ökologischen Auswirkung des CFRP – Deckenelements Konfiguration 4 mit Cobiax Flachdecke .....	86
5	Fazit .....	91
	Abbildungsverzeichnis.....	93
	Tabellenverzeichnis.....	94
	Literaturverzeichnis.....	96



## Teil 1

# Allgemeines

## 1 Einleitung

Die Weltbevölkerung wird nach Berechnungen der Vereinten Nationen bis 2050 von derzeit 7,6 Milliarden Menschen auf 9,8 Milliarden Menschen wachsen [tagesschau 2017]. Die Zahl der Erdbewohner wird sich laut den UN – Bevölkerungsprojektionen 2017 bis 2100 auf 11,2 Milliarden erhöhen [Deutsche Stiftung Weltbevölkerung 2017]. Die Länder mit der größten Bevölkerung sind China (1,37 Milliarden), Indien (1,29 Milliarden) und die USA (321 Millionen). Bezogen auf die Bevölkerung nach Kontinenten leben rund 60 Prozent der Menschen in Asien. Momentan wächst die Weltbevölkerung jährlich um rund 83,7 Millionen Menschen [Müssig 2017].

Zu Beginn des 19. Jahrhunderts überschritt die Weltbevölkerung erstmals die Milliardenmarke. Im Jahr 1927 betrug die Anzahl an Erdbürgern 2 Milliarden. Das bedeutet, dass sich in nicht einmal 100 Jahren die Zahl fast vervierfacht hat. All diese Menschen benötigen neben den Grundvoraussetzungen für Leben wie Luft, Wasser und Essen einen Platz zu Leben und zu Arbeiten. All diese Behausungen müssen gebaut werden und benötigen für ihre Errichtung natürliche Ressourcen.

Die WHO beziffert in ihrem Living Planet Report 2014, dass für den derzeitigen Rohstoffverbrauch 1,5 Erden nötig wären, um die Bevölkerung langfristig mit Ressourcen versorgen zu können [Lellan 2014].

Forscher des Wiener Instituts für soziale Ökologie haben errechnet, dass jährlich 70 Milliarden Tonnen Material der Natur entnommen werden [Hallwirth 2017]. Das entspricht einem 23fachen Anstieg in den letzten 100 Jahren. In den Industrieländern fallen etwa 300 Tonnen verbautes Material an jeden Menschen. In den restlichen Ländern beziffert das Institut für Soziale Ökologie in Wien den Materialverbrauch mit immerhin 50 Tonnen pro Person [Hallwirth 2017].

Da es jedoch in absehbarer Zukunft nicht möglich sein wird, die benötigten Rohstoffe für die Menschheit aus dem Weltall zu beziehen, muss man mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen der Erde auskommen, um den folgenden Generationen ebenfalls die Möglichkeit zu bieten, sich an den vorhandenen Ressourcen zu bedienen. Dazu bedarf es neuen Technologien und der Optimierung von bestehenden Verfahren.

Der rasante Anstieg der Weltbevölkerung in den letzten Jahrzehnten, vor allem in asiatischen Ländern löst einen beispiellosen Bedarf an Wohnraum in der Geschichte der Menschheit aus. Um diesen Bedarf decken zu können, benötigt es einen Baustoff, der in erster Linie schnell und einfach zu verarbeiten ist. Weiters wird eine hohe Festigkeit von dem Baustoff gefordert, um große, witterungsbeständige und dauerhafte Gebäude zu errichten. All diese Eigenschaften treffen auf den Baustoff Beton zu.

Beton ist ein Gemisch aus Kies, Sand, Zement und Wasser. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um einen künstlich hergestellten Stein, bei dem die Gesteinskörnung durch die Vermischung mit Zement und Wasser miteinander verklebt wird. Beton ist ein Baustoff mit einer hohen Druckfestigkeit. Da jedoch die einzelnen Bestandteile nur durch den sogenannten Zementleim miteinander verklebt werden, ist die Aufnahmekapazität von Zugkräften begrenzt. Die Zugfestigkeit beträgt rund nur 1/10 der Druckfestigkeit. Um diese Diskrepanz der beiden Festigkeiten auszugleichen, benötigt man einen Baustoff als Bewehrung in der Betonkonstruktion, der die auftretenden Zugkräfte aufnehmen kann. Die am häufigsten angewandte Lösung im Betonbau ist dabei das Einlegen von Stahl. Der Stahl besitzt eine sehr hohe Zugfestigkeit und wird im Regelfall vor dem Einbringen des flüssigen Betons in der Schalung verlegt. Dabei entsteht der Verbundwerkstoff Stahlbeton.

Der Stahl besitzt jedoch den Nachteil, dass durch Oxidation mit Sauerstoff in Verbindung mit Wasser Eisenoxid entsteht. Eisenoxid ist porös und schützt nicht vor weiterer Zersetzung. Die Festigkeit des Stahls sinkt und die Oxidation bewirkt eine Zunahme der Masse und des Volumens. Dadurch kann es zum Abplatzen des Betons kommen und der Oxidationsvorgang wird durch den freien Zugang von Sauerstoff und Wasser beschleunigt.

Um den Stahl in einer Betonkonstruktion vor Korrosion zu schützen, muss man den Stahl im alkalischen Milieu (pH- Wert >12) sichern. Der hohe pH- Wert wirkt dabei wie eine schützende Passivschicht auf der Oberfläche des Stahls. Das alkalische Milieu entsteht jedoch im Beton erst ab einem Randabstand zur freien Oberfläche von rund 3,0 cm. Im konstruktiven Ingenieurbau spricht man von der Betondeckung.

Bei einer im Hochbau typischen Stahlbetonträgerabmessung  $b/d = 25/60$  beträgt der Anteil der Betondeckung rund 30 %. Diese 30 % werden nur für den Aufbau der schützenden Passivschicht benötigt und haben keine statische Wirkung. Wie bereits weiter oben erwähnt müssen sämtliche bisher etablierten Prozesse und Technologien in Bezug auf ihre Effektivität hinterfragt werden und Lösungen gefunden werden, um den Ertrag aus den eingesetzten Ressourcen und Energien zu steigern. Vor allem die Baubranche, die einen

erheblichen Anteil am weltweiten Ressourcenverbrauch hat, muss sich auf einen schonenderen Umgang mit den vorhandenen Kapazitäten einstellen.

Sand ist ein vielseitig eingesetzter Rohstoff. Er ist ein wichtiger Bestandteil von Beton und Asphalt. Weiters kommt er in Kosmetikartikeln, in Computerchips und in Solaranlagen vor. Jährlich werden rund 15 Milliarden Tonnen Sand abgebaut. Die Umweltbehörde der vereinten Nationen gibt an, dass nur mit der Ausnahme von Wasser keine Ressource in so großen Mengen verbraucht wird. Der Großteil fließt in die Baubranche. Es ist jedoch nicht jeder Sand als Zuschlag für Beton geeignet. Der Sand in den Wüsten ist nicht dafür geeignet, da seine Kornstruktur zu klein und rundgeschliffen ist. Aus diesem Grund wird in manchen Gebieten der Sand vom Meeresboden, mit erheblichen Auswirkungen auf die Meeresbiologie, gepumpt [Hutsteiner 2017].

Ein Ansatz, um den Rohstoffverbrauch im Betonbau zu reduzieren, könnte der Wegfall der oben beschriebenen Betondeckung sein. Gerechnet auf den weltweiten Betonverbrauch würde das eine immense Ersparnis an Kies, Sand, Zement und vor allem an CO<sub>2</sub> bedeuten. Damit man auf diese Ersparnisse zurückgreifen kann benötigt man daher einen Baustoff der erstens eine mindestens so hohe Zugfestigkeit besitzt wie der Bewehrungsstahl und zweitens nicht das alkalische Milieu des Betons benötigt. Es gibt bereits seit längerem die Überlegung, dass diese Alternativrolle zum klassischen Bewehrungsstahl von faserverstärkten Verbundwerkstoffen wie zum Beispiel durch Kohlefaser verstärkte Materialien ausgefüllt werden könnte. Für den Einsatz von Kohlenstofffaser in einer Betonkonstruktion spricht nun erstens die hohe Zugfestigkeit und zweitens, wie es bereits der Name verrät, dass sie aus Kohlenstoff bestehen und daher kein alkalischen Milieu benötigen und auf das Einpacken in einer 3 cm starken Betonschicht verzichtet werden kann. Dadurch entfallen auf den Betonquerschnitt rein statische Aufgaben. Diese beiden Gründe rechtfertigen den Gedanken, darüber nachzudenken, ob Karbonfasern als Alternative für den Einsatz als Bewehrung in einer Betonkonstruktion für Stahl in Frage kommen. Aus gesamtheitlicher ökologischer Sicht muss man sich nun damit beschäftigen um welchen Preis man sich diese Materialersparnis erkaufte. Der Einsatz von Karbonfaser als Bewehrung ist natürlich nur dann zukunftsfähig, wenn die anfallenden negativen Auswirkungen auf die Umwelt durch die Produktion der Fasern den positiven Aspekt der betonseitigen Ressourceneinsparung kompensieren.

Diese Diplomarbeit soll daher einen Vergleich der Produktionsprozesse von Stahl und Karbonfaser herstellen und den ganzheitlichen Lebenszyklus der beiden Baustoffe eruieren. Im Anschluss an die Ökobilanz soll anhand einer konkreten statischen Aufgabe die ökologischen Auswirkungen eines konventionell bewehrten - und eines mit Karbonfaser bewehrten Betonträgers sowie ein karbonfaserverstärktes Deckenelement mit einer Cobiax Decke berechnet und verglichen werden.

### **1.1 Allgemeines zu Karbonfasern**

Kohlstofffasern werden auf synthetischen Weg durch stufenweises Verkoken organischer Ausgangsstoffe hergestellt. Das Endprodukt ist eine Modifikation fast reinen Kohlenstoffs und wird deshalb als anorganisch bezeichnet.

Kohlenstofffasern haben einen runden Querschnitt und eine glatte, strukturlose Oberfläche. Ihr Durchmesser beträgt ca. 10  $\mu\text{m}$  ( $=1/100 \text{ mm}$ ) und ihre Länge mindestens das 100fache des Durchmessers, also mindestens 1 mm. Je nach Herstellungstemperatur erhält man Kohlenstofffasern unterschiedlichen Kohlenstoffgehaltes. Die Standardkohlenstofffaser hat einen Kohlenstoffgehalt von 80-95 % und wird als Kohlenstofffaser bezeichnet. Fasern mit einem Kohlenstoffgehalt von 70 bis 80 % werden als partiell verkokte Fasern bezeichnet. Werden Kohlenstofffasern unter Hitzezufuhr, dem sogenannten Graphitieren, weiterverarbeitet, erhält man Graphitfasern, die einen Kohlenstoffgehalt von 99 % aufweisen. Der Rest ist Wasser Stick- und Sauerstoff. Der Einfachheit halber werden alle Fasern mit einem Kohlenstoffgehalt größer als 80 % als Kohlenstofffasern oder Carbonfibers bezeichnet.

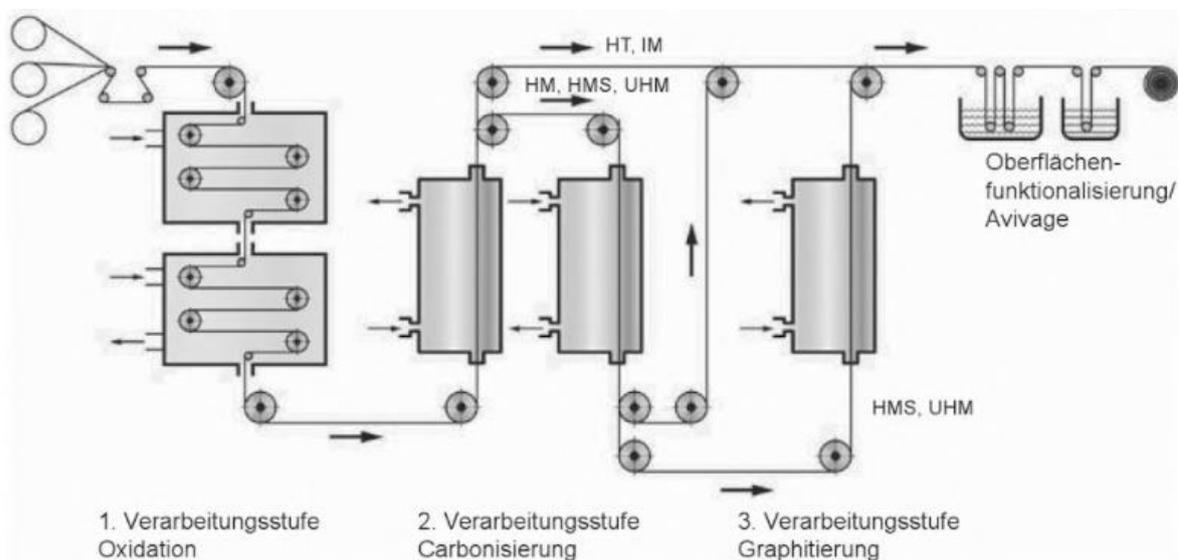
### **1.2 Herstellungsprozess**

Kohlenstofffasern sind aus organischen Kohlenstoffverbindungen erzeugte Materialien, die in Form von Whiskern (Einkristalle) oder Fasern auftreten und aus Rohöl gewonnen werden. Ausgehend von der Faserstruktur und der Orientierung der Kristallite wird zwischen isotropen Fasern, ohne erkennbare Vorzugsorientierung, und anisotropen Fasern, mit ausgeprägter parallel zur Faserachse orientierten Schichtebenen unterschieden. Die Festigkeit isotroper Carbonfaserstoffe ist verhältnismäßig gering, so dass deren Einsatzspektrum nicht der Bereich der Verbundwerkstoffe ist, sondern als Füllstoffe, Schnüre und Packungen für thermische Isolierungen zum Einsatz kommen [Cherif 2011] [S.73].

Carbonfasern werden als Endlosfasern überwiegend auf Basis von Polyacrylnitril in einem zweistufigen Prozess durch Pyrolysieren bei 200 bis 300 °C und anschließendem Karbonisieren bei 1.300 bis 1.600 °C hergestellt.

Für die Herstellung durch kontrollierte Pyrolyse werden Bedingungen wie Erspinnbarkeit, Unschmelzbarkeit und Beibehaltung der Faserform an die Ausgangsmaterialien gestellt. Zusätzlich darf es während des thermischen Abbaus nahezu zu keinem Kohlenstoffverlust kommen, bei gleichzeitiger leichter Umstrukturierung des Kohlenstoffgerüsts zu einer Graphitstruktur. Um diesen Bedingungen Rechnung zu tragen, stehen vor allem PAN und Peche sowie in geringem Umfang Viskose als Rohstoffe zur Verfügung [Cherif 2011] [S.74].

Für die Herstellung von Carbonfasern auf Basis von PAN wird durch eine Polymerisationsreaktion der Ausgangsstoff Polyacrylnitril aus Acrylnitril und bis zu 15% Comonomer synthetisiert. Der Anteil an Comonomeren ist einerseits auf Grund der starken exothermen Reaktion derzeit verfahrenstechnisch notwendig, andererseits stellen diese Bestandteile Verunreinigungen dar, die sich negativ auf die Struktur auswirken. Daher wird der Einsatz von reinem PAN als Precursorfaser angestrebt. Die Precursorfaser bilden das Ausgangsmaterial für die weiteren Prozessschritte, die in folgender Abbildung dargestellt sind.



**Abb. 1:** Produktionsschema für PAN – basierte Kohlenstofffasern [Cherif 2011] [S.76]

Unter Spannung erfolgt in der 1. Verarbeitungsstufe die thermische Stabilisierung der PAN – Precursorfasern durch einen Oxidationsprozess, der in mehreren Mehretagenöfen bei Temperaturen von 200 bis 300 °C stattfindet. Dabei kommt es bei dem exothermen Vorgang zur Farbveränderung von weiß nach schwarz und zur Dichtezunahme infolge

der Bildung flüchtiger Abbauprodukte. Es werden durch die Cyclisierung der Nitrilgruppen und Dehydrierung der C/C – Kette durch Sauerstoff lineare Polymerketten zu einer thermisch stabilen hexagonalen Ringstruktur umgewandelt [Cherif 2011 [S.76].

Während der 2. Verarbeitungsstufe, der Carbonisierung, die ebenfalls in mehreren Carbonisierungsöfen realisiert wird, erhöht sich der Kohlenstoffanteil von ca. 60 auf über 90 %, wobei die genaue Zusammensetzung von der Vorbehandlung, der Reaktionszeit und der Carbonisierungstemperatur, die im Bereich von 1200 und 2200 °C liegt, abhängt. Der unter Inertgas (z.B. Stickstoff) durchgeführte thermische Abbau, führt durch Abspaltung von HCN, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> zu einem Masseverlust, zur Dichtezunahme und ebenso zur Verringerung des Faserquerschnitts. Es bildet sich eine zweidimensionale Graphitstruktur mit sehr hoher Orientierung in Faserlängsrichtung (z.B. High Tensity (HT) -, Intermediate Moduls (IM) - Carbonfaser).

Für die Erzeugung von Hochmodulfasern werden die carbonisierten Fasern der 3. Verarbeitungsstufe, der Graphitierung, unterzogen. Durch die thermische Behandlung mit Temperaturen von 2400 °C bis 3000 °C unter Schutzgas (z.B. Argon) kommt es zu einer Streckung in den plastischen Bereichs des Kohlenstoffs (2400 °C) und trägt zur Steigerung der mechanischen Eigenschaften bei (High Moduls (HM), Ultra High Moduls (UHM) - Carbonfaser).

Durch unterschiedliche Precursorfasern und verschiedene Temperaturen in der Karbonisierung und Graphitisierung können somit verschiedene Eigenschaften eingestellt werden und führen so zu einer Vielzahl unterschiedlicher Carbonfasertypen [Meiners, Eversmann 2014] [S.372].

Die Leistungsfähigkeit von Faserverbundwerkstoffen wird im Allgemeinen stark durch die Anbindung der polymeren Matrix an die Faseroberfläche bestimmt. Deshalb wird während der Faserfertigung eine Oberflächenaktivierung (Avivage) durchgeführt, um sauerstoffhaltige Gruppen auf der Faseroberfläche zu erzeugen. Gleichzeitig erfolgt der Auftrag einer polymeren Schlichte die zusätzlich zur Verbesserung der Faser – Matrix - Anbindung als wichtige Schutzschicht bei der Weiterverarbeitung und Handhabung der Fasern dient [Meiners, Eversmann 2014] [S.372].

Am Ende des Herstellungsprozesses weisen die Carbonfasern einen Durchmesser von etwa 5 bis 10 µm auf und werden zu Rovings mit mehreren tausend Einzelfasern zusammengefasst. Die Schlichte hält diesen Rovingverbund zusammen und ermöglicht dadurch die Weiterverarbeitung zu technischen Textilien, wie beispielsweise Gewebe, Gelege oder Geflechte [Schürmann 2008].

Der Herstellungsprozess von Carbonfasern ist äußerst energieintensiv, benötigt hohe Investitionskosten für die Anlagentechnik und stellt hohe Anforderungen an die Prozessführung wie auch die Qualität der Precursor. Dies schlägt sich auch in dem hohen Preis von etwa 20 EUR/kg nieder. Wird die Faser zu Geweben oder Gelegen weiterverarbeitet, steigt der Preis nochmals um ein Vielfaches. Aufgrund des hohen Preises konnten sich CFK noch nicht in Massenmärkte etablieren [Schmitz 2007].

Aufgrund der guten mechanischen Eigenschaften und der geringen Dichte steigt die Nachfrage nach Kohlenstofffasern trotz des hohen Preises in den vergangenen Jahren stetig an. Die weltweiten Produktionskapazitäten von Carbonfasern stiegen im Jahr 2012 auf 43.500 Tonnen. Der Bedarf an Carbonfasern und damit an Bauteilen aus CFK wird bis zum Jahr 2020 mit deutlichen Zuwachsraten prognostiziert. Für das Jahr 2020 wird von einem Bedarf an Carbonfasern von etwa 130.000 Tonnen und etwa 208.000 Tonnen an CFK ausgegangen [Composites Marktbericht 2013].

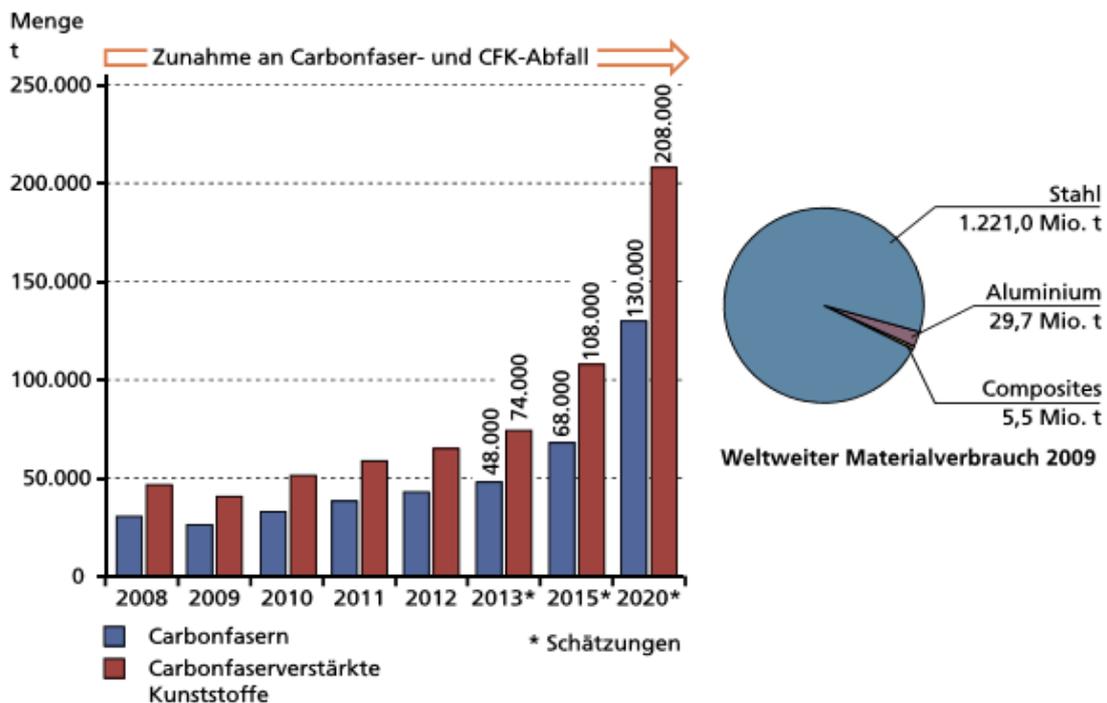


Abb. 2: Globaler Bedarf an Carbonfaser und CFK [Composites Marktbericht 2013]

### 1.3 Physikalische Eigenschaften Karbonfaser

Kohlenstofffasern sind schichtweise aufgebaut, wobei die Schichten in Faserrichtung verlaufen sollten. Die Festigkeit erhalten sie aus ihrer starken kovalenten Bindung der Atome in den Schichtenebenen. Der E-Modul der Kohlenstofffaser liegt zwischen 150 000 und 500 000 N/mm<sup>2</sup>. Die Zugfestigkeit beträgt rund 2500 – 4500 N/mm<sup>2</sup>. Die Dichte liegt zwi-

schen 1,4 und 1,45g/cm<sup>3</sup>. Die folgende Tabelle stellt einen Vergleich der wichtigsten physikalischen Eigenschaften mit dem Baustoff Stahl dar. Es ist vor allem die extrem hohe Zugfestigkeit, die die Karbonfaser zu einem sehr attraktiven Baustoff macht [Bergmeister 2003] [S.41].

	Stahl	Karbonfaser	Faktor
E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	210.000	150.000 – 500.000	ca. 2,4
Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	340 – 510	2.500 – 4.500	ca. 8,8
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	7,856	1,4 – 1,45	ca. 5,4

**Tab. 1:** Vergleich physikalische Eigenschaften Stahl/Karbonfaser [Bergmeister 2003] [S.41]

Die Tabelle beantwortet die Forschungsfrage insofern, dass es aus rein technischen Gesichtspunkten durchaus sinnvoll ist, Karbonfaser in Betonkonstruktionen als Zugbewehrung zu verwenden. Vor allem die Zugfestigkeit der Karbonfaser sticht dabei mit einem Multiplikationsfaktor von fast neun heraus. Natürlich ist dabei zu erwähnen, dass die zurzeit am Markt erhältlichen textilen Bewehrung aus Carbon, wie zum Beispiel von der Firma solidian GmbH in Deutschland, im Durchschnitt eine Bruchspannung von 3000 N/mm<sup>2</sup> (Bemessungswert 1600N/mm<sup>2</sup>) erreichen [Kulas 2015]. Dieser reduzierte Wert ist vor allem der Tränkung der Kohlenstofffaser in Epoxidharz geschuldet, die die Faser umgibt. Im Vergleich erreicht ein Betonstahl nach Ö-Norm B4707 eine Streckgrenze von 550 N/mm<sup>2</sup> (Bemessungswert 478 N/mm<sup>2</sup>) [ÖNORM B4707 2017]. Daraus ergibt sich immerhin noch ein dreieinhalbfach höherer Wert den die textile Bewehrung im Vergleich zur Stahlbewehrung erzielt. Die Werte in der Tabelle von 2.500 – 4.500 N/mm<sup>2</sup> repräsentieren hier nur die reine Karbonfaser.

Beachtlich ist natürlich auch das geringe Gewicht mit dem die Karbonfaser diese beachtlichen Werkstoffkenngrößen erreicht. Die fünfmal leichtere Kohlenstofffaser wirkt sich natürlich auch positiv auf das Eigengewicht der ohne hin schon sehr schweren Betonkonstruktion aus.

Die nun folgende Studie wurde vom Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie im Auftrag des Verbundwerkstofflabors Bremen erstellt und untersucht die Ökobilanz der beiden Werkstoffe Stahl und Karbonfaser anhand der vom Institut selbst entwickelte Methode, dem sogenannten MIPS – Konzept.

## Teil 2

# Studie Wuppertal

## 2 MIPS – Konzept

### 2.1 Einführung

Ein effizienterer Ressourceneinsatz ist eine der vielversprechendsten Strategien für eine nachhaltige Entwicklung. Wissenschaft, Regierungen, internationale Organisationen aber auch die Wirtschaft sehen Ökoeffizienz als die Antwort auf die globale ökologische Herausforderung. Obwohl immer Uneinigkeit bei der Definition von Ökoeffizienz besteht, sind sich alle Konzepte einig, dass mit den natürlichen Rohstoffen effizienter umgegangen werden muss. Aus den Stoffströmen, die den Wohlstand der Menschen schaffen – vor allem der Menschen in einigen reichen Ländern - folgt, dass unsere gegenwärtige Infrastrukturen, Güter und Dienstleistungen zu material- und energieintensiv sind, und zwar „von der Wiege bis zur Bahre“ oder, wie Walter Stahle sagt, „von der Wiege bis zur Wiege“, da alle vom Menschen benutzten Stoffe ja zur Erde zurückkehren. Wir müssen eine dematerialisierte Wirtschaft aufbauen, untermauert von völlig neuartigen Technologien und getragen von der Akzeptanz und der weisen Nutzung der Menschen von morgen [Schmidt-Bleek 1994] [S.24]. Das bedeutet, dass nicht nur der Energieverbrauch in eine ökologische Bewertung einfließen darf, sondern alle verwendeten Rohstoffe müssen in die Bewertung eines Produktes einfließen. Das Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie fordert einen reduzierten Umgang mit Rohstoffen, Energie und Raum. Zurzeit übersteigt der Materialbedarf die Summe der natürlichen, nachwachsenden Ressourcen. Ausgenommen sind dabei Luft und Wasser. Diese menschlichen Eingriffe verändern das natürliche Gleichgewicht in eine ungewisse Richtung. Der limitierte Vorrat an Rohstoffen und der unkontrollierte Raubbau an der Natur stellen die Menschheit vor ihre größte Herausforderung. Um dieses Problem in den Griff zu bekommen empfiehlt das Wuppertal Institut eine Halbierung der weltweiten Materialflüsse, um die Biosphäre wieder zu stabilisieren. Um dieses ehrgeizige Ziel zu erreichen, muss die wirtschaftliche Produktivität um den Faktor 4 bis 10 in den nächsten Jahrzehnten gesteigert werden [Stiller 1999] [S.4].

Eine wesentliche Rolle wird dabei auf die Entwicklung von neuen Materialien zukommen. Das Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie untersuchte in diesem Zusammenhang für das Verbundwerkstofflabor Bremen den ökologischen Fußabdruck verschiedener Verbundwerkstoffe. Das Ziel bestand darin zu evaluieren, ob Verbundwerkstoffe eine Lösung für die ökologischen Herausforderungen darstellen können.

Für diese Evaluierung benutzte das Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie das sogenannte MIPS – Konzept. MIPS heißt: Material- Input pro Serviceeinheit. Um die inputorientierte Umweltbelastung von Produkten und Dienstleistungen zu bestimmen, gibt MIPS an, wieviel Ressourcen (im MIPS – Konzept „Material“ genannt) für dieses Produkt, diese Dienstleistungen insgesamt eingesetzt werden. Bildet man daraus den Kehrwert, so erhält man eine Aussage über die Ressourcenproduktivität, d.h. man errechnet, wieviel Nutzen eine bestimmte Menge „Natur“ spenden kann [Ritthof 2002] [S.10].

MIPS zeigt die Innovationspotenziale eines ressourcenschonenden Wirtschaftens (Nutzen- und Dienstleistungsmanagement, Kosten- und Ressourceneffizienz etc.). Dieses zukunftsfähige Wirtschaften findet durch das MIPS- Konzept sowohl auf der betrieblichen Ebene als auch auf der überbetrieblichen, der branchenweiten, der wirtschaftsraumbezogenen oder der regionalen, nationalen und globalen Ebene Verwirklichung bzw. Unterstützung. Durch die Verzahnung der Handlung auf all diesen Ebenen tragen alle Material-Input bezogenen Optimierungen zu einer Steigerung der lebenszyklusweiten oder gesamtwirtschaftlichen Ressourcenproduktivität bei. MIPS berechnet die Ressourcenverbräuche an der Grenze ihrer Entnahme aus der Natur. Alle Angaben entsprechen den in der Natur bewegten Tonnen. Alle Materialverbräuche während Herstellung, Nutzung und Entsorgung/ Recycling werden auf Ressourcenverbräuche zurückgerechnet. Der entscheidende Unterschied zu den am Output, an den Emissionen ausgerichteten Indikatoren ist die aktive Ausrichtung hin zu zukunftsfähigen Produkten und Dienstleistungen und nicht die sture Reduktion von auftretenden Emissionen von bestehenden Produkten. Bevor man die Materialflüsse reduzieren kann, muss ein angemessenes Verfahren entwickelt werden, um sie überhaupt messen zu können. Ansonsten bleibt Ökoeffizienz nur ein Schlagwort, ohne es überhaupt auf die Agenda der Politik und Wirtschaft zu schaffen. Ökoeffizienz benötigt einen Indikator, der keine speziellen Abänderungen verlangt und somit global gültig ist. Weiters soll der Indikator möglichst leicht zu kommunizieren und zu berechnen sein. Solche einfachen Messverfahren werden eine große Bedeutung für eine nachhaltige Entwicklung haben.

Der MIPS – Indikator wurde am Institut Wuppertal entwickelt und erreicht all diese geforderten Ziele. Die Abkürzung MIPS steht für „**m**aterial **i**nput **p**er **s**ervice unit“. Das MIPS – Konzept erfasst sämtliche Material – und Energieströme. Es ist ein quantitatives Maß für den Rohstoffeinsatz eines Produktes bzw. einer Dienstleistung. Der Indikator berücksichtigt den gesamten Lebenszyklus eines Produktes. Die Einheit von MIPS ist kg. Der Kehrwert von MIPS beschreibt die Produktivität [Stiller 1999] [S.5].

Der Materialeinsatz ist unterteilt in fünf Kategorien: abiotische Rohstoffe, biotische Rohstoffe, Wasser, Erosion und Luft.

Die Kategorie abiotische Rohstoffe beinhaltet alle Mineralien und Erze, die im Bergbau abgebaut werden. In diese Kategorie fließen auch sämtliche Erdbewegungen ein. Für die Umwelt macht es keinen Unterschied, ob das abgebaute Material für einen bestimmten Zweck abgebaut wird, oder ob es nur aus dem Weg geräumt werden muss um an ein anderes Material zu gelangen. Weiters werden sämtliche fossilen Brennstoffe wie Kohle, Rohöl, etc., in dieser Kategorie berücksichtigt.

Biotische Rohstoffe sind alle Produkte aus der modernen Land – und Forstwirtschaft, aber beinhalten auch sämtliche Biomasse, die nicht direkt bei der Produktion anfällt.

Die Kategorie Erosion fasst sämtliche Bodenbewegungen in der Land – und Forstwirtschaft zusammen.

Neben den ersten drei Kategorien, die sich ausschließlich mit Feststoffen beschäftigen, greift die Menschheit auch in den Wasserhaushalt der Erde ein. Im MIPS – Konzept werden sämtliche Wassereingriffe aufsummiert. Das beinhaltet die Entnahme von Grund – und Oberflächenwasser, Kühlwasser, Bewässerungssysteme in der Landwirtschaft, aber auch genauso umgeleitete Flüsse und versiegelte Gebiete. Diese Kategorie beschäftigt sich deshalb nicht nur mit der Verschmutzung von Wasser, sondern berücksichtigt auch die Auswirkungen durch Eingriffe in die Wasserkreisläufe.

Die letzte Kategorie beschäftigt sich mit den chemischen Vorgängen in der Luft bzw. mit den Umwandlungen in den gasförmigen Aggregatzustand. Diese Kategorie ist stark verknüpft mit CO<sub>2</sub> – Emissionen.

Die Materialflüsse, die nicht direkt bei der Produktion anfallen, jedoch versteckt vorkommen, werden im MIPS – Konzept im sogenannten „ökologischen Rucksack“ behandelt. Falls zwei oder mehr Produkte in einem Prozess hergestellt werden, wird der ökologische Rucksack je nach Massenanteil auf die diversen Produkte aufgeteilt. Müll und Nebenprodukte werden nicht dem ökologischen Rucksack zugewiesen. Sie erhöhen nur den not-

wendigen Materialflusses eines Produktes. Das bedeutet, dass im Falle eines funktionierenden Recyclingverfahrens die wiederverwerteten Produkte einen geringeren ökologischen Rucksack vorweisen und deshalb zu favorisieren sind.

Im Wesentlichen kann der MIPS – Indikator eines Produktes durch zwei Strategien reduziert werden. Erstens durch die Reduzierung des „MI“ (material input) indem man moderne Produktionsverfahren anwendet, abgeschlossene Materialkreisläufe verwendet und Materialien mit einem geringen ökologischen Rucksack in die Produktion einschließt. Die zweite Möglichkeit besteht darin das „PS“ (per service unit) bei gegebenen Materialeinsatz zu verbessern. Das kann man durch eine erhöhte Lebensdauer der Produkte erreichen. Dazu muss man jedoch auch die Serviceleistungen erhöhen [Stiller 1999] [S.6].

Wie bereits weiter oben erwähnt, fordert das Wuppertal Institut die Produktivität um den Faktor 4 bis 10 zu erhöhen. Um dieses Ziel zu erreichen müssen beide Möglichkeiten ausgeschöpft werden. Mit dem MIPS – Konzept hat man sowohl die Möglichkeit die Entwicklung auf der Materialeinsatz Seite zu berücksichtigen, als auch die verbesserte Dienstleistung am Produkt während der Nutzungsphase.

Für die Herstellung von Verbundwerkstoffen existiert kein nationaler Markt. Es gibt weltweit ca. 10 Karbonfaserhersteller, die den Werkstoff für die ganze Welt liefern. Die Beschaffung der Materialien erfolgt global bzw. auf europäischer Ebene. Trotzdem untersuchte das Wuppertal Institut in der Studie die Lage in Westeuropa.

Die Behandlung der Stromversorgung stellt einen kritischen Punkt in Materialflussanalysen bzw. in Lebenszyklusanalysen dar. Abhängig von der verwendeten Technologie bei der Energieerzeugung kann der Faktor der elektronischen Einheit um den Faktor 10 variieren. Da jedoch elektrische Energie bei nahezu sämtlichen Produktionsverfahren benötigt wird, hat die Wahl des Indikators für die Einberechnung einen großen Einfluss auf das Gesamtergebnis. In dieser Studie verwendete das Wuppertal Institut den Mittelwert des elektronischen Materialeinsatz aus den europäischen OECD – Ländern. Das bedeutet, dass Länder, die für ihre Stromerzeugung einen geringeren Materialeinsatz haben, wie zum Beispiel Schweden, die einen Großteil ihrer Energie mit Wasserkraft erzeugen, im Vergleich zu den Kohlekraftwerken in Deutschland, die einen großen Materialeinsatz benötigen, in der Studie gleich behandelt werden. Das Beste wäre es sämtlichen Einsatz für alle Prozesse zu kennen. Natürlich ist das bei dieser Studie nicht der Fall, jedoch behauptet das Wuppertal Institut den Großteil der Materialeinsätze in ihrer Studie abgedeckt zu haben. „Unberücksichtigte Materialflüsse sind nur von kleinerer Bedeutung und verändern die Ergebnisse der Materialeinsätze nicht signifikant“ [Stiller 1999] [S.7].

Im Vergleich zur Stahlindustrie ist die Technologie der Verbundwerkstoffe noch eine junge Wissenschaft, weshalb die Recyclingmethoden noch in der Entwicklungsphase sind. Deshalb wurden in die Berechnung der Materialflüsse nur Neumaterialien verwendet, da es noch keine marktrelevanten Recyclingverfahren für diese Produkte gibt.

## 2.2 MIPS – Konzept: Karbonfaser

In der Materialflussanalyse des Wuppertal Instituts wurden High Moduls (HM) – Fasern, Ultra High Moduls (UMS) – Fasern und High Tensity (HT) – Fasern, die 90% der weltweiten Produktion ausmachen, untersucht.

Die Produktion der Karbonfaser erfolgt mit der Herstellung von Acrylnitril. Acrylnitril entsteht durch Oxidation von Ammonium und Propylen im sogenannten SOHIO – Prozess. Die Produktion von Karbonfasern ist ein ressourcenintensiver Prozess. Von jedem Kilogramm Polyacrylnitril gelangen nur rund 450 – 500 g in das Endprodukt. Der Rest geht verloren aufgrund von chemischen Umwandlungen im Stabilisation - und Karbonisierungsprozess. Einen höheren Ertrag würde man mit einer steigenden Produktivität erzielen, jedoch sind bisher Erträge von über 50 % nicht bekannt. An der Stelle von Acrylnitril würde Pech einen Ertrag von 85 % erzielen, jedoch besitzt Pech andere Nachteile, weshalb es nur bei der Produktion von Karbonfasern mit geringer Qualität zum Einsatz kommt [Stiller 1999] [S.13].

Öffentlich zugängliche Informationen über den Energieeinsatz bei der Produktion der Karbonfasern sind rar. Markus Zogg spricht in seinem Buch von 286 MJ/kg und vergleicht diesen Wert mit der Erzeugung von einem Kilogramm Stahl, die um den Faktor 10 geringer ist. In der Studie des Wuppertals Instituts wird ein Mitarbeiter des Karbonfaserherstellers Toray zitiert, der die eingesetzte Energie auf 280 – 340 MJ/kg schätzt. Von dieser eingesetzten Energie fallen ca. 160 MJ auf die Produktion von zwei Kilogramm Acrylnitril [Stiller 1999] [S.13].

Die Daten, die das Wuppertal Institut für die Erstellung des Materialeinsatzes verwendete, wurden von den beiden Herstellern Toho Fibers und Tenax Fibers zur Verfügung gestellt. Die Toho Synthetic Fiber wurde in Japan bereits 1934 gegründet. Im Jahr 1993 wurde eine Zweigstelle in Deutschland unter dem Namen Tenax Fibers eröffnet. Heute besitzt die Firma Niederlassungen auf der ganzen Welt und ist mit einer Produktionsleistung von 11,1 Kilotonnen auf Platz drei hinter Toray und der SGL Carbon Group der größten Hersteller gelistet.

Die Resultate der Studie zeigen, dass der Materialeinsatz für die Herstellung von Karbonfasern bei weitem der größte von allen untersuchten Verbundwerkstoffe darstellt. Der Verbrauch von abiotischen Rohstoffen wird mit 61,1 Tonnen pro Tonne erzeugter Karbonfaser angegeben. Der Verbrauch an Luft wird mit 33,4 t/t und der Materialfluss Wasser mit 2411 t/t errechnet. Da es sich bei den zur Verfügung gestellten Daten auch um Zahlen aus japanischen Herstellungsstätten handelt, wurden der Materialeinsatz für die elektrische Energie an den Durchschnitt der europäischen OECD – Länder angepasst.

Kategorie	per Tonne Karbonfaser	Einheit
Abiotische Rohstoffe	61,1	T
Wasser	2411	T
Luft	33,4	T

**Tab. 2:** Materialeinsatz pro Tonne erzeugter Karbonfasern [Stiller 1999] [S.14]

Textile Bewehrungen, die im konstruktiven Betonbau Anwendung finden, werden als Rovings verkauft. Die Tränkung in Epoxidharz hat zur Folge, dass die Kohlenstofffasern von einer sogenannten Matrix umgeben sind. Diese Matrix dient der Kraftübertragung zwischen den einzelnen Karbonfasersträngen und der Kraftübertragung zwischen Rovings und Beton. Weiters soll die Matrix möglichst weich sein, damit die mitwirkende Länge der Faser möglichst groß wird. Unter der mitwirkenden Länge versteht man dabei die Größe des Ausbreitungsfeldes der eingetragenen Spannung. Der folgende Absatz widmet sich der Untersuchung des aufgewendeten Materialeinsatzes für die Produktion des Epoxidharzes unter Anwendung des MIPS – Konzeptes.

### 2.3 MIPS – Konzept: Epoxidharz

Epoxidharz ist aufgrund seiner mechanischen Eigenschaften das am häufigsten eingesetzte Matrixmaterial in der Verbundwerkstoffindustrie. Epoxidharze gehören in die Gruppe der Duroplaste. Im Gegensatz zu Thermoplaste bilden Duroplaste lange engmaschige Molekülketten. Zwischen den Molekülen herrscht eine feste Bindung, so dass sie beim Erhitzen nicht aneinander vorbeigleiten können. Thermoplaste werden bei Wärmezufuhr weich und erhärten beim Abkühlen wieder.

Theoretisch existiert eine große Anzahl an verschiedenen Epoxidharzen, jedoch werden 75% aus Epichlorhydrin und Bisphenol – A produziert, weshalb sich die Materialflussanalyse des Wuppertals Instituts auf diese Typen beschränkte [Stiller 1999] [S.15].

Die folgende Abbildung zeigt den Prozessablauf der Produktion von Epoxidharz. Der aromatische Kohlenwasserstoff Cumol wird bei der Alkylierung von Propylen und Benzol

hergestellt. Im Anschluss daran wird er in Aceton und Phenol gespalten und im Weiteren wird daraus Bisphenol - A synthetisiert. Epichlorhydrin, als das weitere benötigte Grundmaterial für die Produktion von Epoxidharz erhält man aus Chlorhydrinierung aus Chlor und Allylchlorid, welches unter großen Temperatureinwirkung hergestellt wird.

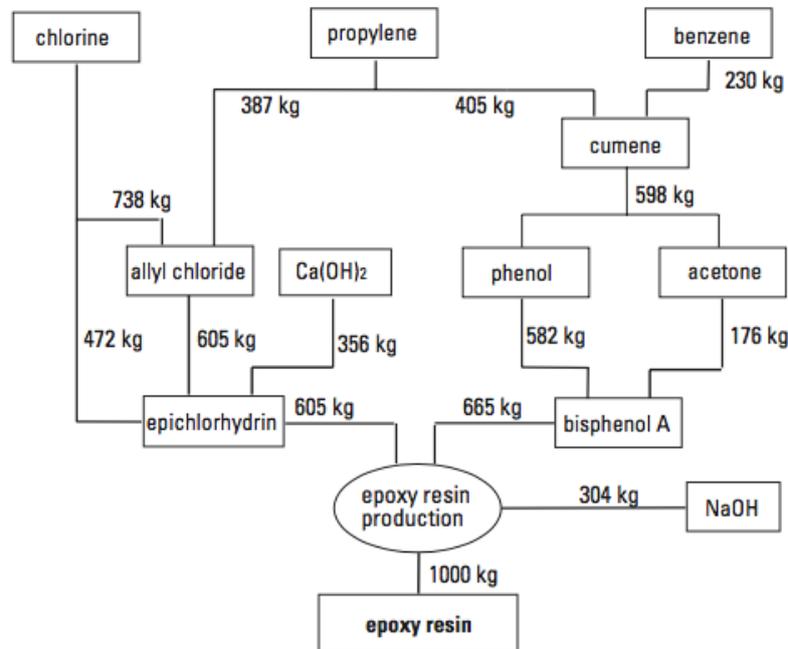


Abb. 3: Materialeinsatz Epoxidharzproduktion [Stiller 1999] [S.16]

Die große Anzahl an verschiedenen Epoxidharzen unterscheiden sich hauptsächlich in ihrer Menge an Soda und dem Verhältnis an Epichlorhydrin und Bisphenol - A. Nebenbei gibt es noch über 250 chemische Zusätze. Diese Zusätze wurden nicht in der Berechnung des Materialflusses des Wuppertals Instituts berücksichtigt. Da ihr Anteil am Gesamtprozess jedoch verhältnismäßig klein ist, stellen die Ergebnisse eine gute Näherung des gesamten Materialeinsatzes der Epoxidharzproduktion dar.

Die folgende Tabelle fasst die Ergebnisse der Materialflussanalyse der Produktion von einer Tonne Epoxidharz zusammen. Die für die Herstellung benötigten Ressourcen berechnet das Wuppertal Institut mit 14,3 Tonnen an abiotische Rohstoffe, 300 Tonnen Wasser und 5,4 Tonnen Luft. Dabei fallen alleine für die Produktion von Chlor 7,8 Tonnen an abiotischen Rohstoffen an. Das entspricht einem Anteil von über 50% der Gesamtproduktion des Epoxidharzes. Ähnlich belaufen sich die Anteile der Chlorherstellung mit 40% an der eingesetzten Luft, sowie mit 60% am verbrauchten Wasser.

Obwohl es technisch möglich wäre, Epichlorhydrin aus Wasserstoff und Propensäure zu synthetisieren und damit 2/3 des Ressourcenverbrauches bei der Chlorherstellung

vermeiden könnte und den Materialaufwand der Produktion von Epoxidharz deutlich reduzieren würde, ist es aufgrund von wirtschaftlichen Aspekten nicht umsetzbar.

Einsatz pro Tonne Epoxidharz	Einsatz [kg]	MI – Faktor [t/t]	MI – abiotisch [t]	MI – Faktor [t/t]	MI – Wasser [t/t]	MI – Faktor [t/t]	MI – Luft [t]
Bisphenol – A	665	5,0	3,32	88,5	58,8	2,45	1,63
Epichlorhydrin	605	16,4	9,93	325,2	196,8	5,53	3,34
NaOH	304	2,8	0,84	90,3	27,4	1,06	0,32
Wasser	750	-	-	1,0	0,8	-	-
Elektrische – Energie [kWh]	150	1,58	0,24	63,8	9,6	0,41	0,06
$\Sigma$ Gesamtprozess			<b>14,3</b>		<b>293</b>		<b>5,4</b>

**Tab. 3:** Materialeinsatz pro Tonne Epoxidharzproduktion [Stiller 1999] [S.16]

Sowohl die Analyse der Karbonfaserherstellung, als auch die Epoxidharzherstellung stellen eine getrennte Betrachtung der Produktion der beiden benötigten Grundmaterialien für die Produktion der am Markt erhältlichen textilen Bewehrung, wie sie im konstruktiven Betonbau eingesetzt wird, dar.

Die Firma solidian in Albstadt in Deutschland ist ein führender Anbieter für textile Bewehrungen im Bauwesen und beziffert das Verhältnis von Karbonfaser zu Epoxidharz mit 70:30 bei den von ihnen produzierten textilen Bewehrungsmatten. Die folgende Tabelle zeigt die Berechnungsergebnisse für den aufzuwendenden Materialeinsatz einer dieser typischen Bewehrungsmatten mit einem Faseranteil von 70%, ausgewertet auf Grundlage der ermittelten Daten des Wuppertal Instituts.

Kategorie	per Tonne Bewehrungsmatte	Einheit
Abiotische Rohstoffe	47,1	T
Wasser	1775,6	T
Luft	25,0	T

**Tab. 4:** Materialeinsatz von textilen Bewehrungsmatten aus Karbonfaser und Epoxidharz (70% Faseranteil)

Neben der Herstellung von Verbundwerkstoffen wie Kohlenstofffasern, Aramidfasern und Glasfasern untersuchte das Wuppertal Institut unter Anwendung des MIPS – Konzepts auch die anfallenden Materialflüsse der Stahlherstellung.

## 2.4 MIPS – Konzept: Stahl

Das Wuppertal Institut analysiert weiters in seiner Studie für den Verbundwerkstoffverband Bremen den anfallenden Materialeinsatz bei der Stahlherstellung. Stahl ist immer noch das dominante Konstruktionsmaterial. Die Weltproduktion übersteigt mit 750 Millionen Tonne die Menge an produzierter Glasfaser um den Faktor 100. In der Studie

wurde der gesamte Prozess der Stahlproduktion untersucht, angefangen bei den Abbauarbeiten des Erzes, bis zur Eisenschmelze und dem frischen des Stahls. Dabei unterscheidet die Analyse zwischen der Produktion des Rohstahl im Hochofen und der Produktion von Stahl – Neuprodukten aus Stahlschrott im Lichtbogenofen. In Deutschland beträgt das Verhältnis der Rohstahlproduktion zur Herstellung aus recycelten Materialien 83:17. Dieses Verhältnis wurde verwendet um einen durchschnittlichen Wert der aufgewendeten Materialflüsse der Stahlproduktion zu generieren [Stiller 1999] [S.23].

Weiters wird in der Auswertung der Materialeinsatz einmal ohne dem ökologischen Rucksack, der für die Produktion der eingesetzten elektrischen Energie anfällt angegeben und einmal wird den Anteil der Energie direkt in den dazugehörigen Materialeinsatz berücksichtigt. Die Ergebnisse werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Kategorie	Rohstahl MI in t/t		Stahlschrott im Lichtbogenofen MI in t/t		Stahl (83:17) MI in t/t	
Abiotische Rohstoffe	6,00	6,87	0,16	1,24	5,00	<b>5,91</b>
Wasser	10,5	45,7	0,9	44,4	8,9	<b>45,5</b>
Luft	2,18	2,41	0,15	0,44	1,83	<b>2,08</b>
Elektrizität (kWh)	551	-	681	-	573	-

**Tab. 5:** Materialeinsatz pro Tonne Rohstahl-, Stahlschrott- und Stahlproduktion (83:17) [Stiller 1999] [S.23]

## 2.5 Vergleich der Materialflüsse für textile Bewehrungsmatte und Stahl

Der Vergleich der Materialeinsätze für Bewehrungsmatten aus in Epoxidharz getränkten Karbonfasern mit einem Faseranteil von 70 % mit dem anfallenden Materialfluss der Stahlproduktion zeigt deutlich, dass der Materialaufwand für die Produktion des Verbundwerkstoffes jenen der Stahlherstellung deutlich übersteigt. Die folgende Tabelle zeigt einen Überblick über die berechnete Mehrbelastung, wobei an dieser Stelle anzumerken ist, dass sich die Angaben pro Tonne beziehen und nicht die unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften berücksichtigen.

In der Tabelle wird weiters der Materialaufwand pro MPa Zugkraft auf Traglast – und Gebrauchslastniveau angegeben. Dabei wird von einer mittleren Zugfestigkeit von 3200 MPa (Fa. solidian Grid Q95/95-CCE-38) und einem Sicherheitsfaktor  $\gamma_t = 1,2$  [Just 2015] bei der textilen Bewehrung ausgegangen. Die Berechnung des Materialaufwandes pro MPa Zugkraft für Stahl erfolgt mit BSt 550 nach ÖNORM B4707 mit einer charakteristischen Streckgrenze von 550 MPa und einem Sicherheitsfaktor  $\gamma_s = 1,15$  nach DIN EN 1992-1-1:2011 [ÖNORM B4707 2017] [Eurocode 2 2013].

Kategorie	Text. Bewehrung aus Karbon inkl. Epoxidharz [t]	Stahl [t]	Mehrbelastung [%]	Materialaufwand pro MPa Zugkraft			
				Text. Bew.		Stahl	
				$f_{t,k}$ [t/MPa]	$f_{t,d}$ [t/MPa]	$f_{y,k}$ [t/MPa]	$f_{y,d}$ [t/MPa]
Abiotisch Rohstoffe [t]	47,1	5,91	696	0,015	0,017	0,011	0,012
Wasser [t]	1775,6	45,5	3800	0,55	0,66	0,08	0,1
Luft [t]	25,0	2,08	1100	0,008	0,009	0,004	0,004

**Tab. 6:** Materialeinsatz pro Tonne textile Karbonbewehrung und pro Tonne Stahl in den Kategorien abiotischen Rohstoffe, Wasser, Luft; Materialaufwand pro MPa Zugkraft [t/MPa]

## Teil 3

# Eigenanalyse

## 3 Auswertung ELCD - Datenbank

### 3.1 Einführung : Der Lebenszyklus Ansatz - IPP

Alle Produkte, die täglich gekauft und genutzt werden, tragen für das Wohlbefinden der Menschen bei und stellen einen gewissen Komfort zur Verfügung. Trotzdem wächst unter den Kunden, der Politik und der Wirtschaft das Bewusstsein, dass der stetig wachsende Konsum maßgebliche Auswirkungen auf die Umwelt hat und dass es daher einer Reduktion der Ressourcen bedarf.

Die Konsumenten wollen die Möglichkeit besitzen den ökologischen Einfluss der Produkte, die sie kaufen, zu kennen.

Die Politik möchte die Produktion und den Konsum von nachhaltigen Gütern, die sich den nationalen und internationalen ökologischen Herausforderungen stellen, fördern.

Die Wirtschaft hat das Ziel die Effizienz und damit die Margen zu steigern, um den Rohstoffeinsatz zu mindern und damit den Weg zu einer nachhaltigen Gesellschaft beisteuern.

Für die Realisierung dieser Vorhaben bedarf es jedoch umfangreicher Kenntnis über die ökologischen Effekte der Produktion und des Konsums und es benötigt einer ganzheitlichen Lebenszyklusbetrachtung der Waren. Für eine nachhaltige Entwicklung ist es nicht ausreichend die Verschmutzung und die Emissionen von einzelnen Ausgangspunkten zu minimieren. Der Lebenszyklus – Ansatz hat das Bestreben die ökologischen Auswirkungen von Waren und Dienstleistungen in all ihren Lebenszyklusphasen zu reduzieren. Dazu bedarf es einer Betrachtung beginnend beim Abbau der Rohstoffe, über die gesamte Produktion inklusive Transport und endet nach der Nutzung in der Analyse der Wiederverwendbarkeit des Gutes. Das Hauptziel des Lebenszyklus – Ansatzes ist dabei die Vermeidung der Verschleppung von ökologischen Konsequenzen von einer in eine andere Phase [E. Kommission 2001].

Diese Überlegungen wurden im Jahr 2001 im Grünbuch der Europäischen Kommission festgehalten. Die Vorlage eines Grünbuches soll dazu dienen, einen medialen und wissenschaftlichen Diskurs zu schaffen, um dadurch den Weg für Richtlinien und Verordnungen zu ebnen. In diesem Grünbuch wird erörtert, dass der Lebenszyklus – Ansatz, das wesentliche Instrument für die erfolgreiche Umsetzung der integrierten Produktpolitik ist.

Die Vorläufer des Lebenszyklus – Ansatzes wurden in den späten 1960 und frühen 1970 Jahren von Branchen wie zum Beispiel die Ölindustrie, deren wirtschaftliches Überleben an die Abhängigkeit von begrenzten Ressourcen gekoppelt ist, entwickelt.

Am Ende der schwedischen Ratspräsidentschaft im Juni 2001 hieß es in den Schlussfolgerungen des Vorsitzes, dass „Eines der grundlegenden Ziele der Europäischen Union die nachhaltige Entwicklung, also die Erfüllung der Bedürfnisse der heutigen Generation, ohne dass dies auf Kosten künftiger Generationen ginge“ ist.

Der Lissabonner Prozess, der im Jahr 2000 mit dem Ziel verabschiedet wurde, die EU zu einem „Vorbild für den wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Fortschritt in der Welt zu sein“, wurde dabei um eine Dimension in Form einer Strategie für nachhaltige Entwicklung ergänzt [E. Parlament 2005].

In Bezug auf den verantwortlicheren Umgang mit natürlichen Ressourcen stimmte der Europäische Rat darin überein, dass „die integrierte Produktpolitik der EU, die auf eine Verringerung des Ressourcenverbrauchs und der Umweltauswirkungen des Abfalls abzielt, in Zusammenarbeit mit der Wirtschaft umgesetzt werden sollte“ [E. Kommission 2003].

Die europäische Kommission hat die integrierte Produktpolitik (IPP) in Zusammenarbeit mit interessierten Kreisen und unter Zuhilfenahme von Studien entwickelt. Die IPP wurde erstmals 1998 auf einer Konferenz mit den interessierten Kreisen besprochen. Im folgenden Jahr wurde sie auf der informellen Tagung der Umweltminister in Weimar erörtert. In den Schlussfolgerungen des Vorsitzes der Tagung wurde die Absicht der Kommission zur Annahme eines Grünbuches begrüßt und betont, dass die Verbesserung der Voraussetzungen für umweltgerechtere Produkte auf dem europäischen Markt auch zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Wirtschaft beitragen würde. Die Kommis-

sion nahm das Grünbuch im Februar 2001 an und leitete dazu eine Konsultierung der interessierten Kreise ein. Aus dieser Konsultierung ergab sich eindeutig, dass die IPP einen Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung liefern kann. Im Anschluss hat die Kommission begonnen, ihre politischen Konzepte bezüglich der Umweltauswirkungen von Produkten zu überdenken.

Alle Produkte und Dienste wirken sich während ihrer Herstellung, Nutzung oder Entsorgung auf die Umwelt aus. Die genaue Art dieser Auswirkung ist komplex und lässt sich nur schwer quantifizieren. Anhaltendes Wirtschaftswachstum und Wohlstand werden wesentlich durch die Herstellung und Nutzung von Produkten beeinflusst. Die Herausforderung liegt darin, die Verbesserung des Lebensstils und des Wohlergehens – die oft direkt durch Produkte beeinflusst werden – mit dem Umweltschutz zu verbinden. Mit anderen Worten, es müssen Szenarios gefunden werden, bei denen jeder gewinnt, bei denen besserer Umweltschutz und bessere Produktleistung Hand in Hand gehen und ein besserer Umweltschutz die langfristige Wettbewerbsfähigkeit der Industrie stärkt. Dies ist das Ziel der integrierten Produkt Politik.

Bis zu diesem Zeitpunkt richtete sich die produktbezogene Umweltpolitik tendenziell auf die Verschmutzung durch große Produktquellen, also etwa auf Industrieemissionen oder Fragen der Abfallentsorgung und konnte so auch oft Erfolge verzeichnen. Inzwischen ist jedoch deutlich geworden, dass sie durch die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus eines Produkts – einschließlich der Nutzungsphase – ergänzt werden muss. Dies sollte sicherstellen, dass die Umweltauswirkungen während des gesamten Lebenszyklus einheitlich behandelt und nicht einfach von einem Abschnitt des Lebenszyklus in einen anderen verschoben werden. Weiters besteht die Möglichkeit, die Umweltauswirkungen an dem Punkt des Lebenszyklus anzupacken, an dem die Umweltauswirkungen bzw. der Ressourcenverbrauch am besten und am kostengünstigsten zu verringern sind [Willems 2015].

Die Aufnahme der integrierten Produktpolitik in die Lissabonner Strategie führte zur Schaffung einer Datenbank, in der qualitätsgesichert Lebenszyklusdaten zur Verfügung gestellt werden. Die *European Platform on Life Cycle Assessment (EPLCA)* wird von der gemeinsamen Forschungsstelle der Kommission (GFS), dem Institut für Umwelt und Nachhaltigkeit und der der Generaldirektion Umwelt (GD – Umwelt) geführt. Die Daten sind jederzeit kostenlos, online abrufbar. Diese Datenbank dient in den folgenden Abschnitten als Ausgangsbasis einer Ökobilanz der beiden Werkstoffe Karbonfaser und Stahl.

### 3.2 Allgemeines zu den Datensätzen

Seit der Veröffentlichung im Jahr 2006 umfasst die European Reference Life Cycle Database (ELCD) Life Cycle Inventory (LCI) Daten aus führenden EU –Unternehmensverbänden und aus anderen Quellen für Schlüsselmaterialien, Energieträger, Transport und Abfallwirtschaft. Die jeweiligen Datensätze werden vom Branchenverband offiziell bereitgestellt und genehmigt. Die englischsprachige Datenbank wird auf Grundlage der beiden Richtlinien ISO 14040 und ISO 14044 erstellt.

In der ISO 14040 „Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen“ heißt es in der Einleitung, dass das gestiegene Bewusstsein über die Bedeutung des Umweltschutzes und möglicher Umweltwirkungen, die mit der Produktion und Anwendung von Produktion im Zusammenhang stehen, hat das Interesse an der Entwicklung von Methoden erhöht, die zum besseren Verständnis und zur Berücksichtigung dieser Wirkungen dienen. Eine der dafür entwickelten Methoden ist die Ökobilanz [DIN EN ISO14040 S.4 2014].

Die Ökobilanz kann helfen

- beim Aufzeigen von Möglichkeiten zur Verbesserung der Umwelteigenschaften von Produkten in verschiedenen Phasen ihres Lebensweges;
- zur Information von Entscheidungsträgern in Industrie, Regierungs- oder Nichtregierungsorganisationen (z.B. bei strategischen Planung, Prioritätensetzung, Produkt- oder Prozessentwicklung oder entsprechender Neuentwicklung);
- beim Auswählen von relevanten Indikatoren der Umwelteigenschaften, einschließlich der zugehörigen Messverfahren, und
- beim Marketing (z.B. beim Implementieren einer Umweltkennzeichnung, beim Treffen einer Umweltaussage oder beim Erstellen einer Umweltdeklaration für ein Produkt).

Die ELCD Datenbank für die Erstellung von Ökobilanzen unterteilt im Wesentlichen in die beiden Kategorien Inputs und Outputs. In der Kategorie Input werden jene Stoffe zusammengefasst, die für die Produktion des jeweiligen Produkts aufgewendet werden. Unter der Rubrik Output erscheinen jene Emissionen und Abfälle, die durch den Herstellungsprozess anfallen. Des Weiteren unterteilen sich die beiden Kategorien wie folgt:

Inputs:

- Ressourcen aus der Luft (Sauerstoff, Kohlendioxid, Stickstoff, ...)
- Ressourcen aus dem Boden (Braunkohle, Eisen, Erdgas, ...)
- Ressourcen aus dem Wasser (Flusswasser, Mehrwasser, Oberflächenwasser, ...)
- Ressourcen aus der Biosphäre (Biomasse, Holz)

**Outputs:**

- Emissionen an Wasser/ Süßwasser/ Meerwasser (Ammoniak, Chrom, Kohlenstoff, ...)
- Emissionen an Luft (Kohlenmonoxid, Blausäure, Wasserstoff, ...)
- Emissionen an Boden (Cadmium, Quecksilber, Chrom, ...)
- Emissionen/ Lagerware (Schlacke)
- Radioaktive Abfälle (Plutonium, Uran, ...)
- Abfälle (Abbruchabfälle, Rückstände(nicht näher spezifiziert))

Sämtliche Datensätze im ELCD System weisen diese Unterteilung auf. Der gleiche Aufbau soll dazu dienen, standardisierte Datenformate für die Erstellung von Ökobilanzen zu verwenden.

Da es jedoch in der ELCD Datenbank keinen Datensatz für Karbonfaser gibt, wird für die Erstellung der Ökobilanz der Datensatz für Polyacrylnitril verwendet. Polyacrylnitril (PAN) stellt den Hauptbestandteil der Karbonfaserproduktion dar und kann daher als gute Näherung für die Erstellung der Ökobilanz herangezogen werden. Für den Werkstoff Stahl gibt einen fertigen ELCD Datensatz, dessen Werte für die Erstellung der Ökobilanz herangezogen werden. In den folgenden beiden Kapiteln werden die Kerninformationen zu den beiden Datensätzen erläutert.

### **3.3 ELCD Datensatz für Polyacrylnitril (PAN)**

Polyacrylnitril Fasern sind polymerisierte Fasern, die hauptsächlich aus Acrylnitril und Methacrylat hergestellt werden. PAN – Fasern werden häufig verwendet, um Kohlenstofffasern durch Stabilisierungsbehandlung, Karbonisierung und schließlich durch eine abschließende Wärmebehandlung zu erzeugen.

Der vorhandene Datensatz repräsentiert eine Cradle to Gate – Untersuchung und bildet die Ein - und Ausflüsse ab, die bei der Herstellung von 1,0kg PAN nötig sind bzw. anfallen. Dabei werden die Daten auf einen jährlichen Durchschnitt in den 27 – Ländern der EU umgerechnet. Der Datensatz deckt alle relevanten Prozessschritte bzw. Technologien und die anfallenden Lieferketten ab. Die eingesetzte Elektrizität wird nach der jeweiligen länderspezifischen Situation modelliert. Die länderspezifische Modellierung erfolgt auf mehreren Ebenen. Zuerst werden die einzelnen Kraftwerke nach ihrem nationalen Netzanteil modelliert. Dazu gehören die Nettoverluste und der Anteil am importierten Strom sowie die nationalen Emission – und Effizienzstandards der Kraftwerke. Die länderspezifische Energieversorgung wird abhängig von den dafür eingesetzten Ressourcen inklusive deren Beschaffung durch Inlandsversorgung oder durch Import berücksichtigt. Sämtliche Import-, Transport-, Bergbau- und Explorationsprozesse für die Beschaffung der nötigen

Rohstoffe werden an die spezifische Situation in den jeweiligen Ländern angepasst. Weiters werden die verschiedenen Bergbau- und Explorationstechniken sowie die Emissionen und Wirkungsgrade der einzelnen Prozesse in den verschiedenen Ländern nach dem heutigen Stand der Technik berücksichtigt. Die Versorgung mit Dampf, Rohöl, Kohle und Erdgas wird nach der individuellen länderspezifischen Situation hinsichtlich der eingesetzten Technologieeffizienz und Energieträger modelliert. Der Datensatz enthält weiters sämtliche bekannten Transportprozesse. Überseetransport einschließlich Schienen- und LKW-Transport von und zu den Haupthäfen für importierte Rohstoffe sind im Datensatz enthalten. Darüber hinaus sind alle relevanten und bekannten Pipeline- und Tankertransporte von Gasen und Ölimporten enthalten. Raffinerieprodukte wie Diesel, Benzin, technisches Gas, Heizöl und diverse für die Produktion nötige Öle sowie Rückstände wie Bitumen fließen nach einem parametrisiertem Modell in die Erhebung der Ein- und Ausflüsse ein. Das dafür verwendete Raffinerie Modell deckt dabei die aktuellen nationale Normen in den Raffinerietechniken wie z.B. Emissionsgrad, interner Energieverbrauch, sowie die jeweiligen länderspezifische Ausstöße, die sich von Land zu Land sehr unterscheiden können, ab. Die Beschaffung von Rohöl wird nach der länderspezifischen Rohölsituation mit den jeweiligen Eigenschaften der Ressourcen modelliert.

Der Datensatz wurde mit der weltweit führenden GaBi – Software für Ökobilanz und Ökobilanzierung von der Firma thinkstep AG in Deutschland erhoben und auf der Homepage der EPLCA veröffentlicht [thinkstep 2005].

### **3.4 ELCD Datensatz für Stahl**

Der Datensatz der European Platform on Life Cycle Assessment bildet eine Cradle to Gate – Untersuchung ab und repräsentiert einen weltweiten Jahresdurchschnitt der In- und Outputs bei der Produktion von 1,0 kg Stahl. Es wurden für die Erhebung 15 Erzeugnisse der Stahlindustrie von der Gewinnung der Rohstoffe bis zum fertigen Produkt am Stahlwerkstor evaluiert. Die Daten umfassen Rohstoffgewinne wie zum Beispiel Kohle, Eisen, Erz und deren Verarbeitung. Es werden sämtliche Rohstoffeingänge, einschließlich des wiederverwerteten Stahlschrotts, sowie Energie, Wasser und Transport in den Erhebungen berücksichtigt. Ausgänge sind Stahl und Nebenprodukte, sowie Emissionen an Luft, Wasser und Boden. Alle energetischen Einflüsse in die einzelnen Prozessstufen werden aufgezeichnet. Der Datensatz wurde unter der Bedingung erhoben, dass die Summe der ausgeschlossenen Materialströme 5% nicht überschreiten darf, weder auf Grundlage der Masse oder der Energie noch darf der ausgeschlossene Materialstrom umweltrelevant

sein. In Wirklichkeit sollen 99,9% der Materialeingänge zu jeder Prozessstufe enthalten sein. Abfälle, die weniger als ein Prozent der gesamten Abfalltonnage für die gegebenen Prozessstufen darstellen, werden nicht aufgezeichnet, es sei denn, dass sie außerhalb der Produktionsstätte behandelt werden.

Der Datensatz wurde ebenfalls sowie jener der Kohlenstofffasern mit der GaBi – Software erstellt. Inhaber des Datensatzes ist die World Steel Association in Brüssel und auf der Homepage der EPLCA veröffentlicht [worldsteel 2007]. Das primäre Ziel der Studie ist eine weltweite einheitliche Lebenszyklusanalyse von Stahlprodukten, um zuverlässige Daten für Anfragen von Kunden und für externe Studien bereitstellen zu können. Weiters zielt der Datensatz darauf ab die Umweltverträglichkeit der Stahlindustrie transparent zu machen und Entwicklungspotentiale aufzuzeigen. Die Daten basieren auf einem jährlichen Durchschnitt, die einem Zeitraum zwischen 2005 und 2008 von teilnehmenden Standorten bereitgestellt wurden. Der Datensatz erfasst jedoch nicht die Recyclingfähigkeit vom hergestellten Produkt am Ende seiner Lebensdauer.

### **3.5 Die Auswertung der Datensätze**

Die Auswertung der vorhandenen Daten aus der Ökobilanz wird auf Grundlage der DIN EN 15804 „Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte“ [DIN EN 15804 2014] erstellt und wird als Environmental Product Declaration (EPD) bezeichnet. Die Europäische Norm bietet eine Grundlage, um sicherzustellen, dass alle Umweltproduktdeklarationen für Bauprodukte, Bauleistungen und Bauprozesse in einheitlicher Weise abgeleitet, verifiziert und dargestellt werden.

Eine EPD kommuniziert verifizierbare, genaue, nicht irreführende Umweltinformationen für Produkte und ihre Anwendungen. Sie unterstützt damit wissenschaftliche fundierte, faire Entscheidungen und schafft einen Anreiz für eine kontinuierliche Verbesserung der Umweltqualität unter Nutzung der Mechanismen des Marktes [DIN EN 15804 S.5 2014]. Eine EPD, die dieser Norm entspricht, enthält quantifizierte Umweltinformationen für ein Bauprodukt oder – leistung auf harmonisierter und wissenschaftlicher Grundlage. Der Zweck einer EPD im Bausektor ist es, die Grundlage für die Beschreibung und Beurteilung von Gebäuden und anderen Bauwerken zu schaffen und diejenigen Baustoffe zu identifizieren, die geringere Umweltbelastungen verursachen.

Eine EPD soll den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes bzw. eines Produktes behandeln. Diese EPD für die beiden Baustoffe Stahl und Karbonfaser und der anschließende

Vergleich beinhalten jedoch nur die ökobilanzbasierten Informationen der Herstellungsphase. In der Norm wird diese Art von EPD als „von der Wiege bis zum Werkstor“ (cradle to gate) bezeichnet und beruht auf den Informationsmodulen A1 bis A3. Eine solche EPD umfasst die Bereitstellung der Rohstoffe, den Transport, die Herstellung und damit verknüpfte Prozesse.

Die Errichtungsphase (A4 bis A5) sowie die Nutzungsphase (B1 bis B7) werden in dieser EPD nicht berücksichtigt, da die ökologischen Auswirkungen dieser beiden Phasen sehr stark von den örtlichen Gegebenheiten abhängig sind und deshalb für diese EPD nicht als repräsentativ erachtet werden können.

Von großer ökologischer Bedeutung wäre die Analyse der Entsorgungsphase (C1 bis C4). Da jedoch bis heute noch kein Verfahren entwickelt wurde, dass das Recycling von Karbonfaser im großindustriellen Stil ermöglicht, wie man es in der Stahlindustrie durch die Zugabe von Stahlschrott im Hochofen kennt, wird am Ende der Arbeit zwar ein Ausblick über die aktuelle Forschung, die sich mit dem Thema Karbonfaserrecycling befasst, gegeben, kann jedoch nicht in die EPD aufgenommen werden.

Die Umweltinformationen einer EPD, die alle Phasen des Lebenszyklus umfassen werden als „von der Wiege bis zur Bahre“ bezeichnet. Jedoch wird in der Norm gefordert, dass nur die Deklaration der Module der Herstellungsphase A1 bis A3 verpflichtend ist. Die Deklaration von Modulen für die anderen Phasen des Lebenszyklus ist freiwillig [DIN EN 15804 2014] [S.16].

Die Herstellungsphase umfasst:

- A1, Rohstoffgewinnung und –verarbeitung und Verarbeitungsprozesse von als Input dienenden Sekundärstoffen, (z.B. Recyclingprozesse)
- A2, Transport zum Hersteller,
- A3, Herstellung

Einschließlich der Bereitstellung von allen Stoffen, Produkten und Energie, sowie die vollständige Abfallbehandlung bis zum Ende des Abfallstatus oder die Beseitigung der Restabfälle während der Herstellungsphase.

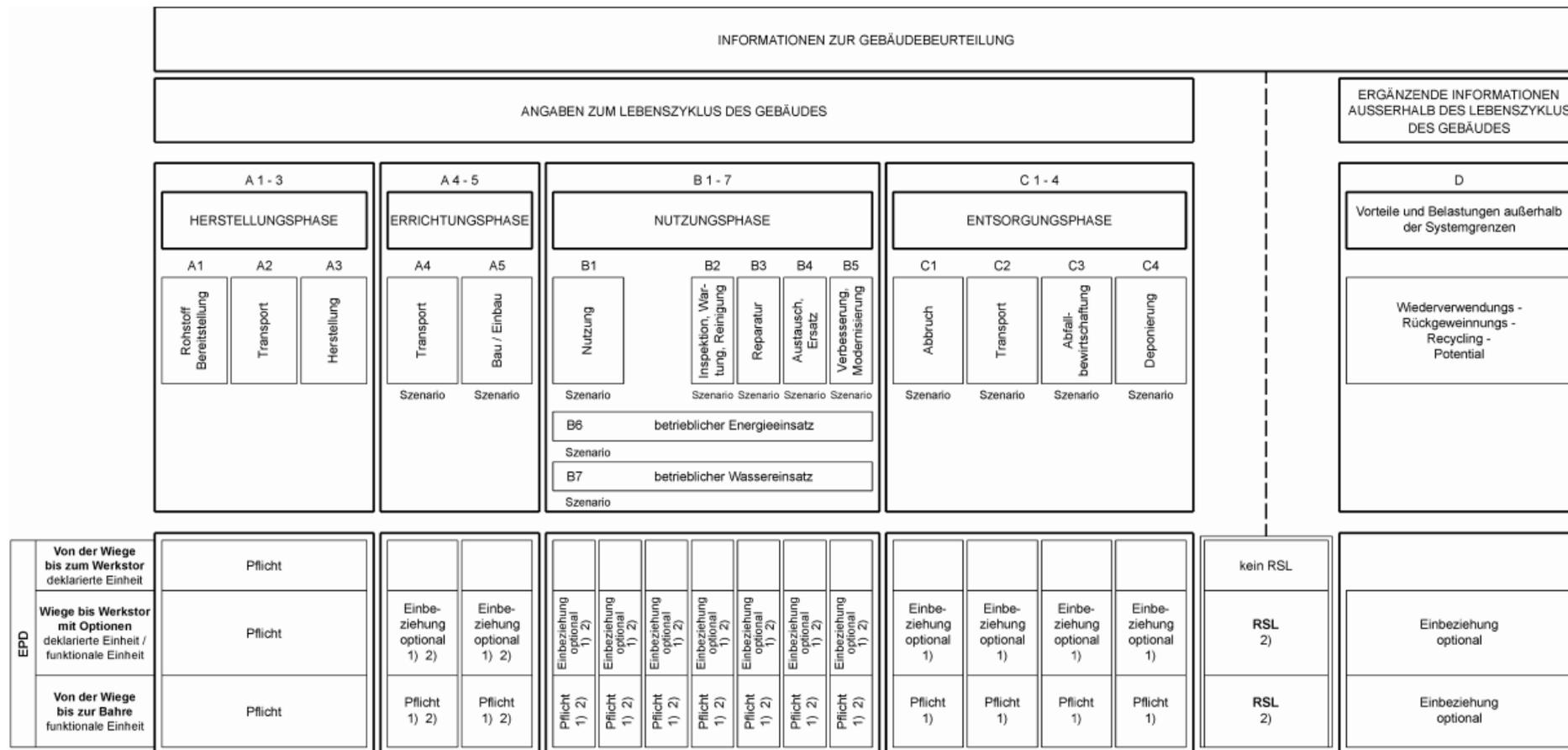


Abb. 4: Arten der EPD nach einbezogenen Phasen des Lebenszyklus und Phasen des Lebenszyklus und Module für die Beschreibung und Beurteilung von Gebäuden [DIN EN 15804 2014] [S.14]

### 3.6 Parameter zur Beschreibung der Umweltwirkungen

Die Informationen aus den Daten der Ökobilanz werden in sogenannten Wirkungskategorien zu einer Wirkungsabschätzung unter Anwendung von Charakterisierungsfaktoren ausgedrückt. In den unterschiedlichen Wirkungskategorien werden die Daten aus der Ökobilanz anhand von Charakterisierungsfaktoren zu Wirkungsabschätzungen aggregiert und durch eine Referenzsubstanz ausgedrückt. Die Charakterisierungsfaktoren dienen dazu, die unterschiedlichen Stoffe nach ihren Umweltwirkungen zu wichten. Durch Multiplikation der eingesetzten bzw. emittierten Masse mit dem zugehörigen Charakterisierungsfaktor erhält man zu jeder Wirkungskategorie eine eindimensionale Kennzahl. Diese eindimensionale Kennzahl ermöglicht es die Umweltwirkungen ganzer industriellen Produktionsverfahren transparent zu machen.

Die Auswertung des ELCD Datensatzes für die beiden Baustoffe Stahl und Karbonfaser erfolgt für folgende Wirkungskategorien:

Wirkungskategorie	Referenzsubstanz
Verknappung von abiotischen (nicht fossiler) Ressourcen	kg Sb äquiv.
Verknappung von abiotischen (fossiler) Ressourcen	MJ
Versauerungspotential von Boden und Wasser	kg SO <sub>2</sub> äquiv.
Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht	kg CFC 12 äquiv.
Treibhauspotential	kg CO <sub>2</sub> äquiv.

**Tab. 7:** Übersicht der gewählten Wirkungskategorien inkl. Referenzsubstanz [DIN EN 15804 2014] [S.34]  
 Der ELCD – Datensatz weist eine große Anzahl von Materialströmen in den Kategorien Input und Output auf. Für die Aggregation können jedoch nur jene Materialflüsse in Betracht gezogen werden, für die die *Norm DIN EN 15804 Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte* auch Charakterisierungsfaktoren zur Verfügung stellt. Die folgenden Tabellen zeigen wie die einzelnen Materialflüsse in den gewählten Wirkungskategorien zu einer Referenzsubstanz anhand den Charakterisierungsfaktoren nach der DIN EN 15804 aufsummiert wurden [DIN EN 15804 S.51; 2014]. Da es sich bei dem vorhandenen Datensatz um eine Sachbilanz von Polyacrylnitril (PAN), als Grundstoff für die Karbonfasererzeugung handelt, werden die Materialflüsse mit dem Faktor zwei multipliziert [Stiller 1999] [S.13]. Da die ELCD – Datenbank keine Datensätze für das im Bauwesen eingesetzte Epoxidharz, in welches die Karbonfasern eingebettet werden, zur Verfügung stellt, vergleicht diese Lebenszyklusanalyse nur die Produktion der Karbonfaser mit der Stahlproduktion.

<b>Wirkungskategorie: Verknappung von abiotischer Ressourcen (nicht fossiler Ressourcen) in kg SB-Äqv.</b>						
<b>Input</b>	<b>PAN [kg]</b>	<b>Karbonfaser = 2 * PAN [kg]</b>	<b>Stahl [kg]</b>	<b>Charakterisierungsfaktor [kg SB-Äqv.]</b>	<b>Σ Karbonfaser [kg SB-Äqv.]</b>	<b>Σ Stahl [kg SB-Äqv.]</b>
Aluminium (Al)	1,52E-05	3,04E-05	0,015807	1,09E-09	3,32E-14	1,72E-11
Barium (Ba)	1,32E-13	2,63E-13	1,17E-14	6,04E-06	1,59E-18	7,04E-20
Chrom (Cr)	1,08E-006	2,17E-06	9,22E-15	4,43E-04	9,61E-10	4,09E-18
Kupfer (Cu)	1,09E-005	2,19E-05	7,07E-04	1,37E-03	2,99E-08	9,69E-07
Gold (Au)	5,00E-12	1,00E-11	1,59E-09	5,20E+01	5,20E-10	8,25E-08
Eisen (Fe)	0,0024599	4,92E-03	0,765254	5,24E-08	2,58E-10	4,01E-08
Mangan (Mn)	1,26E-05	2,52E-05	0,00642001	2,54E-06	6,40E-11	1,63E-08
Molybdän (Mo)	1,72E-08	3,43E-08	3,67E-05	1,78E-02	6,11E-10	6,54E-07
Nickel (Ni)	2,05E-006	4,10E-06	5,40E-05	6,53E-05	2,68E-10	3,53E-09
Palladium (Pd)	1,71E-12	3,41E-12	7,12E-11	5,71E-01	1,95E-12	4,06E-11
Phosphor (P)	1,06E-007	2,12E-07	9,32E-06	5,52E-06	1,17E-12	5,14E-11
Platin (Pt)	2,05E-11	4,10E-11	8,55E-10	2,22E+00	9,10E-11	1,90E-09
Silber (Ag)	8,61E-10	1,72E-09	4,77E-06	1,18E+00	2,03E-09	5,62E-06
Schwefel (S)	1,03E-009	2,06E-09	7,96E-007	1,93E-04	3,98E-13	1,54E-10
Zinn (Sn)	1,14E-17	2,28E-17	1,01E-18	1,62E-02	3,70E-19	1,64E-20
Titan (Ti)	4,28E-06	8,56E-06	3,33E-04	2,79E-08	2,39E-13	9,29E-12
Uran (U)	1,17	2,34E+00	1,06	1,40E-03	3,28E-03	1,48E-03
Zink (Zn)	3,02E-05	6,03E-05	0,0110236	5,38E-04	3,24E-08	5,93E-06
				<b>Σ</b>	<b>3,28E-03</b>	<b>1,50E-03</b>
				<b>Mehrbelastung [%]</b>	<b>118,80</b>	

**Tab. 8:** Berechnung der Mehrbelastung in der Wirkungskategorie: Verknappung von abiotischen Ressourcen (nicht fossiler Ressourcen)

<b>Wirkungskategorie: Verknappung von abiotischer Ressourcen (fossiler Ressourcen) in MJ</b>						
<b>Input</b>	<b>PAN [kg; m³]</b>	<b>Karbonfaser = 2*PAN [kg; m³]</b>	<b>Stahl [kg; m³]</b>	<b>Charakterisierungsfaktor [MJ]</b>	<b>Σ Karbonfaser [MJ]</b>	<b>Σ Stahl [MJ]</b>
Braunkohle (11,9 MJ/kg)	3,17E+00	6,34E+00	2,65E-01	13,96	8,84E+01	3,70E+00
Erdöl (42,3 MJ/kg)	4,78E+01	9,57E+01	9,01E-01	41,87	4,01E+03	3,77E+01
harte Kohle (26,3 MJ/kg)	5,10E+00	1,02E+01	2,20E+01	27,91	2,85E+02	6,13E+02
Erdgas (44,1 MJ/m³)	5,72E+01	1,14E+02	2,67E+01	38,84	4,44E+03	1,04E+03
Holz (14,7 MJ/kg)	3,21E-04	6,42E-04	6,63E-05	13,96	8,96E-03	9,26E-04
Torf (8,4 MJ/kg)	4,83E-02	9,67E-02	8,90E-03	13,96	1,35E+00	1,24E-01
<b>Σ</b>					<b>8,82E+03</b>	<b>1,69E+03</b>
<b>Mehrbelastung [%]</b>					<b>421,74</b>	

**Tab. 9:** Berechnung der Mehrbelastung in der Wirkungskategorie: Verknappung von abiotischen Ressourcen (fossiler Ressourcen)

<b>Wirkungskategorie: Versauerungspotential von Boden und Wasser in SO<sub>2</sub> - Äqv.</b>						
<b>Output</b>	<b>PAN [kg]</b>	<b>Karbonfaser = 2* PAN [kg]</b>	<b>Stahl [kg]</b>	<b>Charakterisierungsfaktor [kg SO<sub>2</sub> -Äqv.]</b>	<b>Σ Karbonfaser [kg SO<sub>2</sub> -Äqv.]</b>	<b>Σ Stahl [kg SO<sub>2</sub> -Äqv.]</b>
Ammoniak	6,24E-05	1,25E-04	2,20E-05	1,60E+00	2,00E-04	3,51E-05
Stickstoffdioxid	1,47E-02	2,93E-02	0,0032924	5,00E-01	1,47E-02	1,65E-03
Schwefeldioxid	1,07E-02	2,13E-02	0,00435	1,20E+00	2,56E-02	5,22E-03
<b>Σ</b>					<b>4,05E-02</b>	<b>6,90E-03</b>
<b>Mehrbelastung [%]</b>					<b>486,27</b>	

**Tab. 10:** Berechnung der Mehrbelastung in der Wirkungskategorie: Versauerungspotential von Boden und Wasser

<b>Wirkungskategorie: Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht in kg CFC - 11 Äqv.</b>						
<b>Output</b>	<b>PAN [kg]</b>	<b>Karbonfaser = 2* PAN [kg]</b>	<b>Stahl [kg]</b>	<b>Charakterisierungsfaktor [kg CFC - 11 -Äqv.]</b>	<b>Σ Karbonfaser [kg CFC - 11 -Äqv.]</b>	<b>Σ Stahl [kg CFC - 11 -Äqv.]</b>
CFC - 11	1,46E-08	2,92E-08	1,39E-08	1,00E+00	2,92E-08	1,39E-08
CFC - 114	1,50E-08	2,99E-08	1,42E-08	9,40E-01	2,81E-08	1,34E-08
CFC - 12	3,14E-08	6,28E-08	2,98E-09	1,00E+00	6,28E-08	2,98E-09
HCFC - 22	3,43E-08	6,87E-08	3,26E-09	5,00E-02	3,43E-09	1,63E-10
<b>Σ</b>					<b>1,24E-07</b>	<b>3,04E-08</b>
<b>Mehrbelastung [%]</b>					<b>306,75</b>	

**Tab. 11:** Berechnung der Mehrbelastung in der Wirkungskategorie: Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht

<b>Wirkungskategorie: Treibhauspotential in kg CO2 - Äqv.</b>						
<b>Output</b>	<b>PAN [kg]</b>	<b>Karbonfaser = 2* PAN [kg]</b>	<b>Stahl [kg]</b>	<b>Charakterisierungsfaktor [kg CO2 -Äqv.]</b>	<b>Σ Karbonfaser [kg CO2 -Äqv.]</b>	<b>Σ Stahl [kg CO2 -Äqv.]</b>
Kohlendioxid	5,15	1,03E+01	2,33572	1,00E+00	1,03E+01	2,34E+00
CFC - 11	1,46E-08	2,92E-08	1,39E-08	4,80E+03	1,40E-04	6,66E-05
CFC - 114	1,50E-08	2,99E-08	1,42E-08	1,00E+04	2,99E-04	1,42E-04
CFC - 12	3,14E-08	6,28E-08	2,98E-09	1,10E+04	6,91E-04	3,28E-05
CFC - 13	1,97E-08	3,94E-08	1,87E-09	1,40E+04	5,52E-04	2,62E-05
Dichlormethan	5,21E-15	1,04E-14	3,01E-13	8,70E+00	9,06E-14	2,62E-12
HCFC - 22	3,43E-08	6,87E-08	3,26E-09	1,80E+03	1,24E-04	5,87E-06
<b>Σ</b>					<b>1,03E+01</b>	<b>2,34E+00</b>
<b>Mehrbelastung [%]</b>					<b>341,35</b>	

**Tab. 12:** Berechnung der Mehrbelastung in der Wirkungskategorie: Treibhauspotential

### 3.7 Methode zur Auswertung in Ökobilanzen

Die Auswertung von Ökobilanzdaten ist auf jeden Fall ein heikles, jedoch auch ein notwendiges Unterfangen. Schließlich geht es darum, die unterschiedlichen Umweltauswirkungen, die durch den Lebensweg eines Produktes geschaffen werden, zu vergleichen. Konkret ausgedrückt, muss man die Frage beantworten, welche der Umweltauswirkungen den größten Einfluss auf die Biosphäre ausübt. Ist es der Energieverbrauch eines Produktes oder sein Beitrag zur Versauerung von Boden und Wasser? Nur wenn die verschiedenen Wirkungskategorien untereinander verglichen und gegeneinander abgewogen werden, macht der Vergleich von Ökobilanzen zwischen Produkten, Werkstoffen, Verfahrensprozessen etc. einen Sinn.

Um diese Fragen beantworten zu können entwickelte das Umwelt Bundes Amt in Deutschland einen Leitfaden mit dem Titel, „Bewertung in Ökobilanzen – Methode des Umweltbundesamtes zur Normierung von Wirkungsindikatoren, Ordnung (Rangbildung) von Wirkungskategorien und zur Auswertung nach ISO 14042 und 14043 (Version99)“. Die Auswertung der beiden Ökobilanzen der beiden Baustoffe Stahl und Karbonfaser erfolgt auf Grundlage dieses Leitfadens.

In diesem Leitfaden heißt es, „Eine der schwierigsten und sensiblen Aufgaben einer an ISO – Normen orientierten Ökobilanz besteht darin, die in der Phase der Wirkungsabschätzung nach Wirkungskategorien klassifizierten und charakterisierten Daten der Sachbilanz in eine Ordnung und Auswertung - im Sprachgebrauch des Umwelt Bundes Amtes: Bewertung – zu überführen“ [Schmitz 1999 ] [S.1].

Das Umweltbundesamt verwendet den Begriff „Priorität“ („priority“), um die unterschiedliche Bedeutung der einzelnen Wirkungskategorien festzulegen. Diese Hierarchisierung von Indikatorergebnissen stellt insbesondere in Ökobilanzen, die mit dem Ziel intersystemarer Vergleiche (zwischen mehreren Produkten, Verfahren oder Handlungsoptionen) erstellt werden, eine Notwendigkeit dar. Für intersystemare Vergleiche bieten die absoluten Beträge der Wirkungsäquivalenzwerte dagegen nur einen geringen Aussagegehalt. Als übersichtliche Darstellung hat sich die graphische Darstellung in einem sogenannten T – Diagramm herausgestellt. Dazu wird für jede Wirkungskategorie die Mehrbelastung desjenigen Systems berechnet, das das jeweils höhere Indikatorergebnis aufweist:

$$\text{Mehrbelastung}_i = (\text{IE}_{i,\text{max}} - \text{IE}_{i,\text{min}}) / \text{IE}_{i,\text{min}} \quad (\text{Angabe in } \%)$$

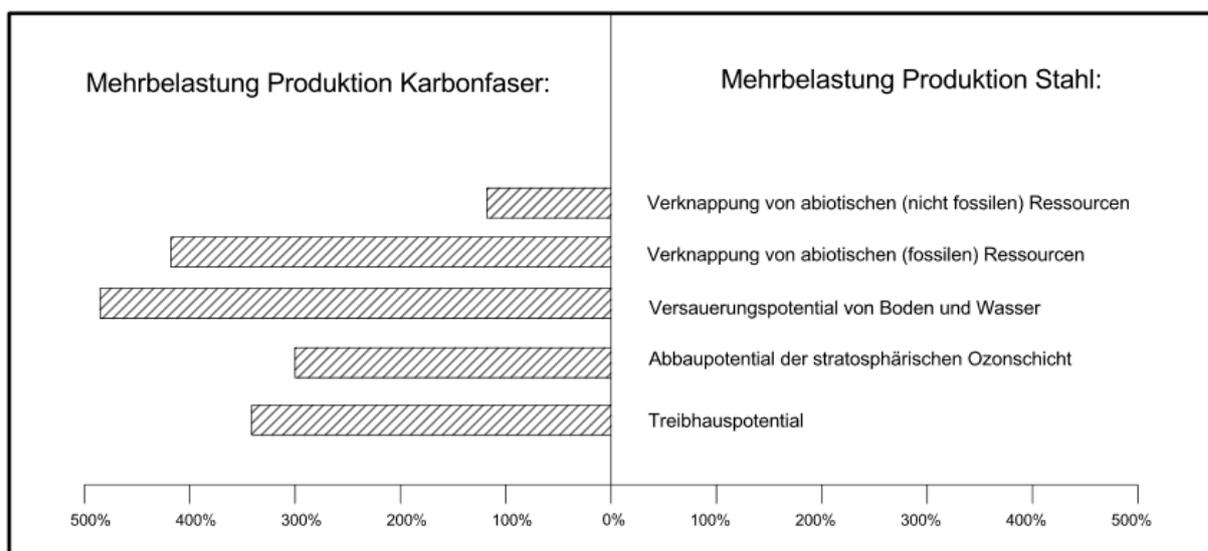
IE<sub>i</sub>: Indikatorergebnisse der Wirkungskategorie i

Min, max.: kleinerer, größerer der beiden verglichenen Werte

Die Ausrichtung der einzelnen Balken zeigt an, welches der verglichenen Untersuchungssysteme in welcher Wirkungskategorie ein jeweils höheres Indikatorergebnis aufweist. Das heißt, von welchem der beiden System eine höhere potentielle Umweltbelastung in dieser Wirkungskategorie ausgeht. Die Länge der Balken gibt die Höhe der Mehrbelastung des jeweiligen Systems in Prozent an [Schmitz 1999] [S.21].

### 3.8 Die Auswertung

Die Berechnung der Mehrbelastung in Prozent für die weiter vorn erwähnten Wirkungskategorien der beiden Produktionsprozesse von Stahl und Karbonfaser liefert dabei folgende Ergebnisse.



**Abb. 5:** Berechnung der Mehrbelastung: Produktion Karbonfaser und Produktion Stahl pro kg

Diese Darstellung lässt dagegen nicht erkennen,

- Wie hoch die absoluten Beträge der Indikatorergebnisse sind
- Wie die Wirkungskategorien bezüglich ihrer ökologischen Gefährdung zu beurteilen sind.

Die Richtung und Länge der Balken allein bietet noch keine hinreichende Information zu den Vor- und Nachteilen der beiden Baustoffe für die Umwelt. Ein direkter Vergleich der Balken untereinander – nur über deren Ausrichtung und Länge – wäre nicht sachgerecht. Deshalb werden die untersuchten Wirkungskategorien hinsichtlich ihrer ökologischen Gefährdung, und ihres Distance-to-Target beurteilt. Diese Informationen und die sich hieraus ergebende unterschiedliche ökologische Priorität werden im Rahmen der Auswertung

tung dazu genutzt, die Indikatorergebnisse unterschiedlicher Wirkungskategorien miteinander vergleichbar zu machen. Bildlich gesprochen bedeutet dies, dass jeder der Balken des T – Diagramms neben seiner Größe und Richtung auch bezüglich seiner ökologischen Priorität qualitativ darzustellen ist. Erst hierdurch wird es im Rahmen der Auswertung möglich, die Balken untereinander zu vergleichen und gegeneinander abzuwägen. Diese Abwägung der potentiellen Umweltschädigung erfolgt aufgrund von folgenden aussagekräftigen Kriterien.

### **3.8.1 Ökologische Gefährdung**

Das Kriterium ökologische Gefährdung beurteilt eine Wirkungskategorie danach, wie schwerwiegend die mit ihr verbundenen potentiellen Schäden für die ökologischen Schutzgüter „menschliche Gesundheit“, „Struktur und Funktion von Ökosystemen“ und „natürlichen Ressourcen“ zu beurteilen sind. Diese Beurteilung erfolgt unabhängig vom aktuellen Umweltzustand und unabhängig von dem in einer konkreten Ökobilanz ermittelten Indikatorergebnis dieser Wirkungskategorie.

Folgende Aspekte sind bei der Beurteilung einer Wirkungskategorie nach ihrer ökologischen Gefährdung zu berücksichtigen:

- Tiefgreifende Wirkungen sowie das Betroffensein höheren Hierarchieebenen sind als schwerwiegender anzusehen
- Irreversible Wirkungen sind als schwerwiegender anzusehen
- Ubiquitär auftretende Wirkungen sind als schwerwiegender anzusehen als räumlich begrenzte.
- Größere Unsicherheit ist als schwerwiegender anzusehen [Schmitz 1999] [S.16]

### **3.8.2 Distance-to-Target**

Mit dem Kriterium Distance-to-Target werden die Wirkungskategorien aufgrund des Vergleichs zwischen dem aktuellen Umweltzustand und dem jeweils angestrebten Umweltzustand beurteilt. Mit Distance-to-Target wird eine Wirkungskategorie um so höher hierarchisiert, je stärker die negative Abweichung des aktuellen Umweltzustands in dieser Wirkungskategorie vom angestrebten Zustand eingeschätzt wird, je wahrscheinlicher also das Eintreffen der unter ökologische Gefährdung beschriebenen potentiellen Schädigungswirkung wird.

Folgende Aspekte sind bei der Beurteilung einer Wirkungskategorie nach ihrem Distance-to-Target zu berücksichtigen:

- Ein größerer Abstand oder ein größerer Quotient zwischen Ist – Zustand und Qualitätsziel ist als schwerwiegender anzusehen
- Ein größerer Minderungsbedarf ist als schwerwiegender anzusehen
- Steigende Belastungen (z.B. Emissionen) sind als schwerwiegender anzusehen als stagnierende oder abnehmende
- Geringere Durchsetzbarkeit und Wirksamkeit sind als schwerwiegender anzusehen [Schmitz 1999] [S.17]

Die ermittelten Indikatorergebnisse jeder Wirkungskategorie aus den Datensätzen der ELCD – Bank werden nach diesen beiden Kriterien wie folgt beurteilt bzw. eingeteilt:

**A (höchste Priorität)**

bis

**E (niedrigste Priorität)**

Dabei wird in dem Leitfaden des Bundesumweltamts betont, dass diese Rangbildung als eine Relation zwischen den Wirkungskategorien oder Indikatorergebnissen, nicht dagegen als absolutes Urteil anzusehen ist. Wenn also beispielsweise eine Wirkungskategorie bezüglich ihrer Ökologischen Gefährdung in den Rang „E“ eingeordnet und ihr damit die niedrigste Priorität beigemessen wird, so bedeutet dies nicht, dass das betreffende Umweltproblem absolut gesehen als gering eingeschätzt, sondern dass es gegenüber den anderen betrachteten Wirkungskategorien als nachrangig eingestuft wird. Weiters wird im Leitfaden betont, dass andere Personen und Institutionen zu anderen Rangbildungen kommen können. Die Rangbildung muss nachvollziehbar und plausibel sein [Schmitz 1999] [S.15].

### **3.9 Einstufung „Verknappung von abiotischen Ressourcen“**

#### **3.9.1 Ökologische Gefährdung**

Unter Ressourcennutzung wird die Entnahme bzw. Nutzung von Stoffen, Energie, Organismen und Fläche aus der natürlichen Umwelt verstanden. In der Sachbilanz von Ökobilanzen wird zwischen biotischen und abiotischen Ressourcen unterschieden.

In der Wirkungskategorie „Ressourcenbeanspruchung“ werden nur die abiotischen Ressourcen (Rohstoffe) erfasst. Das sind in menschlichen Zeiträumen nicht erneuerbare Stoffe, die als Ergebnis früherer biologischer Prozesse (z.B. Kohle, Erdöl, Erdgas) oder

physikalisch – chemischer Prozesse (Erze, Steine, Erden) entstanden sind [Schmitz 1999][A1-40].

Für die Beurteilung der mit der Ressourcennutzung verbundenen Wirkungen sind zwei Kriterien zu berücksichtigen:

- Die langfristige Verfügbarkeit für die menschliche Nutzung (Schutzgut „Ressourcen“)
- Die mit der Gewinnung und Nutzung von Ressourcen verbundene Umweltbelastung (Schutzgüter „Struktur und Funktion von Ökosystemen“ und „Menschliche Gesundheit“).

Wie aus den ELCD Daten ersichtlich sind, ist für die Produktion der Karbonfaser und des Stahls ein hoher Anteil an abiotischen Ressourcen nötig. In den letzten Jahrzehnten wurde immer davor gewarnt, dass die vorhanden terrestrischen Ressourcen zu Neige gehen. Vor allem von einer Knappheit der fossilen Energieträger wurde in den Medien hingewiesen. In der Realität sieht es jedoch so aus, dass der Verbrauch an Rohstoffen noch nie so hoch war wie zur Zeit und trotzdem befindet sich der Preis für ein Barrel Öl seit einigen Jahren auf einem Rekordtief. Das zeigt, dass der Ölpreis nicht den ökonomischen Grundgesetzen von Angebot und Nachfrage gehorcht. Folgende Entwicklungen geben Anlass zur Sorge, dass sich an diesen Entwicklungen in naher Zukunft etwas ändern wird.

Die OPEC zielt sich vor der Drosselung der Menge an gefördertem Erdöl um damit seine Position am Weltmarkt nicht zu verlieren.

Der drittplatzierte Iran im Ranking der weltweiten Erdölreserven wird durch die Einigung im Atomkonflikt wieder als Big Player in den Weltmarkt der Ölexporteure zurückkehren.

Im Jahr 2015 hat die russische Föderation mehr als 534 Millionen Tonnen gefördert und damit so viel wie noch nie seit dem Zerfall der Sowjetunion. Zusätzlich kündigte Russland an, die Fördermengen weiter zu steigern.

Die USA ist mit der Erschließung der Schieferölfelder durch das sogenannte Fracking zu einem der größten Öl – Produzenten der Welt aufgestiegen. Allerdings ist diese unkonventionelle Art der Förderung wesentlich kostenintensiver als herkömmliche Förderung und ist vor allem in Zeiten von höheren Preisen profitabel. Viele Experten hatten daher mit einem deutlichen Rückgang der US – Produktion bereits 2015 gerechnet. Das ist jedoch nicht eingetreten [Demmel 2016].

Die Entwicklung des Ölpreises und die sich ständig weiterentwickelnde Fördertechnik sind nicht förderlich für den Raubbau an den abiotischen Reserven der Welt. Der Autoexperte Jürgen Pieper von Bankhaus Metzler beschrieb die derzeitige Entwicklung wie folgt, „Seit Jahren rufen die Autohersteller das Elektro – Zeitalter aus, doch bei den aktuellen Spritpreisen scheint das Ende ferner denn je. Beim Verbraucher gefragt sind SUVs, kraftstrotzende Alleskönner. Familienkombi in Geländeoptik und sportlich sowieso. Der Markt will es so, die Branche liefert. Und die Forschung für die Zeit nach dem Öl liegt auf Eis. In den letzten zwei Jahren hat man die Forschungsgelder eher zurückgefahren. Man sieht auch beispielsweise bei BMW, dass nach dem i3 und dem i8 erst einmal nichts mehr kommt. Auch da hat man die Aktivitäten ganz klar erst einmal auf Halten gestellt. Bei all den anderen sieht es ähnlich aus. Die Zulieferer sind da teilweise noch viel krasser in ihren Aussagen. Die sagen, E – Mobilität hat bislang total gefloppt und das ganze wird sich nicht wirklich beleben können, wenn die Benzinpreise und die Dieselpreise weiter so niedrig bleiben“ [Wolff 2016].

Diese Entwicklungen geben Anlass dazu, die Verknappung von abiotischen Ressourcen in der Kategorie ökologische Gefährdung höchste Priorität (A) beizumessen.

### **3.9.2 Distance to Target**

Das Umweltbundesamt weist für die Einstufung der Verknappung von abiotischen Ressourcen in der Kategorie Distance to Target darauf hin, dass das Prinzip der Ressourcenschonung in der Umweltpolitik seit langem einen hohen Stellenwert hat und einen Grundpfeiler im Kreislaufwirtschafts – und Abfallgesetz darstellt.

Messbare, räumlich konkrete Zielwerte, die sich auf einen zu erhaltenden Bestand an Ressourcen als Schutzgut beziehen und eine Einschätzung des Distance to Target von nicht erneuerbaren Ressourcen erlauben, liegen jedoch derzeit flächendeckend und in überregionaler abgestimmter Form nicht vor. Als allgemeine Rahmenvorgabe bezüglich der Ressourcen wird die Regel der Enquete – Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 12. Deutschen Bundestages für die Zielbestimmung einer nachhaltigen Ressourcennutzung wie folgt angesehen:

„Nicht – erneuerbare Ressourcen sollen nur in dem Umfang genutzt werden, in dem ein physisch und funktionell gleichwertiger Ersatz in Form erneuerbarer Ressourcen oder höherer Produktivität der erneuerbaren sowie der nicht – erneuerbaren Ressourcen geschaffen wird“ [Schmitz 1999] [S.A1-45].

Der Unterschied zwischen der destruktiven und der nicht destruktiven dissipativen Nutzung von Rohstoffen erfordert auch eine unterschiedliche Bewertung des Abstandes zum angestrebten Umweltzustand (Distance to Target).

### 1. Destruktive Nutzung

Die folgende Tabelle enthält eine Aufstellung der weltweiten Reserven der nicht erneuerbaren destruktiv genutzten Ressourcen und die derzeitige Extraktionsraten 1991 und 1992, d. h. die rechnerische Verfügbarkeit für nachfolgende Generationen (= nutzbare Jahre), wenn sie im derzeitigen Umfang weiter genutzt werden. Mögliche Neuentwicklungen sind in der Berechnung der nutzbaren Jahre nicht eingerechnet. Die Energiegewinnung auf der Erde beruht zu über 90% auf der Nutzung fossiler Energieträger. Die Erdbevölkerung verbraucht heute in einem Jahr eine Menge an Kohle, Erdöl und Erdgas, für deren Entstehen erdgeschichtlich 500.000 Jahre erforderlich waren.

Der Anteil der regenerativen Energien wird sich auch in den nächsten Jahren nur leicht erhöhen.

Art der Reserve	Reserven in Megatonnen Öläquivalente	Extraktion in Megatonnen Öläquivalente [pro Jahr]	Verhältnis Reserve/Extraktion (nutzbare Jahre)
Braunkohle	202.000	530	381
Steinkohle	386.000	2.350	164
Öl	135.000	3.130	43
Gas	113.000	1.820	62
Alle fossilen Brennstoffe	836.000	7.830	107

**Tab. 13:** Weltweit vorhandene Reserven/Extraktionen an nicht erneuerbaren Ressourcen sowie nutzbare Jahre [Schmitz 1999] [A1-46]

### 2 . Nicht destruktive dissipative Nutzung

Bei der dissipativen Nutzung nicht erneuerbaren Ressourcen verschwinden diese durch ihre Nutzung nicht. Sie können in der Zukunft wieder genutzt werden. Sie werden aber durch ihre Umwandlung so stark verändert, dass der Recyclingaufwand zu Ihrer Wiedergewinnung und die damit verbunden Umweltwirkungen sehr hoch sein können. Es wird vorgeschlagen, sich zukünftig bei der Bewertung von dissipativ genutzten Rohstoffen an die Methode von Müller – Wenk anzulehnen. Diese bestimmt mit Hilfe von Modellen, welche umweltrelevanten Eingriffe für die jeweilige Rohstoffart infolge des höheren technischen Aufwandes entstehen, wenn diese Stoffe aus Lagerstätten niedriger Konzentration erschlossen werden müssen.

Die nicht – energetischen Rohstoffe wie Metallerze etc. sind in absoluten Mengen in der Erdkruste so hinreichend vorhanden, dass derzeit für unsere Gesellschaft keine Besorgnis

der Endlichkeit dieser Ressourcen besteht. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die zugänglichen Depots dieser Rohstoffe mit hohen Anreicherungen/Konzentrationen an nutzbaren Stoffen tendenziell in einem Zeithorizont von 100 bis 1000 Jahren zurückgehen werden, so dass zukünftige Generationen bei der Nutzung von Lagerstätten mit niedrigeren Konzentrationen höhere Aufwendungen für die Gewinnung dieser Ressourcen haben werden. Mit den höheren Aufwendungen bei der Nutzung sind auch höhere Umweltauswirkungen verbunden [Schmitz 1999] [S.A1-47].

Diese Erkenntnisse geben Anlass dazu, die Verknappung von abiotischen Ressourcen in der Kategorie Distance to Target mit höchster Priorität (A) zu bewerten.

### **3.10 Einstufung „Versauerungspotential von Boden und Wasser“**

#### **3.10.1 Ökologische Gefährdung**

Die Versauerung von Boden und Wasser erfolgt durch den Eintrag von Säuren und Säurebildnern. Es kommt zu einem höheren Eintrag von  $H^+$  - Ionen als von den Böden und Gewässern aufgenommen werden können. Dadurch kommt es zu einem Sinken des pH - Wertes. Durch menschliche Aktivitäten wie zum Beispiel durch Kraftwerke, Verkehr, Industrie und Intensivtierhaltung werden oxidierte Schwefelverbindungen oder Stickstoffverbindungen in die Luft emittiert und über große Entfernungen bis zu 1.000km transportiert bevor es zu Ablagerung in den Wäldern und den Gewässern kommt. Dadurch kommt es zu Störungen und Eingriffe bzw. Veränderungen auf Fauna und Flora. Es kommt zu einer Abnahme der Biodiversität, der Widerstandskraft gegen anthropogene bzw. biologische Einflüsse und im Extremfall zu einem Kollaps von ganzen Systemen.

Einen wesentlichen Beitrag zu Versauerung von Boden und Wasser liefert der Abbau von mineralischen Erzen. Die im Bergbau anfallenden Grubenwässer sind ein Gemisch aus verschiedenen Süßgewässern und verschiedenen Mineralien aus dem inneren der Erde. Durch Oxidation von Sulfiden wird das Wasser sauer und dadurch kommt es zu einer deutlichen Senkung des pH - Wertes in Böden und Gewässern in der Nähe von Bergbaugebieten. Ein niedriger pH - Wert führt zur Abnahme der landwirtschaftlichen Erträge, da Schwermetalle in den Gewässern besser transportiert werden können und sich dadurch vermehrt in den Böden ablagern.

Der Hauptverursacher für die globale Versauerung von Böden und Gewässern ist jedoch der enorme Ammoniumeintrag durch organische Dünger in der Landwirtschaft.

Aus diesen Gründen erfolgt die Einstufung des Versauerungspotentials von Boden und Wasser in der Rubrik ökologische Gefährdung mit: B – hohe Priorität

### **3.10.2 Distance to Target**

Das Bundesumweltamt gibt an, dass etwa 90% der deutschen Waldböden den zulässigen Wert für Säure überschreiten. Dieses Phänomen wird sich nicht bessern, solange die Emissionen von oxidierten bzw. reduzierten Stickstoffverbindungen, die im Wesentlichen durch den motorisierten Straßenverkehr sowie der Intensivtierhaltung verursacht werden, reduziert werden [Schmitz 1999] [A1-60].

Infolgedessen erfolgt die Einstufung mit der Priorität B – große Priorität.

## **3.11 Einstufung „Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht“**

### **3.11.1 Ökologische Gefährdung**

Das in der Stratosphäre vorkommende Ozon hat die Fähigkeit die von der Sonne ausgehende UV – B Strahlung weitgehend zu absorbieren. Ein Defizit an Ozon verursacht deshalb eine Zunahme der UV – B Strahlung an der Erdoberfläche. Eine Erhöhung dieser Strahlung führt dabei zu sehr unterschiedlichen Schäden bei Pflanzen, Tieren und Menschen.

In den Ozeanen wird die Entwicklung des Phytoplanktons, das das wichtigste Glied in der maritimen Nahrungskette darstellt, gestört. Das wiederum hat nicht nur Folgen für den Fischfang und deshalb für die Welternährung sondern auch für den Austausch von Kohlendioxid zwischen der Atmosphäre und dem Tiefenwasser der Ozeane.

Weiters führt eine erhöhte UV – B Strahlung zu Änderungen des genetischen Materials bei höheren Pflanzenarten an Land. Dadurch kommt es zu Einbußen der landwirtschaftlichen Erträge.

Bei Menschen treten durch den erhöhten Eintrag Hauttumore, Augenkrankheiten und Beeinflussungen des Immunsystems auf.

Folglich erfolgt die Einstufung der ökologischen Gefährdung durch den Abbau der stratosphärischen Ozonschicht mit der Priorität C – mittlere Priorität.

### **3.11.2 Distance to Target**

Das Molekül Ozon besitzt die Eigenschaft die Organismen auf der Welt vor der gefährlichen ultravioletten Sonneneinstrahlung zu schützen. In den achtziger Jahren stellten

Wissenschaftler fest, dass sich über der Antarktis die stratosphärische Ozonschicht abbaut. Die Hauptursache für dieses Phänomen stellen die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) die in den siebziger – und achtziger Jahren in großen Mengen von der Industrie zum Beispiel in Kühlschränken oder Schaumstoffisolierungen auf Grund ihrer guten chemischen Stabilität eingesetzt wurden. Selbst heute noch findet man die Chemikalien in 10 bis 50 Kilometer Höhe, obwohl sich im Jahr 1987 im „Montreal Protokoll“ 197 Staaten die Übereinkunft trafen, auf die ozonschädlichen Treibhausgase zu verzichten. Bereits heute zeigt der Verbann der FCKW – Treibhausgase seine Wirkung. Schätzungen zufolge wird sich das Ozonloch um das Jahr 2070 wieder völlig erholt haben. Gegen Ende des Jahrhunderts wird die Atmosphäre von den langlebigen FCKWs frei sein [Willems 2015].

Dieses Beispiel zeigt deutlich, dass die Menschheit durchaus in der Lage ist auf eine weltweite Bedrohung entgegenwirken zu können. Ähnlich wie bei der Diskussion über das Kohlendioxid heute war die einhellige Meinung vor 30 Jahren, dass man den industriellen Einsatz von FCKWs nicht aufgeben kann. Die positiven Messungen heute zeigen die Möglichkeiten einer geschlossen agierenden Welt.

Infolge dieser Entwicklungen erfolgt die Einstufung mit der Priorität C – mittlere Priorität.

### **3.12 Einstufung „Treibhauspotential“**

#### **3.12.1 Ökologische Gefährdung**

Der Atmosphäre gehören Treibhausgase wie Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid, Methan und Ozon an. Sie verhindern, dass die von der Erde reflektierte Energie der Sonne in den Weltraum entweicht. Aus diesem Grund herrschen auf der Erde Temperaturen, die diese immense Artenvielfalt ermöglicht haben.

Aufgrund von anthropogenen Aktivitäten kommt es jedoch vor allem zu einer unnatürlichen Anhäufung von Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre, die sich dadurch immer mehr aufheizt und große Einflüsse auf den Klimahaushalt der Erde ausübt. Der Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur führt zu einem Anstieg der Weltmeere, Abschmelzen der Polkappen und dadurch zu Verschiebungen der Vegetationszonen, die wiederum die Niederschlagshäufigkeit sowie dessen geographische Verteilung beeinflussen. Folglich dessen wird es immer aufwändiger landwirtschaftliche Flächen zu bestellen und die ohnehin schon große Zahl an Hunger leidenden Menschen wird rasant steigen und zu extremen Flüchtlingsbewegungen führen.

In der Geschichte der Erde kam es immer wieder zu Klimaveränderungen. Es gab Eiszeiten und Hitzeperioden. Diese Veränderungen waren jedoch natürlichen Ursprungs und erstreckten sich über große Zeiträume. Die gegenwärtigen Geschehnisse werden jedoch durch menschliche Aktivität verursacht und laufen in einer Geschwindigkeit ab, die es der Biosphäre nicht ermöglicht, sich auf die Veränderungen einzustellen. Dadurch werden sich die Zusammensetzung sowie die geographische Verteilung der Ökosysteme verlagern. Die derzeit herrschende Artenvielfalt wird abnehmen bis sich ein neues Gleichgewicht einstellen wird.

Aus diesen genannten Gründen erfolgt die Einstufung der Kategorie Treibhauspotential mit der Priorität A – höchste Priorität.

### **3.12.2 Distance to Target**

Ende 2016 wurde der internationale Klimavertrag von Paris beschlossen und der Öffentlichkeit als Meilenstein im Kampf gegen die Erderwärmung präsentiert. Als Meilenstein deshalb, da sowohl die USA als auch China sowie Brasilien und Indien den Vertrag ratifizierten und deshalb viel mehr Hoffnung in das 31 Seiten lange Dokument gesetzt wird, als in den Vorgängerbeschluss „Kyoto –Protokoll“. Der US – Präsident Barack Obama nannte die Unterzeichnung als „Wendepunkt für die Welt“.

Der Kernpunkt des Abkommens zielt darauf ab, die durch die Treibhausgase verursachte Erderwärmung auf deutlich unter zwei Grad im Vergleich zur vorindustriellen Zeit zu begrenzen. Angestrebt wird ein 1,5 – Grad – Ziel. Dazu wollen die Länder den Netto – Ausstoß ihrer Treibhausgase in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts auf Null reduzieren. Das bedeutet, dass nur noch so viele Treibhausgase ausgestoßen werden dürfen, wie Kohlendioxid aus der Atmosphäre entzogen wird.

Der größte Kritikpunkt des Abkommens in Paris ist, dass es nicht rechtlich bindend ist, sondern auf die Freiwilligkeit der einzelnen Staaten setzt. Nur dadurch wurde es überhaupt ermöglicht, dass so viele Länder den Klimavertrag anerkennen. Der Vertrag sieht jedoch keinerlei Sanktionen vor, mit denen die unwilligen Länder zur Einhaltung der Ziele bewegt werden können.

Um diesen Entwicklungen gegen zu wirken bedarf es der Einstufung des Treibhauspotentials in der Kategorie „Distance to Target“ mit höchster Priorität – A.

### 3.13 Ökologische Priorität

Die Zusammenführung der Einzelbewertungen für die Erstellung des abschließenden T – Diagramms erfolgt nach der Tabelle 1 [Schmitz 1999] [S.22] des Leitfadens zur Bewertung in Ökobilanzen des Umweltbundesamts in Deutschland. Die folgende Tabelle stellt die Zusammenfassung der getroffenen Einstufungen in den gewählten Wirkungskategorien zusammen. Auf die Beurteilung nach dem „spezifischen Beitrag“, wie es der Leitfaden fordert, wurde in dieser Ökobilanz verzichtet.

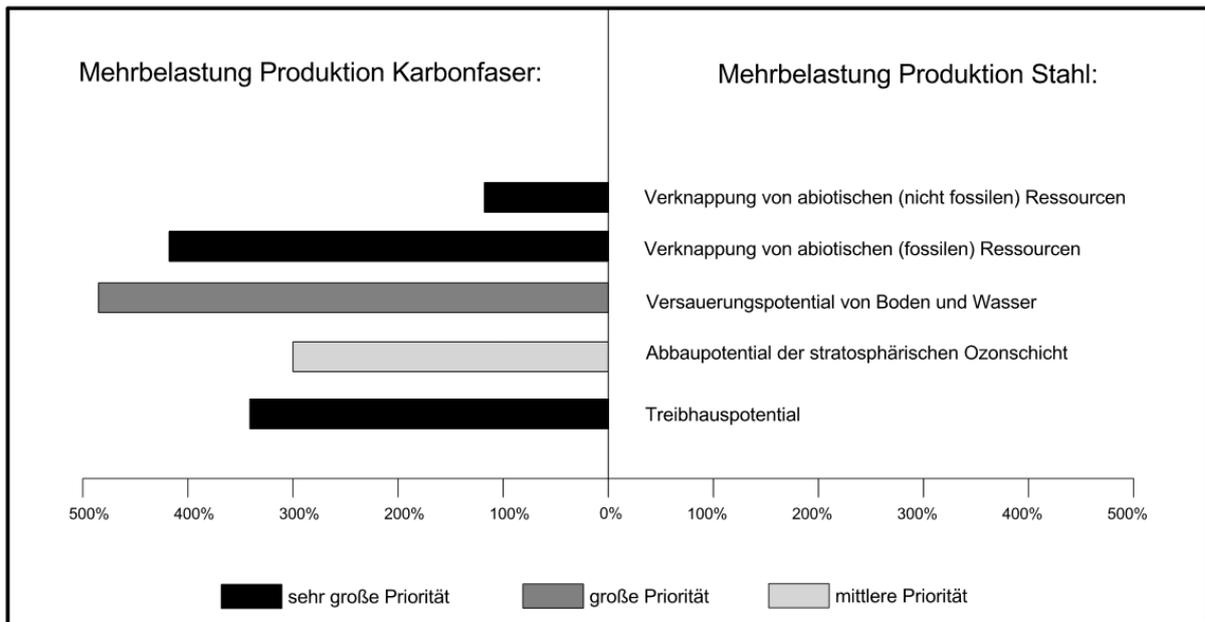
	Ökologische Gefährdung	Distance-to-Target
Verknappung von abiotischen (nicht fossilen) Ressourcen	A	A
Verknappung von abiotischen (fossilen) Ressourcen	A	A
Versauerungspotential von Boden und Wasser	B	B
Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht	C	C
Treibhauspotential	A	A

**Tab. 14:** Zusammenfassung der Einzelbeurteilungen der gewählten Wirkungskategorien zur Beurteilung der ökologischen Priorität nach den Kriterien: Ökologische Gefährdung und Distance-to-Target

### 3.14 Ökologische Mehrbelastung Produktion

Das folgende T – Diagramm zeigt die ökologische Mehrbelastung durch die Produktion der beiden Baustoffe Stahl und Karbonfaser anhand der Auswertung der ELCD – Daten. Die Länge der Balken zeigt dabei die Mehrbelastung des Systems und die verschiedenen Graustufen geben Aufschluss über die ökologische Priorität. Jene Balken, die einer unterschiedlichen Priorität angehören und dadurch einen unterschiedlichen Grauton aufweisen, können nicht miteinander verglichen werden.

Die Ergebnisse zeigen sehr deutlich, dass die Mehrbelastung durch die Produktion der Karbonfaser im Vergleich zur Stahlproduktion in all den gewählten Kategorien deutlich überwiegt.



**Abb. 6:** T- Diagramm ökologische Mehrbelastung Produktion Karbonfaser und Produktion Stahl gewichtet nach der ökologischen Priorität (pro kg)

Die ermittelte Größenordnung, in der sich die ökologische Mehrbelastung der Karbonfaserproduktion im Vergleich zur Stahlproduktion bewegt, ähnelt zumindest in der Kategorie „abiotische Rohstoffe“ den Werten aus der Studie des Wuppertals Instituts.

Die Universität Tokio untersuchte den anfallenden Energieverbrauch der Produktion von Stahl und Karbonfaser, um zu eruieren, ob der Einsatz von Karbonfasern in der Automobilindustrie an der Stelle von Stahl und die dadurch einhergehende Gewichtsreduktion den ökologischen Fußabdruck eines Fahrzeugs wesentlich beeinflusst [Suzuki 2005]. Die Motivation für diese Untersuchung bestand darin, dass 84% der ökologischen Belastung eines Autos in der Nutzungsphase entstehen weshalb das Gesamtgewicht den wichtigsten Faktor in der Lebenszyklusrechnung einnimmt. Weiters würden sich auch für den Konsumenten durch den reduzierten Treibstoffbedarf die Kosten reduzieren.

Der Energieaufwand für die Stahlproduktion wird in der Studie der Universität Tokio mit 33 MJ/kg Rohstahl angegeben. Für die Vergütung des Stahls müssen weiters 16 MJ/kg aufgebracht werden. Das ergibt in Summe 49 MJ/kg Stahl, wie er in der Automobilindustrie zum Einsatz kommt.

Von diesen Werten ausgehend, errechneten die Autoren der Studie einen Zielwert, der den Energieaufwand der Karbonfaserherstellung mit 50-55 MJ/kg maximiert, um den massenhaften Einsatz der Karbonfaser in der Automobilindustrie zu rechtfertigen. Jedoch

wurde der Energieaufwand für die Produktion der Karbonfasern mit 286 MJ/kg und zusätzlich für das Epoxidharz mit 76 MJ/kg kalkuliert. Das entspricht einer Mehrbelastung von 639 %. Diese Werte stammen aus dem Jahr 2004.

Fünf Jahre zuvor im Jahr 1999 wurde den Energieaufwand für die Karbonfaserproduktion noch mit 478 MJ/kg berechnet und kommt einer Mehrbelastung von 875 % gleich. Diese hohe Diskrepanz erklären sich die Autoren damit, dass die Technologie der Karbonfaserherstellung im Vergleich zur Stahlproduktion noch in den Kinderschuhen steckt und enormes Entwicklungspotential in der Produktionskette vorhanden ist.

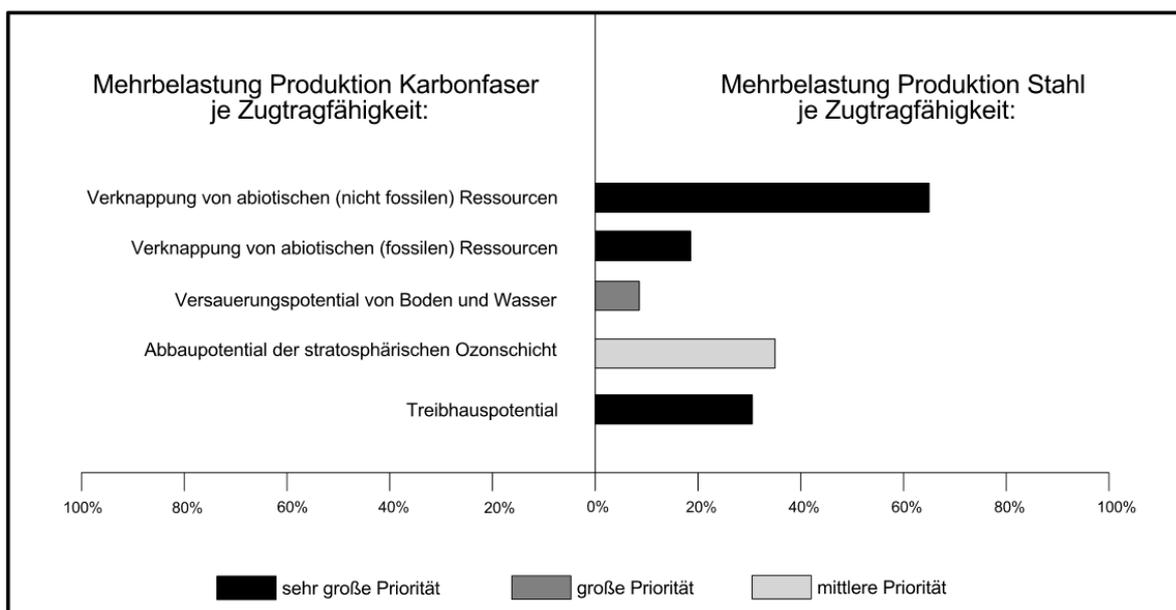
Diese eben angegebenen Werte beziehen sich jedoch auf die Produktion von neuen Karbonfasern mit besonders guten Materialeigenschaften wie sie im Flugzeugbau zur Anwendung kommen. In der Studie wird jedoch auch erwähnt, dass das angestrebte Ziel von 50-55 MJ/kg Karbonfaser für den massenhaften Einsatz in der Automobilindustrie durchaus realisierbar ist. Dazu bedarf es den Gebrauch von Karbonfaser und Matrix von minderer Qualität. Weiters messen die Autoren der Studie der Wiederverwertung und dem Recycling sehr hohes Potential für die Erlangung des angestrebten Zieles bei [Suzuki 2005] [S.17]. Der folgende Abschnitt widmet sich deshalb den möglichen Wegen der Aufbereitung von Karbonfaser – Abfällen.

### **3.15 Ökologische Mehrbelastung je MPa Zugfestigkeit**

Die Auswertung der ELCD – Daten der beiden Baustoffe in Bezug auf deren Zugfestigkeit unter Annahme eines Baustahls mit einer Streckgrenze von 550 MPa [ÖNORM B4707 2017] und Karbonfaser mit einer Zugfestigkeit von 3.500 MPa [Niewels 2009] ergibt eine gänzlich andere Orientierung der Balken im T – Diagramm im Vergleich zur ausschließlichen Betrachtung der ökologischen Auswirkungen durch die Produktion.

	$\Sigma$ Karbonfaser [kg SB-Äqv.]	$\Sigma$ Karbonfaser je MPa [kg SB-Äqv.]	$\Sigma$ Stahl [kg SB-Äqv.]	$\Sigma$ Stahl je MPa [kg SB-Äqv.]	Mehrbelastung [%]
<b>Verknappung von abiotischer Ressourcen (nicht fossiler Ressourcen)</b>	3,28E-03	9,36E-07	1,50E-03	2,72E-06	<b>65,6</b>
<b>Verknappung von abiotischer Ressourcen (fossiler Ressourcen)</b>	8,82E+03	2,52E+0 0	1,69E+0 3	3,08E+0 0	<b>18,0</b>
<b>Versauerungspotential von Boden und Wasser</b>	4,05E-02	1,16E-05	6,90E-03	1,25E-05	<b>7,9</b>
<b>Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht</b>	1,24E-07	3,53E-11	3,04E-08	5,52E-11	<b>36,1</b>
<b>Treibhauspotential</b>	1,03E+01	2,95E-03	2,34E+00	4,25E-03	<b>30,6</b>

**Tab. 15:** Berechnung ökologische Mehrbelastung Produktion Karbonfaser und Produktion Stahl je MPa Zugfestigkeit



**Abb. 7:** T – Diagramm ökologische Mehrbelastung je MPa Zugfestigkeit gewichtet nach der ökologischen Priorität

### 3.16 Recyclingverfahren Karbonfaser

#### 3.16.1 Allgemeines

Auch wenn Carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) durch ihre Materialkombination und ihre feste Anbindung zwischen Carbonfaser und polymerer Matrix an sich kein recyclinggerechtes Material darstellen, sind Recyclingprozesse möglich und aufgrund des Preises von neu hergestellten Carbonfasern auch wirtschaftlich [Meiners, Eversmann 2014] [S.371].

Das Recycling von Carbonfasern und daraus gefertigten CFK – Bauteilen wird im Wesentlichen durch die drei Faktoren Ökologie, Ökonomie und rechtliche Bestimmungen beeinflusst [Meiners, Eversmann 2014] [S.374].

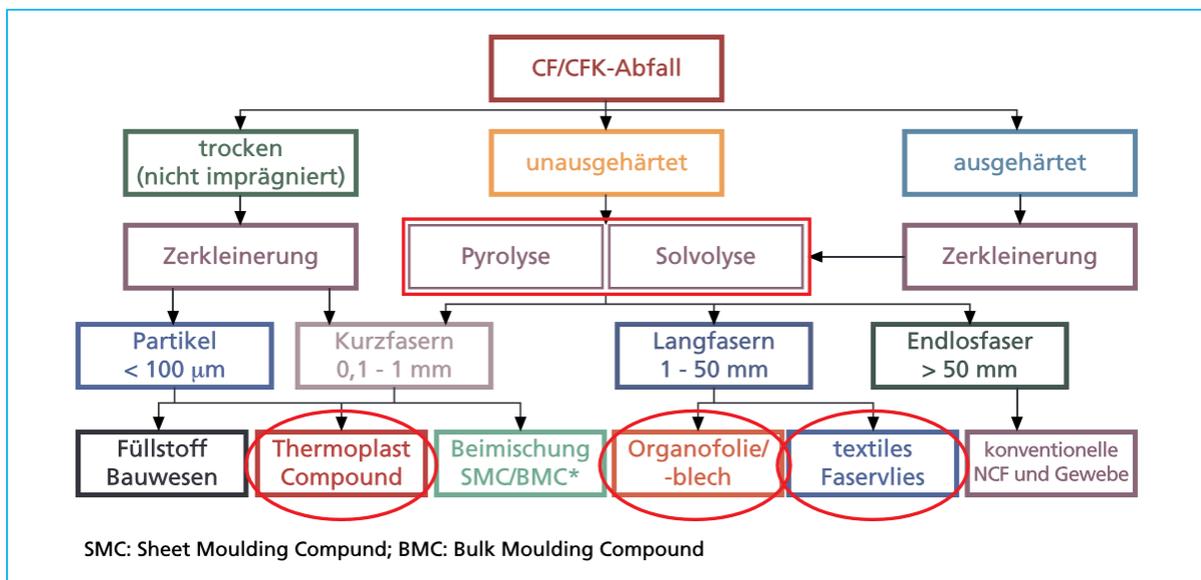
Ökologisch betrachtet bietet sich durch das Recycling die Möglichkeit den hochwertigen aber sehr energieintensiven Rohstoff Carbonfaser wiederzuverwenden und somit den hohen Herstellungsaufwand zu rechtfertigen. Dies trifft auch auf die Fertigung von CFK – Bauteilen zu, dessen Gesamtenergiebilanz durch den Einsatz recycelter Carbonfasern verbessert werden kann. Wie bei den meisten Recyclingmethoden kann auch beim Recycling von Carbonfasern eine Ressourcenschonung bei gleichzeitiger Abfallverringerung und damit einer Entlastung der Umwelt erreicht werden.

Der Austausch der teuren Carbonfasern gegen die günstigeren recycelten Carbonfasern wird als wesentlicher Punkt aus ökonomischer Sicht angesehen. Allerdings können nur geringe Mengen an Recyclat einem Produkt zugefügt werden, da die mechanischen Eigenschaften der recycelten Carbonfasern nicht den Eigenschaften der Neufasern entsprechen. Ökonomisch betrachtet wird durch den Einsatz von recycelten Carbonfasern von einer Reduktion der Entsorgungskosten ausgegangen und es besteht die Möglichkeit der Bildung eines neuen Marktes durch den Verkauf von recycelten Carbonfasern.

Das Recycling wird durch rechtliche Vorgaben beeinflusst. Die Deponierung wird durch das Kreislaufwirtschafts – und Abfallgesetz sowie die Deponieverordnung und europäische Vorgaben reglementiert und stellt die Carbonfaseraufbereitung aufgrund der Komplexität vor große Herausforderungen.

Über den Produktentstehungs – und Lebenszyklus betrachtet fallen besonders während der Herstellung und im Produktbetrieb bis zum Produktende verwertbare Abfälle an. Dabei kann der Abfall in drei Gruppen unterteilt werden. Während der Produktion können fehlerhafte Carbonfasern oder textile Halbzeuge entstehen. Diese sind noch nicht mit einer Matrix benetzt und werden deshalb als trockener Abfall bezeichnet. Ebenfalls zum

trockenen Abfall gehören nicht genutzte Reste, die beim Zuschchnitt der einzelnen Faserlagen entstehen. Als zweite Gruppe entstehen mit Matrix benetzte aber noch nicht ausgehärtete Carbonfaserhalbzeuge. Diese sind fast ausschließlich Prepregs, die entweder fehlerhaft produziert wurden, oder wie beim trockenen Abfall bei Zuschchnitt der einzelnen Laminatlagen entstehen. Die dritte und größte Gruppe an CFK - Abfällen bilden die bereits ausgehärteten Verbundwerkstoffe [Meiners, Eversmann 2014] [S.375].



**Abb. 8:** Verwertungswege von Carbonfaser / CFK Abfall [Meiners, Eversmann 2014] [S.375]

Die trockenen Carbonfaserreste lassen sich vergleichsweise einfach recyceln. Sie werden gemahlen bzw. geschnitten und als Verstärkungsfasern oder Füllstoffe in Spritzgussgranulaten, Pressmassen sowie in Bauprodukten eingesetzt. Für den Bereich des Faserrecyclings ohne Harzreste wurden bereits kommerzielle Recyclingverfahren entwickelt. Die Fa. Hadeq recycling in Stade mahlt die Endlosfasern je nach Anwendung des Endverbrauchers auf eine mittlere Länge von 0,2 bis 0,5 mm.

Diese Kurzfasern werden heute meist thermoplastischen Kunststoffen als Verstärkungsmaterial beigemischt. Problematisch ist bei diesem Verfahren die Mahlung auf eine größere Faserlänge, da die Fasern in einem vorgeschalteten Schredder sehr stark beansprucht werden, so dass z.T. die Schlichte abplatzt und sich Fasern verknoten können.

Für das Recycling von benetzten Carbonfasern die sowohl unausgehärtet als auch als fertiges CFK - Bauteil vorliegen, sind derzeit besonders zwei Verfahren von Interesse. Beide Verfahren zählen zu den thermisch - chemischen Aufbereitungsmöglichkeiten und ermöglichen die Trennung der Carbonfaser von der Matrix.

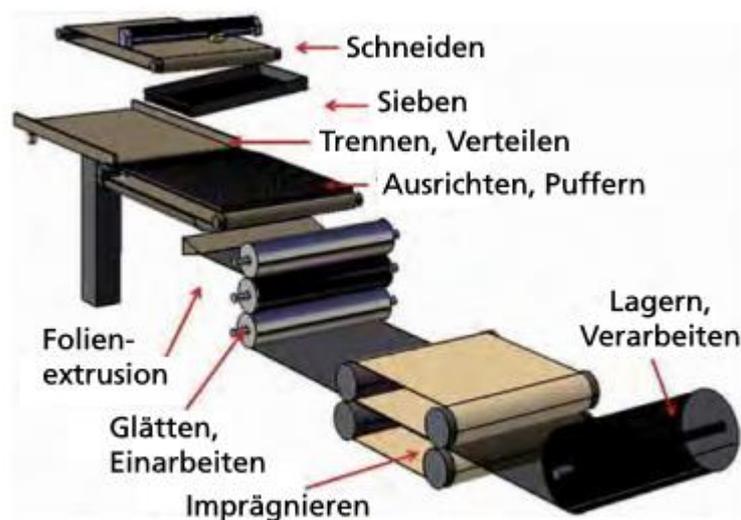
Bei der Pyrolyse nutzt man die deutlich unterschiedlichen Zersetzungstemperaturen von Carbonfasern (3.600 °C) und der sie umgebenden Matrices (i.A. < 600 °C), um eine Trennung auf thermischem Weg durchzuführen. Hierbei ist zu beachten, dass Carbonfasern ab einer Temperatur von 600 °C eine hohe Oxidationsneigung haben, die sich extrem negativ auf ihre mechanischen Eigenschaften auswirkt. Nur unter Inertgasatmosphäre können Carbonfasern ohne deutlichen Gewichts- und Qualitätsverlust höheren Temperaturen widerstehen. Bei allen thermischen Aufbereitungsprozessen wird der Kunststoff zersetzt und nur die Carbonfasern zurück gewonnen [Meyer 2011].

Bei der Solvolyse werden superkritische Flüssigkeiten (z.B. superkritisches Propanol) zur Trennung von Faser und Matrix eingesetzt [Hyde 2006]. Hierzu bringt man zerkleinerte Faserverbundabfälle bei erhöhtem Druck und Temperatur mit Propanol in einen Reaktor ein. Im superkritischen Zustand ist das Propanol in der Lage die Matrix fast vollständig von der Faser zu lösen. Die im Propanol gelösten Matrixbestandteile können als Rohstoff in der chemischen Industrie weiterverarbeitet werden. Das Lösungsmittel muss hierbei auf die Matrix abgestimmt werden. Im Vergleich zur Pyrolyse hat die Solvolyse ein geringeres Energieniveau, erfordert aber weitere Aufbereitungsschritte (Reinigen, Waschen, Trocknen, Lösungsmittelaufbereitung) und ist nicht auf jedes Matrixsystem anwendbar.

Die aus der Pyrolyse und Solvolyse gewonnenen Carbonfasern sind nach weiterer Zerkleinerung beispielsweise als Verstärkungskomponente von thermoplastischen Polymeren geeignet. Durch die Herstellung eines spritzgießfähigen Compounds mit recycelten Carbonkurzfasern erfolgt die Rückführung in neue Kunststoffprodukte. Eine Alternative dazu ist die Herstellung von flächigen textilen Halbzeugen aus recycelten Carbonlangfasern. Besonders erfolgversprechend ist hierbei die Herstellung von Vliesen aus recycelten Carbonfasern. Diese Carbonfaservliese weisen zwar keine vergleichbaren mechanischen Eigenschaften im Verbund auf wie neue Wirrfasermatten, trotzdem können sie zur Verbesserung der Oberflächenqualität in gewebeverstärkten CFK-Bauteilen oder für Verklebungselemente eingesetzt werden [Meiners, Eversmann 2014] S.376].

Eine weitere Möglichkeit der Anwendung von recycelten Carbonlangfasern ist die Organofolie. Dabei werden vor allem aus trockenem Faserverschnitt einzelne Faserabschnitte gerichtet auf eine PET-Folie aufgebracht, anschließend konsolidiert und so zu einem thermoplastischen Halbzeug verarbeitet. Im Prozess werden die Carbonfasern bzw. Gewebereste zunächst durch eine Schnittwalze oder einen herkömmlichen CNC - Cutter auf eine für die Folgeprozesse geeignete Größe zugeschnitten. Kleinere Abschnitte fallen

durch ein Sieb und können anderen Anwendungen zugeführt werden. Durch Vibrationstechnik werden die trockenen Gewebe- und Gelegezuschnitte zu einzelnen Rovings aufgelöst. Die Fasern werden durch die Vibration einheitlich ausgerichtet und einer extrudierten, noch nicht erstarrten Polymerfolie zugeführt. Die Folie wird unmittelbar nach der Düse mit den einheitlich ausgerichteten Langfasern belegt und durchläuft zur vollständigen Imprägnierung eine Doppelbandpresse oder einen Kalandrier. Die so entstandene Organofolie kann beispielsweise im Thermoformprozess zu neuen Bauteilstrukturen verarbeitet werden.



**Abb. 9:** Produktionsschema Organofolie [Meiners, Eversmann 2014] [S.377]

Des Weiteren können ausgehärtete Prepregs, Ausschussteile und Post-Consumer-Abfälle einem reinen Partikelrecycling unterzogen werden. Hierbei wird der Verbund zerkleinert und neuen duromeren Faserverbundmaterialien wie Sheet Moulding Compounds (SMC) oder Bulk Moulding Compounds (BMC) als Füllstoff aus Carbonfaser und Matrix zugesetzt. Diese Variante kann bei Beton zum Beispiel angewendet werden. Das Partikelrecycling stellt die einfachste Methode zum Recyceln von ausgehärteten Verbunden dar und ist für große Mengen geeignet, jedoch wird es dem hochwertigen Ausgangsmaterial Carbonfaser durch das starke Downcycling nicht gerecht.

Für den derzeit noch geringen Anteil an thermoplastischen CFK besteht die Möglichkeit das Material zu granulieren, erneut einzuschmelzen und zu einem neuen Bauteil zu verarbeiten. Es muss jedoch beachtet werden, dass durch die hohe Scherbeanspruchung im Extrusions- und Spritzgussprozess die Fasern stark eingekürzt werden und dass viele Thermoplaste nicht miteinander mischbar sind. Eine sortenreine Trennung nach Mat-

rixmaterialien ist hier notwendig. Hinzu kommt, dass Kunststoffe altern und sich hierdurch ihre Eigenschaften (z.B. Schlagzähigkeit) verschlechtern können [Meiners, Eversmann 2014] [S.378].

### **3.16.2 Fazit**

Bei Bauteilen aus CFK handelt es sich um hochwertige, langlebige Komponenten mit einer Lebenserwartung von mindestens 10 bis 30 Jahren. Da es erst in dieser Zeitspanne zu einem verstärkten Einsatz von CFK in Bauteilen kommen wird, ist in den nächsten Jahren mit einer stark steigenden Menge an zu recycelnden Carbonfasern zu rechnen, die die Kapazität der bestehenden Anlagen überschreitet.

Aufgrund der Zunahme der CFK – Abfallmengen und den hohen Herstellungskosten ist das Recycling von CFK sinnvoll und nötig. Bei den bestehenden Verfahren scheinen die Solvolyse und die Pyrolyse die erfolgversprechendsten Verfahren zu sein. Es ist aber weiter von einem Downcycling der wiederaufbereiteten Carbonfasern auszugehen. Die Hauptanwendungen werden vor allem bei thermoplastischen Halbzeugen wie Organofolien und der Herstellung von Faservliesen mit Wirrfaserverstärkung gesehen. Damit ein erfolgreicher Wiedereinsatz in CFK-Bauteilen wirtschaftlich möglich ist, müssen die Recyclingprozesse optimiert werden und Anwendungen mit einem Alleinstellungsmerkmal für recycelte Carbonfasern gefunden werden [Meiners, Eversmann 2014] [S.378].

## Teil 4

### Auswertung

#### 4 Anwendung der EPD – Daten an baustatischen Aufgabenstellungen

Das folgende Kapitel benutzt die berechneten Kennwerte aus dem 3. Teil dieser Diplomarbeit und wertet die Ergebnisse anhand von konkreten baustatischen Aufgabenstellungen aus.

Univ. Prof. Johann Kollegger, Dipl. Ing. Dr. techn. Benjamin Kromoser und Dipl. –Ing. Philipp Preinstorfer des Instituts für Tragkonstruktionen an der TU – Wien führten Versuche an CFRP (carbon – fibre – reinforced – polymer) bewehrten T –Trägern und an einem Deckenelement durch [Kromoser 2017]. Ihre Motivation bestand darin, den stetigen Anstieg des weltweiten Betonbedarfs durch einen effizienteren Einsatz des Baustoffes entgegenzuwirken. Durch ihre Forschung erhoffen sich die Autoren den Raubbau der Bauindustrie an der Lithosphäre zu bremsen [Kromoser 2017] [S.1]

##### 4.1 CFRP bewehrte T –Träger

Die Geometrie der von der TU – Wien untersuchten CFRP bewehrten T – Träger stammt aus dem Stahlbau mit der Absicht den möglichst leichtesten Träger zu entwerfen, da diese Träger beispielsweise in der Altbausanierung oder im Hochbau, wo Konstruktionselemente mit geringem Eigengewicht gefragt sind, zum Einsatz kommen könnten. Die Höhe wurde mit 260 mm und die Breite mit 300 mm festgelegt. Es wurden zwei Trägertypen entworfen, die sich in der Ober – und Untergurt sowie in der Stegdicke unterscheiden. Die Stegdicke des kleineren Trägers wurde aufgrund von fertigungstechnischen Gegebenheiten mit 30 mm gewählt. Die Stegdicke der Konfiguration 2 beträgt 40 mm. Weiteres Unterscheidungsmerkmal der beiden Versuchskörper betrifft die Bewehrung in der Zugzone. Der kleinere Träger wurde mit 2ø8 und der größere mit 2ø10 CFRP – Stäben bewehrt. Weiters wurden die Trägerkonfigurationen mit Bewehrungsmatten der Fa. solidian GmbH des Typs Q95/95 – CCE – 38 bewehrt. Als Betonsorte wählte man Ultrahochfesten Beton (UHPC – Ultra High Performance Concrete) [Kromoser 2017] [S.13].

	$f_{c,mean}$	$f_{c,k}$	$\gamma_c$	$f_{c,d}$	$E_{cm}$	$\epsilon_{c,mean}$	$\epsilon_{c,d}$
UHPC	170,6 MPa	155,0 MPa	1,5	103,3 MPa	54,483 MPa	2,5 mm/m	2 mm/m

**Tab. 16:** Materialeigenschaften UHPC [Kromoser 2017][S.10]

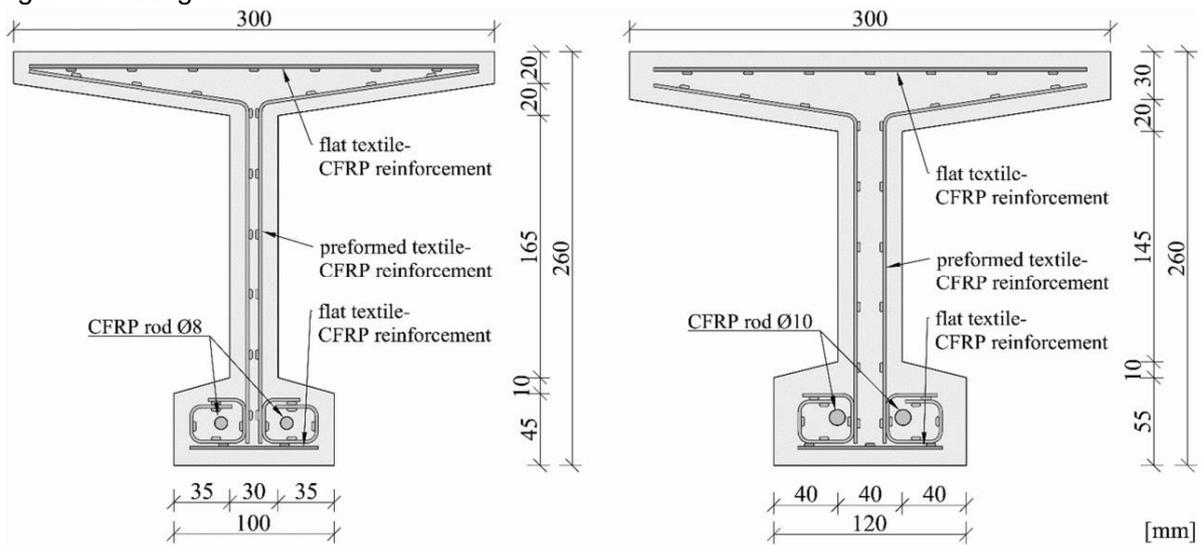
<b>solidian GRID</b>	$f_{t,mean}$	$f_{t,k}$	$\gamma_t$	$f_{t,d}$	$E_{textile}$	$\epsilon_{r,mean}$	$\epsilon_{r,d}$
Q95/95 - CCE - 38	2.824 MPa	2.300 MPa	1,2	1.917 MPa	230.500 MPa	12,3 mm/m	8,3 mm/m

**Tab. 17:** Materialeigenschaften textile CFRP Bewehrung [Kromoser 2017][S.10]

	$f_{t,mean}$	$f_{t,k}$	$\gamma_t$	$f_{t,d}$	$E_{textile}$	$\epsilon_{r,mean}$	$\epsilon_{r,d}$
Karbonbewehrungsstab $\varnothing 8$ mm	2.048 MPa	1.680 MPa	1,25	1.400 MPa	161.000 MPa	12,72 mm/m	8,7 mm/m
Karbonbewehrungsstab $\varnothing 10$ mm	2.048 MPa	1.680 MPa	1,25	1.400 MPa	161.000 MPa	12,72 mm/m	8,7 mm/m

**Tab. 18:** Materialeigenschaften Karbonbewehrungsstab [Kromoser 2017][S.10]

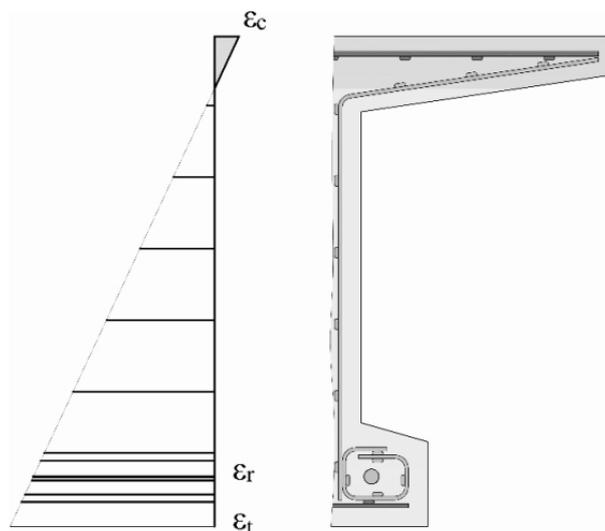
Die Träger wurden für positive Momentenbeanspruchung entworfen. Durch den UHPC – Beton erwarteten sich die Forscher der TU – Wien hohe Widerstandsmomente der beiden Trägertypen aufgrund der hohen Festigkeit in der Druckzone. Die Betondeckung wurde für beide Konfigurationen mit 10 mm gewählt. Die folgenden Abbildungen zeigen den Querschnitt der beiden Trägertypen, sowie den Bewehrungskorb und die fertigen Trägertypen nach dem Entfernen der Schalung.



**Abb. 10:** Querschnitt der beiden Trägerkonfigurationen: Konfiguration 1 (links); Konfiguration 2 (rechts) [Kromoser 2017][S.14]

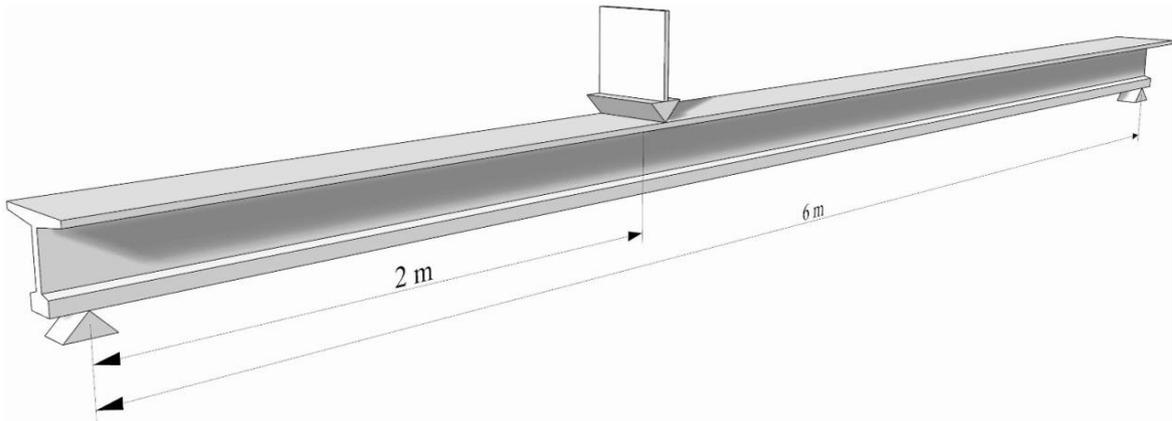


**Abb. 11:** Bewehrungskorb (links); Konfiguration 1 und 2 (rechts) [Kromoser 2017][S.14]



**Abb. 12:** Dehnungsverlauf des T – Trägers Konfiguration 1 unter einachsiger positiver Momentenbeanspruchung [Kromoser 2017][S.14]

Die Leistungsfähigkeit der beiden T – Träger wurde anhand von einem Einfeldsystem mit einer Spannweite von 6 m unter einer Einzellast im Drittelpunkt mit Hilfe der nichtlinearen Finite Elemente Methode (FEM) untersucht. Mit diesem statischen System (folgende Abbildung) wollten die Forscher das Tragverhalten der beiden Prototypen unter der Beanspruchung eines kreuzenden Trägers analysieren [Kromoser 2017][S.15].



**Abb. 13:** Statisches System für die Traglastberechnung mittels FEM der T – Träger Konfigurationen [Kromoser 2017][S.15]

Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der Berechnung der Momentenbeanspruchung unterteilt in Gebrauchs ( $M_{r,k}$ ) – und Traglastniveau ( $M_{r,d}$ ).

	<b>Bewehrungs- matte</b>	<b>Bewehrungs- stab</b>	<b><math>M_{r,k}</math></b>	<b><math>M_{r,d}</math></b>
Konfiguration 1	Typ 1	Ø8	77,39kNm	52,28kNm
Konfiguration 2	Typ 1	Ø10	102,64kNm	69,25kNm

**Tab. 19:** Berechnete Momententragfähigkeit der beiden T – Träger Konfigurationen [Kromoser 2017][S.15.]

#### 4.1.1 Massenermittlung der beiden T – Träger Konfigurationen

Kromoser beziffert das Gewicht der Mattenbewehrung Q95/95 – CCE – 38 mit  $0,67 \text{ kg/m}^2$ . Der Bewehrungsstab  $\text{Ø}8$  hat eine Gewicht von  $0,12 \text{ kg/lfm}$  bzw.  $\text{Ø}10$  von  $0,18 \text{ kg/lfm}$ . Daraus ergeben sich folgende Massen für das statische System in Abbildung 13 mit einer Trägerlänge von 6 m.

Bauteil	Betonkubatur [m <sup>3</sup> ]	Mattenbewehrung [m <sup>2</sup> ]	Bewehrungsstab [m]	Mattenbewehrung [kg]	Bewehrungsstab [kg]	Σ [kg]
Konfiguration 1	0,116	7,8	12	5,3	1,4	6,7
Konfiguration 2	0,154	8,1	12	5,4	2,2	7,6

Tab. 20: Massenermittlung der beiden Trägerkonfigurationen

#### 4.2 Bewehrungsstahl bewehrter Träger

Um eine Aussage über die ökologische Belastung der beiden CFRP – bewehrten T – Träger treffen zu können, wird im folgenden Abschnitt ein mit Stabstahl bewehrter Rechteckquerschnitt mit gleichen Traglastmoment aus der T - Träger Konfiguration 1 ( $M_{r,d} = 52,28 \text{ kNm}$ ) entworfen. Das statische System wird gleich wie in Abbildung 13 gewählt. Der Querschnitt wird dabei so konzipiert, dass keine Bewehrung in der Druckzone erforderlich ist. Die Berechnung erfolgt mit einer im Hochbau typischen Betonqualität C30/37. Der Bewehrungsstahl wird nach ÖNORM B4707 mit der Güte BSt 550 gewählt [ÖNORM B4707 2017].

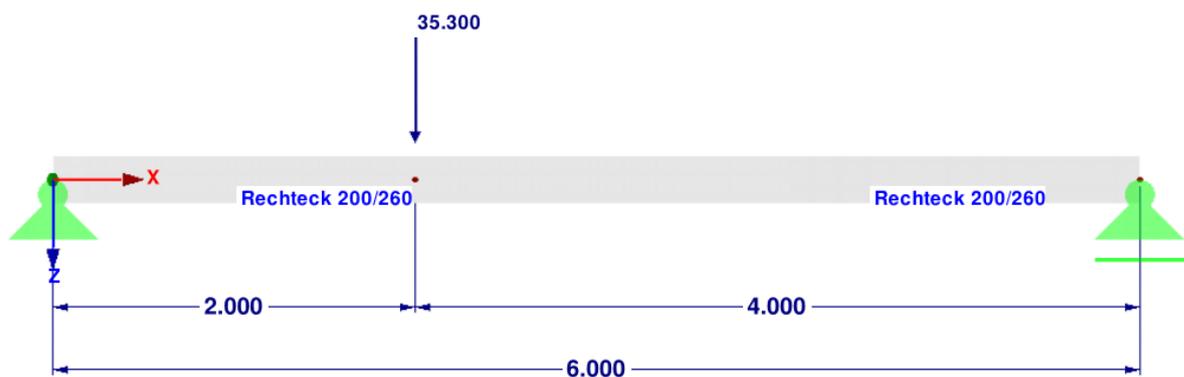


Abb. 14: statisches System Rechteckquerschnitt 20/26 cm

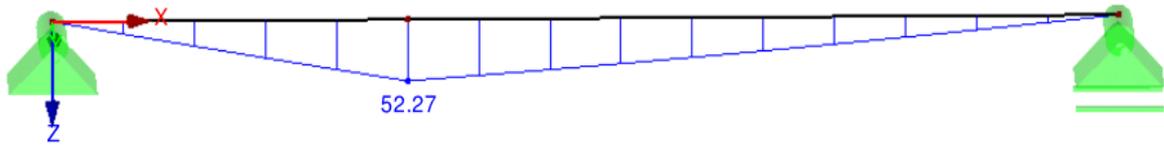


Abb. 15: einwirkendes Bemessungsmoment:  $M_{y,ed}$

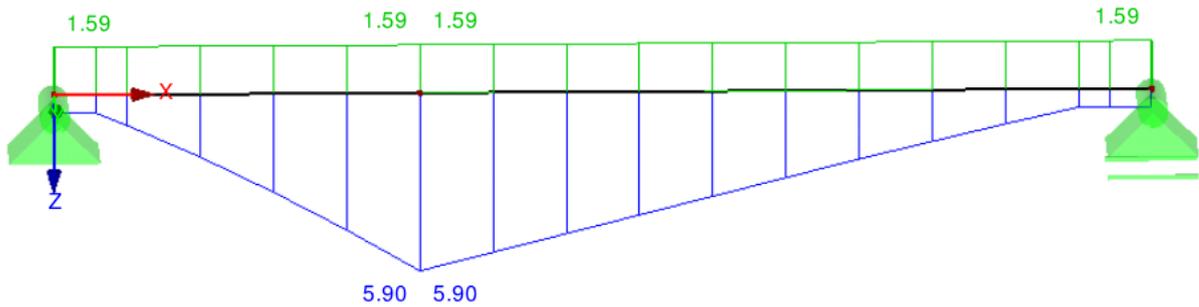


Abb. 16: erforderliche Längs- und Bügelbewehrung

Die Bemessung ergibt folgende Ergebnisse:

Querschnittsabmessungen:  $b/h = 20/26$  cm

	$A_{s,erf.}$ [cm <sup>2</sup> ]; [cm <sup>2</sup> /m+s]	Wahl	$A_{s,vorh.}$ [cm <sup>2</sup> ]; [cm <sup>2</sup> /m+s]
Hauptbewehrung	5,9	3 $\emptyset 16$	6,0
Bügelbewehrung	1,59	$\emptyset 8/19$	2,65

Die Abstufung der Hauptbewehrung erfolgt dabei wie folgt:

- 1  $\emptyset 16$  à 6 m
- 2  $\emptyset 16$  à 4,2 m

Die konstruktive Bewehrung aus Stabstahl und Randeinfassung setzt sich wie folgt zusammen:

- 4  $\emptyset 8$  à 6 m
- 2  $\emptyset 8$  à 4,8 m
- 6Bü  $\emptyset 8$  à 0,65 m

Die folgende Tabelle stellt eine Zusammenfassung der benötigten Beton – und Bewehrungsstahlmassen dar.

Bauteil	Betonku- batur [m <sup>3</sup> ]	Hauptbew. Ø16 [m]	Konstruk- tiv.bew. ø8 [m]	Hauptbew. [kg]	Konstruk- tiv.bew. [kg]	Σ Be- weh- rung [kg]
Rechteck- querschnitt 20/26	0,31	14,4	37,5	22,8	14,8	37,6

Tab. 21: Massenermittlung des Rechteckquerschnitts 20/26 cm

#### 4.3 Vergleich der ökologischen Auswirkung des CFRP – T – Trägers Konfiguration 1 mit Rechteckquerschnitt

Für die Berechnung der ökologischen Auswirkungen des mit karbonfaserverstärkten T – Trägers Konfiguration 1 und des Rechteckquerschnittes auf Grundlage der berechneten Werte aus Teil 3, muss die ökologische Mehrbelastung aus Abbildung 6 in einen Äquivalenzwert transferiert werden, um die ermittelten Massen aus Abschnitt 4.1 und 4.2 vergleichen zu können. Als Äquivalenzwert wird dazu die Einheit „kg Stahl äquiv.“ eingeführt. Die Abbildung 6 wird nun auf den Referenzwert der ökologischen Auswirkungen durch die Produktion von 1,0 kg Karbonfaser in die Einheit „kg Stahl äquiv.“ umgewandelt, um den Referenzwert der ökologischen Belastung durch die Stahlproduktion in den verschiedenen Wirkungskategorien zu erhalten.

<b>Wirkungskategorie</b>	<b>„kg Stahl äquiv.“</b>
Verknappung von abiotischen (nicht fossilen) Ressourcen	2,2
Verknappung von abiotischen (fossilen) Ressourcen	5,2
Versauerungspotential von Boden und Wasser	5,9
Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht	4,1
Treibhauspotential	4,4

**Tab. 22:** Äquivalenztabelle der ökologischen Auswirkung der Stahlproduktion in „kg Stahl equiv.“; Basiswert: Produktion von 1,0 kg Karbonfaser

Auf Grundlage dieser Äquivalenzeinheit können die ermittelten Massen verglichen werden.

Die Bewehrung des T – Trägers hat ein Gewicht von 6,7 kg. Dieser Wert umgerechnet in „kg Stahl äquiv.“ in den gewählten Wirkungskategorien wird in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

<b>Wirkungskategorie</b>	<b>„Faktor kg Stahl äquiv.“</b>	<b>„kg Stahl äquiv.“</b>
Verknappung von abiotischen (nicht fossilen) Ressourcen	2,2	14,7
Verknappung von abiotischen (fossilen) Ressourcen	5,2	34,8
Versauerungspotential von Boden und Wasser	5,9	39,5
Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht	4,1	27,5
Treibhauspotential	4,4	29,5

**Tab. 23:** Äquivalenztabelle der ökologischen Auswirkung der Produktion von 6,7 kg textiler Karbonbewehrung in „kg Stahl äquiv.“

Die Massenermittlung aus 4.2 hat eine benötigte Stahlmenge von 37,6 kg für den Rechteckquerschnitt 20/26 cm ergeben. Diese Menge wird in der folgenden Tabelle mit den Werten der Äquivalenztabelle aus Tabelle 23 verglichen, um das Einsparungspotential bzw. die Mehrbelastung in den Wirkungskategorien auf Basis des karbonfaserbewehrten T – Trägers zu erhalten.

Wirkungskategorie	T- Träger [„kg Stahl äquiv.“]	Rechteckquer- schnitt [kg Stahl]	Einsparungspo- tential/ Mehr- belastung [%]
Verknappung von abiotischen (nicht fossilen) Ressourcen	14,7	37,6	60,9
Verknappung von abiotischen (fossilen) Ressourcen	34,8	37,6	7,4
Versauerungspotential von Boden und Wasser	39,5	37,6	5,1
Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht	27,5	37,6	26,9
Treibhauspotential	29,5	37,6	21,5

**Tab. 24:** Berechnung des Einsparungspotentials bzw. Mehrbelastung der Bewehrung in den Wirkungskategorien der beiden Vergleichsquerschnitte

Die Forschungsfrage dieser Diplomarbeit widmet sich dem Thema, ob der Einsatz von Karbonfasern als Bewehrung in einer Betonkonstruktion an der Stelle des klassischen Bewehrungsstahls zukunfts-potential hat. Das berechnete Trägerbeispiel, dessen Ergebnisse in Tabelle 24 zusammengefasst sind, zeigt ganz klar auf, dass es großes Einsparungspotential in den gewählten Wirkungskategorien gibt. Vor allem in der Kategorie „Verknappung von abiotischen (nicht fossiler) Ressourcen“ ergibt die Berechnung eine Einsparung von rund 60 %. Dieser Umstand ist an erster Stelle den nötigen Erzen für die Stahlerzeugung geschuldet.

Die berechnete Einsparung von 21,5 % in der Wirkungskategorie „Treibhauspotential“ gibt vor allem unter dem Gesichtspunkt Anlass die Forschung voranzutreiben, da es sich bei der Karbonfaserherstellung im Vergleich zur Stahlerzeugung um eine noch vergleichsweise junge Technologie handelt und daher noch Steigerungspotential in Energie – und Rohstoffeffizienz sowie in den Recyclingverfahren vorhanden ist.

Das in der Tabelle 24 berechnete Einsparungspotential betrifft rein die Herstellung der Karbonfaser. Daher müssen die ökologischen Auswirkungen der Herstellung der Epoxidharzmatrix in die Vergleichsrechnung noch miteinbezogen werden. Das Wuppertal Insti-

tut beziffert den Verbrauch mit 14,3 Tonnen an abiotischen Ressourcen für die Produktion von einer Tonne Epoxidharz [Stiller 1999] [S.16]. Für die Fertigung von einer Tonne Karbonfaser werden 61,1 Tonnen an abiotischen Ressourcen benötigt. Die Universität von Tokio berechnet den Energieaufwand der Epoxidharzproduktion mit 76 MJ/kg und den der Karbonfaserherstellung mit 286 MJ/kg [Stiller 1999] [S.13]. Auf Grundlage dieser Werte können die ökologischen Auswirkungen sowie der Energieaufwand der Epoxidharzproduktion vereinfacht auf 25 % der Karbonfaserherstellung geschätzt werden und hebt daher das in der Tabelle 24 berechnete Einsparungspotential in den Wirkungskategorien „Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht“ und „Treibhauspotential“ auf. In der Kategorie „Verknappung von abiotischen (fossilen) Ressourcen“ wird aus dem Einsparungspotential von rund 7 % eine Mehrbelastung von 15 % durch den Anteil der Epoxidharzproduktion. Die Berechnung des Einsparungspotential bzw. der Mehrbelastung unter Berücksichtigung der Produktion des Epoxidharzes ist in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Wirkungskategorie	T- Träger [„kg Stahl äqv.“]	Rechteckquer- schnitt [kg Stahl]	Einsparungspo- tential/ Mehr- belastung [%]
Verknappung von abiotischen (nicht fossilen) Ressourcen	18,4	37,6	51,1
Verknappung von abiotischen (fossilen) Ressourcen	43,5	37,6	15,7
Versauerungspotential von Boden und Wasser	49,5	37,6	31,7
Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht	34,4	37,6	8,5
Treibhauspotential	36,9	37,6	1,8

**Tab. 25:** Berechnung des Einsparungspotentials bzw. Mehrbelastung inkl. Anteil Epoxidharz in den Wirkungskategorien der beiden Vergleichsquerschnitte

Beim Vergleich der Betonkubatur der beiden Trägerkonfigurationen wird das Einsparungspotential des mit karbonfaserbewehrten T – Trägers deutlich. Für diese Konfigura-

tion sind für das gewählte statische System 0,116 m<sup>3</sup> Beton erforderlich. Der konventionell mit Bewehrungsstahl bewehrte Rechteckquerschnitt benötigt für das gleiche Tragmoment 0,312 m<sup>3</sup> Beton. Das entspricht einer Einsparung von rund 60 % der T – Träger Konfiguration. Jedoch ist zu beachten, dass in der Gegenüberstellung dieser beiden Systeme zwei unterschiedliche Betonqualitäten gewählt wurden.

Die UHPC – Mischung der mit karbonfaserbewehrten T – Träger Konfiguration setzt sich wie folgt zusammen:

Inhaltsstoffe	Menge
Wasser	10 kg
Fließmittel 1: ACE 430	40 kg
Fließmittel 2: ACE 430	20 kg
Konsistenzhalter: Sky 911	1 kg
Zement: CEM I 52,5 NC3A – frei	750 kg
Entlüfter: DF 370	40 kg
Microsilica slurry: EMSAC 500	310 kg
Dolomitmehl	200 kg
Quarzsand 1 ( 0,1 – 0,5mm)	490 kg
Quarzsand 2 ( 1,0 – 1,6mm)	490 kg

**Tab. 26:** Zusammensetzung UHPC (pro m<sup>3</sup>); T – Träger Konfiguration 1 [Kromoser 2017][S.5]

Um ein Aussage über die Umweltwirkungen der beiden Träger treffen zu können, muss die Zusammensetzung der UHPC – Mischung einer genauen Untersuchung der Umweltwirkungen unterzogen werden, da davon auszugehen ist, dass die hohe Menge an Zement mit einem Portlandzementklinkeranteil von > 95 %, sowie die eingesetzten Fließmittel und der Quarzsand einen wesentlich höheren Energie – und Ressourceneinsatz benötigen, als die Betonrezeptur des Vergleichsträgers mit der gewählten Betongüte C30/37. Die Mischung des gewählten C30/37 setzt sich wie folgt zusammen.

Inhaltsstoffe	Menge
Wasser	180 kg
Zement: CEM II 42,5 - N	320 kg
Flugasche	60 kg
Sand: B32	650 kg
Gesteinskörnung: B32	1250 kg

**Tab. 27:** Zusammensetzung C30/37 (pro m<sup>3</sup>); Rechteckquerschnitt

Der Vergleich der beiden Betonrezepturen erfolgt mit Hilfe des „Life Cycle Analyzers“. Das Programm berechnet und vergleicht die ökonomischen und ökologischen Parameter von Betonrezepturen nach DIN EN 15804 [BASF 2018]. Die Modellierung des Lebenszyklus für die Herstellung bis zur Entsorgung erfolgt mit der von der Fa. „PE INTERNATIONAL AG“ entwickelten Software GaBi5 [BASF 2018]. Die Eingabevariablen in die Berechnung sind der Wassergehalt, Zementzusammensetzung, Zusatzmittel, Zusatzstoffe, sowie die eingesetzten Sande und Gesteinskörnungen. Des Weiteren werden die Transportwege in der Berechnung berücksichtigt. Bei der Gesteinskörnung wird unterschieden ob es sich um natürliches, gebrochenes oder recyceltes Material handelt.

Bei der Analyse wird davon ausgegangen, dass die beiden Betonrezepturen in Wien eingesetzt werden. Die Transportwege der Zusatzstoffe werden ebenfalls auf diesen Einsatzort ausgelegt. Bei der Gesteinskörnung wird von einem natürlichen Material ausgegangen. Die Berechnung wurde von Herrn Dr. – Ing. Jürgen Huber der Fa. BASF durchgeführt und die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle für die Herstellungsphase A1 – A3 pro m<sup>3</sup> zusammengefasst.

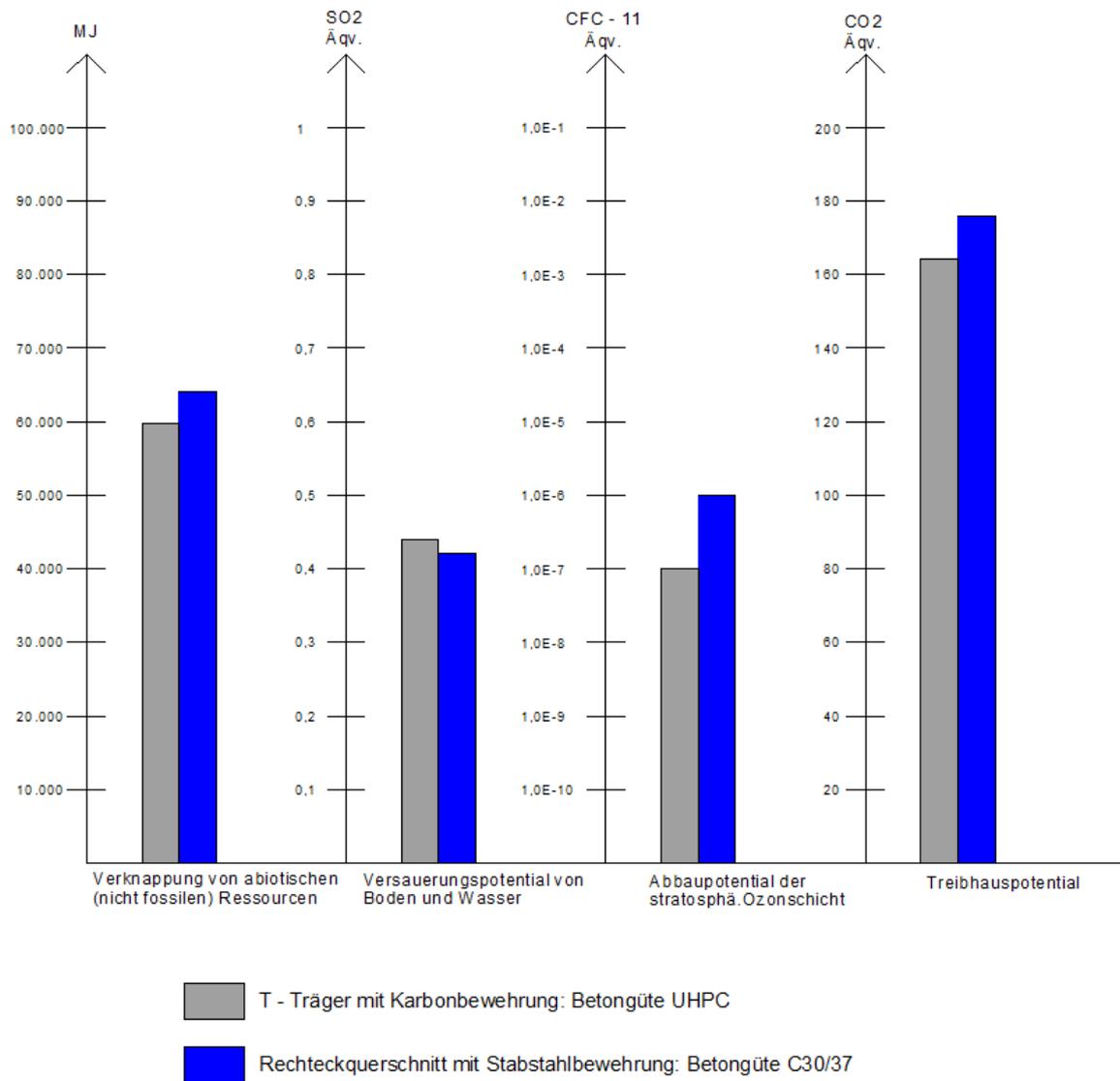
	C30/37 Production (A1 - A3)	UHPC Production (A1 - A3)	Difference in %
PENRT [MJ]	1.53E003	4.99E003	-69.4%
PERT [MJ]	74.8	169	-55.8%
GWP [kg CO <sub>2</sub> -eq.]	286	803	-64.4%
AP [kg SO <sub>2</sub> -eq.]	0.529	1.43	-63%
EP [kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -eq.]	0.0854	0.269	-68.3%
ODP [kg CFC11-eq.]	1.13E-008	2.81E-008	-59.9%
POCP [kg Ethene-eq.]	0.0395	0.156	-74.8%

**Tab. 28:** Vergleich der Betonrezepturen C30/37 u. UHPC pro m<sup>3</sup>; PENRT = Total use of nonrenewable primary energy resources; PERT = Total use of renewable primary energy resources; GWP = Global warming potential; AP = Acidification potential of land and water; EP = Eutrophication potential; ODP = Depletion potential of the stratospheric ozone layer; POCP = Formation potential of tropospheric ozone photochemical oxidations [Huber 2018]

Auf Grundlage der Daten aus Teil 3 und der Lebenszyklusanalyse der beiden Betonmischungen kann nun die Gesamtbilanz der beiden Trägerkonfigurationen erhoben werden. Die Ergebnisse sowie ein zusammenfassendes Balkendiagramm sind in den folgenden beiden Darstellungen abgebildet.

	T- Träger			Rechteckquerschnitt		
	UHPC [m <sup>3</sup> ]	Karbon - bew. [kg]	Σ	C30/37 [m <sup>3</sup> ]	Stahl- bew. [kg]	Σ
Kubatur / Masse	0,116	6,7	-	0,31	37,6	-
Verknappung von abiotischer Ressourcen (fossiler Ressourcen) in MJ	5,79E+02	5,91E+04	<b>5,97E+04</b>	4,74E+02	6,36E+04	<b>6,41E+04</b>
Versauerungspotential von Boden und Wasser in SO <sub>2</sub> - Äqv.	1,66E-01	2,71E-01	<b>4,37E-01</b>	1,64E-01	2,59E-01	<b>4,23E-01</b>
Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht in kg CFC - 11 Äqv.	3,26E-09	1,20E-07	<b>1,23E-07</b>	3,50E-09	1,13E-06	<b>1,13E-06</b>
Treibhauspotential in kg CO <sub>2</sub> - Äqv.	9,31E+01	6,91E+01	<b>1,62E+02</b>	8,87E+01	8,80E+01	<b>1,77E+02</b>

**Tab. 29:** Gesamtbilanz: T – Träger und Rechteckquerschnitt



**Abb. 17:** Balkendiagramm Gesamtbilanz: T – Träger u. Rechteckquerschnitt

Das Balkendiagramm in Abbildung 17 zeigt, dass in den Kategorien „Verknappung von abiotischen (nicht fossilen) Ressourcen“, „Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht“ und „Treibhauspotential“ der karbonbewehrte UHPC T – Träger in der Herstellung geringere Auswirkungen auf die Ökologie hat, als der konventionelle Rechteckquerschnitt.

Des Weiteren wird in den folgenden Abschnitten ein CFRP – Deckenelement mit zwei Stahlbetonmassivdecken, sowie mit einer Cobiax – Flachdecke nach ihrem ökologischen Einfluss verglichen.

#### 4.4 CFRP bewehrtes Deckenelement

Die gewählte Geometrie des von der TU – Wien untersuchten rein aus CFRP verstärkten Deckenelements entstand mit der Absicht ein Plattenelement mit glatter Ober – und Unterseite zu entwerfen. Weitere Anforderungen betrafen ein möglichst geringes Eigengewicht, sowie eine maximale Höhe von 30,0 cm. Die Breite der vorgefertigten Deckenelemente wurde mit 2,4 m gewählt, um die Transportmöglichkeit auf österreichischen Straßen zu wahren. Die Betondeckung des Deckenelements beträgt 10,0 mm, obwohl Versuche zeigten, dass eine geringere Betondeckung durchaus möglich wäre. Beim Gießvorgang des Betons in die Schalung können jedoch aufgrund von Ungenauigkeiten der Bewehrung Probleme entstehen. Die minimale Plattenstärke der zweilagig bewehrten Elemente wurde mit 30,0 mm gewählt. Auf Grund der Anforderung das Eigengewicht möglichst gering zu halten, musste der eingesetzte Beton äußerst effizient eingesetzt werden. Dazu wurde der Großteil des Materials auf der Ober - und Unterseite eingesetzt, um die Druck – und Zugkräfte aus den auftretenden Biegemomenten aufnehmen zu können. Die symmetrische Geometrie erlaubt die Aufnahme von sowohl positiven als auch negativen Momenten. Die idente Querkraftkapazität in Längsrichtung ermöglicht den Einsatz in Einfeld – sowie in Mehrfeldsystemen. Die folgenden Abbildungen zeigen den gesamten Querschnitt des Deckenelements sowie den Querschnitt eines Elements, sowie den CFRP – Bewehrungskorb und den ausgeschalteten Prototypen [Kromoser 2017][S.10].

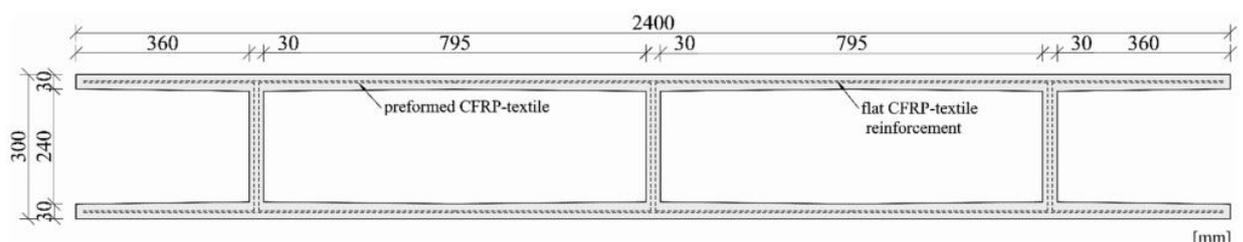


Abb. 18: Querschnitt Deckenelement [Kromoser 2017][S.11]

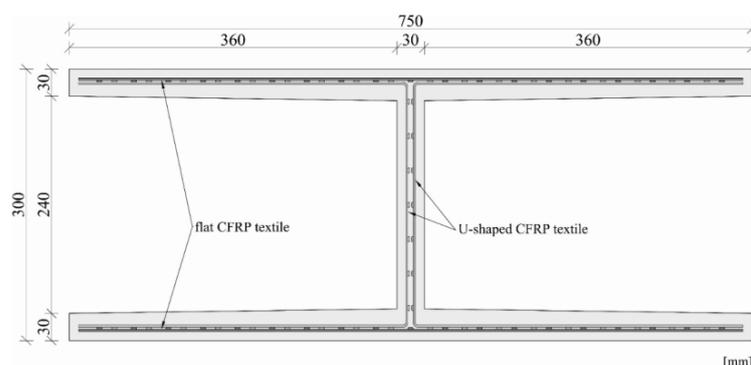
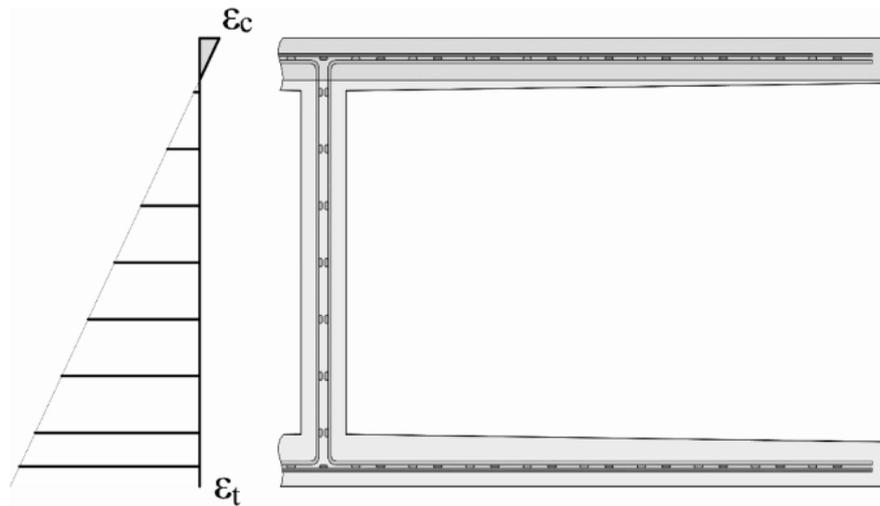


Abb. 19: Querschnitt Einzelement [Kromoser 2017][S.11]

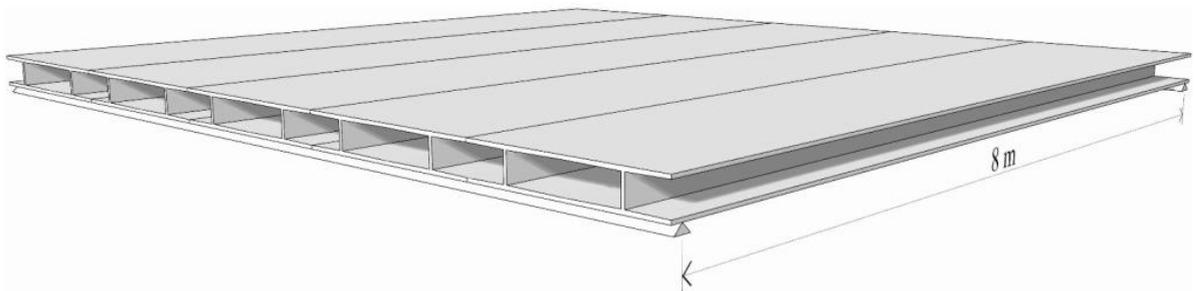


**Abb. 20:** CFRP – Bewehrungskorb (links); ausgeschaltetes Einzelement (rechts) [Kromoser 2017][S.11]

Das untersuchte statische System war ein Einfeldsystem mit einer Spannweite von 8,0 m unter Eigenlast, Bodenaufbau ( $2,0 \text{ kN/m}^2$ ) und Nutzlast ( $3,0 \text{ kN/m}^2$ ).



**Abb. 21:** Dehnungsverlauf unter positiver Biegebeanspruchung [Kromoser 2017][S.12]



**Abb. 22:** statische System CFRP – Deckenelement [Kromoser 2017][S.12]

Die eingesetzten Materialien des Deckenelements sind in den folgenden Tabellen zusammengefasst:

	$f_{c,mean}$	$f_{c,k}$	$\gamma_c$	$f_{c,d}$	$E_{cm}$	$\epsilon_{c,mean}$	$\epsilon_{c,d}$
UHPC	170,6 MPa	155,0 MPa	1,5	103,3 MPa	54,483 MPa	2,5 mm/m	2 mm/m

**Tab. 30:** Materialeigenschaften UHPC [Kromoser 2017][S.10]

<b>solidian GRID</b>	$f_{t,mean}$	$f_{t,k}$	$\gamma_t$	$f_{t,d}$	$E_{textile}$	$\epsilon_{r,mean}$	$\epsilon_{r,d}$
<b>Typ 1:</b> Q95/95 – CCE - 38	2.824 MPa	2.300 MPa	1,2	1.917 MPa	230.500 MPa	12,3 mm/m	8,3 mm/m
<b>Typ 2:</b> Q142/142 – CCE - 25	2.799 MPa	2.300 MPa	1,2	1.833 MPa	176.500 MPa	15,9 mm/m	10,4 mm/m
<b>Typ 3:</b> Q142/142 – CCE - 38	2.620 MPa	2.300 MPa	1,2	1.833 MPa	213.878 MPa	12,4 mm/m	8,6 mm/m

**Tab. 31:** Materialeigenschaften textile CFRP Bewehrung [Kromoser 2017][S.10]

Die Leistungsfähigkeit des Deckensystems wurde rechnerisch anhand von vier unterschiedlichen Konfigurationen mit Hilfe der nichtlinearen Finite Elemente Methode (FEM) untersucht. Zudem wurden die Berechnungen anhand von 1:1 Biegeversuchen evaluiert. Die folgende Abbildung zeigt die Zusammensetzung der verschiedenen Konfigurationen, sowie deren berechnetes Widerstandsmoment im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit.

	<b>U – Form</b>	<b>Eben</b>	$M_{r,mean}$	$M_{r,d}$
Konfiguration 1	Typ 1	Typ 1	120,9 kNm	81,8 kNm
Konfiguration 2	Typ 1	Typ 2	105,6 kNm	71,5 kNm
Konfiguration 3	Typ 1	Typ 3	114,9 kNm	77,3 kNm
Konfiguration 4	Typ 1	2 x Typ 3	165,6 kNm	112,0 kNm

**Tab. 32:** Zusammensetzung der Deckenkonfigurationen inkl. Momententragfähigkeit [Kromoser 2017][S.12]

#### 4.4.1 Massenermittlung der Deckenkonfigurationen

Wie bereits bei dem Trägerbeispiel erfolgt folgend die Massenermittlung der vier verschiedenen unterschiedlichen Deckenkonfigurationen.

Bauteil	Betonkubatur [m <sup>3</sup> ]	U - Mattenbewehrung [m <sup>2</sup> ]	Ebene Mattenbewehrung [m <sup>2</sup> ]	U - Mattenbewehrung [kg/m <sup>2</sup> ]	Ebene Mattenbewehrung [kg/m <sup>2</sup> ]	Σ [kg]
Konfiguration 1	1,3	47	38	0,48	0,48	<b>40,8</b>
Konfiguration 2	1,3	47	38	0,48	0,67	<b>48</b>
Konfiguration 3	1,3	47	38	0,48	0,67	<b>48</b>
Konfiguration 4	1,3	47	76	0,48	0,67	<b>73</b>

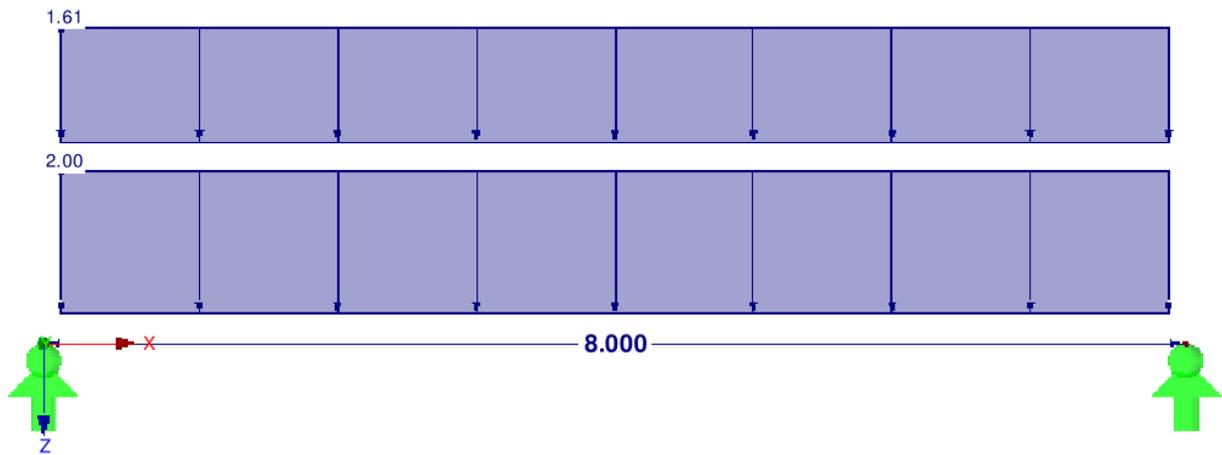
**Tab. 33:** Massenermittlung der unterschiedlichen Deckenkonfigurationen

#### 4.5 Stahlbetonmassivdecke: $M_{e,d} = 112,0$ kNm

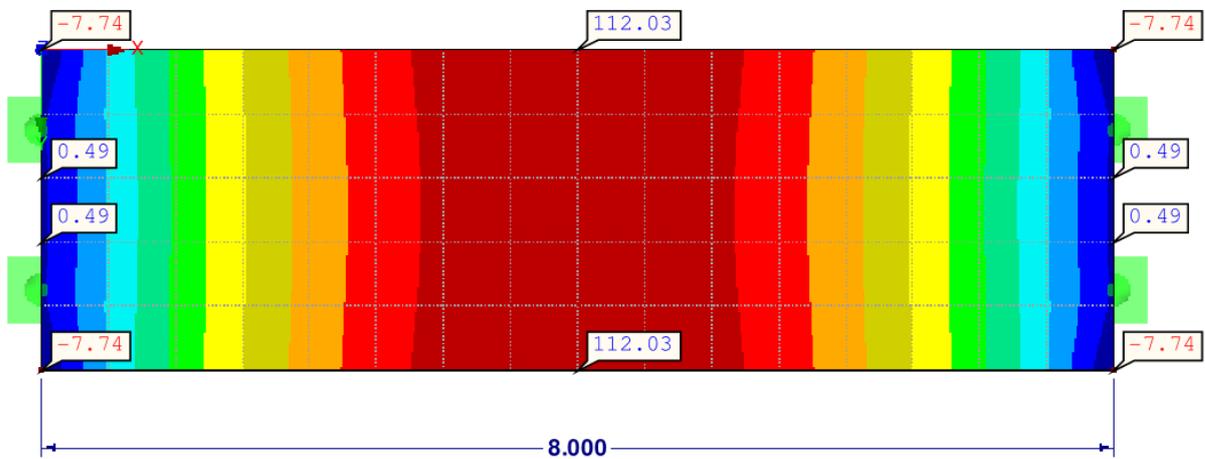
Um eine Aussage über die ökologischen Auswirkungen der CFRP – bewehrten Deckenelemente treffen zu können, wird im folgenden Abschnitt eine mit Stabstahl bewehrte Massivdecke mit dem gleichen Traglastmoment aus der Konfiguration 4 ( $M_{r,d} = 112,0$  kNm) entworfen. Das statische System wird gleich wie in Abbildung 22 gewählt. Die Berechnung erfolgt mit der Betonqualität C30/37. Der Bewehrungsstahl wird nach ÖNORM B4707 mit der Güte BSt 550 gewählt [ÖNORM B4707 2017].

##### 4.5.1 Bemessung Stahlbetonmassivdecke: $M_{e,d} = 112,0$ kNm

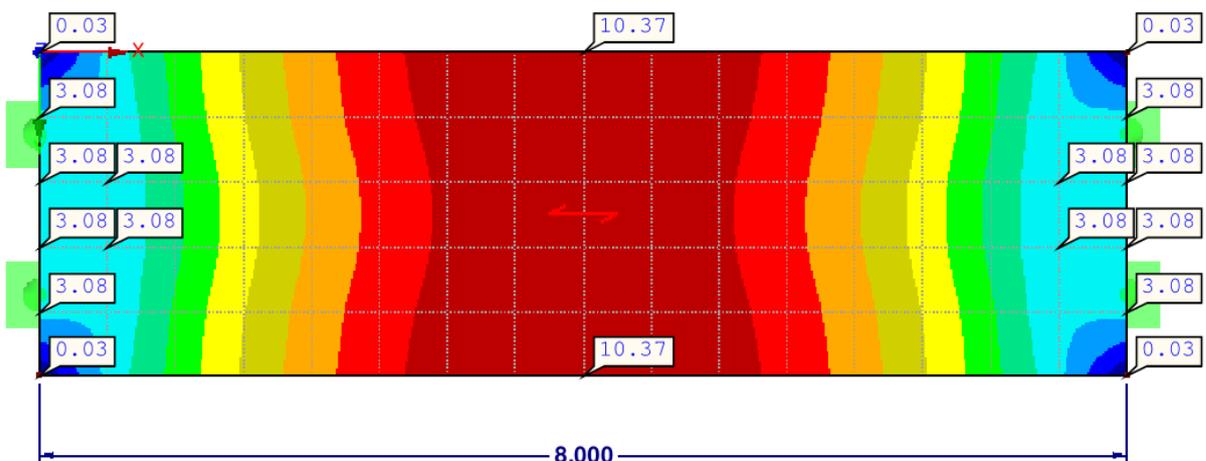
Die Deckenstärke wird so gewählt, dass im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit die Einwirkungen aus Eigengewicht, Bodenaufbau (2,0 kN/m<sup>2</sup>) und Nutzlast die Durchbiegung von  $l/300$  eingehalten wird. Daraus erfolgt eine gewählte Deckenstärke von 26,0 cm. Weiters wird die Nutzlast so gewählt, dass im Grenzzustand der Tragfähigkeit das einwirkende Bemessungsmoment, dem Widerstandsmoment ( $M_{r,d} = 112,0$  kNm) der CFRP Deckenkonfiguration 4 entspricht.



**Abb. 23:** statische System Stahlbetonmassivdecke inkl. Belastung aus Eigengewicht (autom.), Bodenaufbau und Nutzlast



**Abb. 24:** Bemessungsmoment  $M_{e,d}$



**Abb. 25:** erforderliche Bewehrung in x – Richtung (unten)

Die Mindestbewehrung  $a_{s,min}$  beträgt  $3,2\text{cm}^2/\text{m}$  [Eurocode 2 2013]. Um dieser Forderung Rechnung zu tragen wird die obere Lage mit einem Baustahlgitter AQ 65 ( $3,32\text{ cm}^2/\text{m}$ ) BSt 550 bewehrt.

Die Biegemessung in der Zugzone ergibt  $a_{s,erf} = 10,37\text{ cm}^2/\text{m}$ . Dieser Wert wird mit  $\emptyset 12/10$  ( $=11,31\text{ cm}^2/\text{m}$ ) abgedeckt. Aus der Bedingung nach DIN EN 1992-1-1, dass 50% der Feldbewehrung am Auflager zu verankern sind, wird jedes zweite Eisen aus der Feldbewehrung zu den Auflagern geführt ( $= 5,65\text{ cm}^2/\text{m} > a_{s,min}$ ) [Eurocode 2 2013]. Die Verankerungslänge beträgt 43 cm. Daraus ergibt sich eine Bewehrungstahllänge der Feldbewehrung für die Elementbreite von 2,4 m wie folgt:

12 Stück à 6,2 m

12 Stück à 7,94 m

Die Randeinfassungsnadeln werden mit  $\emptyset 12/20$  und einer Gesamtlänge von 104 cm gewählt ( $43+18+43\text{ cm}$ ). Für den Umfang von  $2 \times 8,0\text{ m} + 2 \times 2,4\text{ m} = 20,8\text{ m}$  ergibt sich eine Gesamtanzahl von 104 Randeinfassungen à 1,04 m.

Die folgende Tabelle fasst die benötigten Massen der Stahlbetonmassivdecke mit den Abmessungen  $2,4\text{ m} \times 8,0\text{ m}$  und einem Traglastmoment von  $M_{r,d} = 112\text{ kNm}$  zusammen.

Bauteil	Betonku- batur [m <sup>3</sup> ]	Beweh- rung $\emptyset 12$ [m]	Matte AQ 65 [m <sup>2</sup> ]	Beweh- rung $\emptyset 12$ [kg]	Matte AQ 65 [kg]	$\Sigma$ Beweh- rung [kg]
Massiv- decke 2,4 x 8,0m	5,0	278	19	246	100	346

Tab. 34: Massenermittlung Stahlbetonmassivdecke

#### 4.6 Vergleich der ökologischen Auswirkungen CFRP bewehrtes Deckenelement Konfiguration 4 mit Stahlbetonmassivdecke $M_{e,d} = 112\text{ kNm}$

Der Vergleich der ökologischen Auswirkungen der beiden Deckenelemente wird zuerst wie in Abschnitt 4.3 auf Grundlage einer Äquivalenzeinheit in „kg Stahl äquiv.“ geführt und im Anschluss wird die Gesamtbilanz der beiden Deckensysteme erstellt.

Die Gesamtmasse der CFRP – bewehrten Deckenelements Konfiguration 4 beträgt 73 kg textile Karbonbewehrung. Dieser Wert umgerechnet in „kg Stahl äquiv.“ in den gewählten Wirkungskategorien wird in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Wirkungskategorie	„Faktor kg Stahl äquiv.“	„kg Stahl äquiv.“
Verknappung von abiotischen (nicht fossilen) Ressourcen	2,2	161
Verknappung von abiotischen (fossilen) Ressourcen	5,2	380
Versauerungspotential von Boden und Wasser	5,9	431
Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht	4,1	299
Treibhauspotential	4,4	321

**Tab. 35:** Äquivalenztabelle der ökologischen Auswirkung der Produktion von 73 kg textiler Karbonbewehrung in „kg Stahl äquiv.“

Die Massenermittlung hat eine benötigte Stahlmenge von 346 kg für die Stahlbetonmassivdecke mit einem einwirkenden Bemessungsmoment von  $M_{e,d} = 112,0$  kNm ergeben. Diese Menge wird in der folgenden Tabelle mit den Werten der Äquivalenztabelle aus Tabelle 35 verglichen, um das Einsparungspotential bzw. die Mehrbelastung in den Wirkungskategorien auf Basis des karbonfaserbewehrten Deckenelements zu erhalten.

Wirkungskategorie	CFRP Deckenelement [„kg Stahl äquiv.“]	Stahlbetonmassivdecke [kg Stahl]	Einsparungspotential/ Mehrbelastung [%]
Verknappung von abiotischen (nicht fossilen) Ressourcen	161	346	53
Verknappung von abiotischen (fossilen) Ressourcen	380	346	10
Versauerungspotential von Boden und Wasser	431	346	25
Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht	299	346	14
Treibhauspotential	321	346	7

**Tab. 36:** Berechnung des Einsparungspotentials bzw. Mehrbelastung der Bewehrung in den Wirkungskategorien der beiden Deckenelemente

Wie in Tabelle 36 ersichtlich ist, gibt es ähnlich wie beim Vergleich der ökologischen Auswirkungen der beiden Trägerkonfigurationen aus Abschnitt 4.3 Einsparungspotential in

den gewählten Wirkungskategorien. Vor allem in der Kategorie „Verknappung von abiotischen (nicht fossiler) Ressourcen“ ergibt die Berechnung ein Einsparungspotential von rund 42 %. Dieser Umstand ist wie bereits erwähnt den nötigen Erzen für die Stahlerzeugung geschuldet.

Das berechnete Einsparungspotential aus Tabelle 36 bezieht sich rein auf die Produktion der Karbonfaser und muss daher wie in Abschnitt 4.3 erklärt um 25 % durch die Produktion des Epoxidharzes beaufschlagt werden. Die folgende Tabelle zeigt daher die Berechnung des Einsparungspotentials bzw. der Mehrbelastung inklusive des Anteils des nötigen Epoxidharzes.

Wirkungskategorie	CFRP Deckenelement [„kg Stahl äquiv.“]	Stahlbetonmassivdecke [kg Stahl]	Einsparungspotential/ Mehrbelastung [%]
Verknappung von abiotischen (nicht fossilen) Ressourcen	201	346	42
Verknappung von abiotischen (fossilen) Ressourcen	475	346	37
Versauerungspotential von Boden und Wasser	539	346	56
Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht	374	346	8
Treibhauspotential	401	346	16

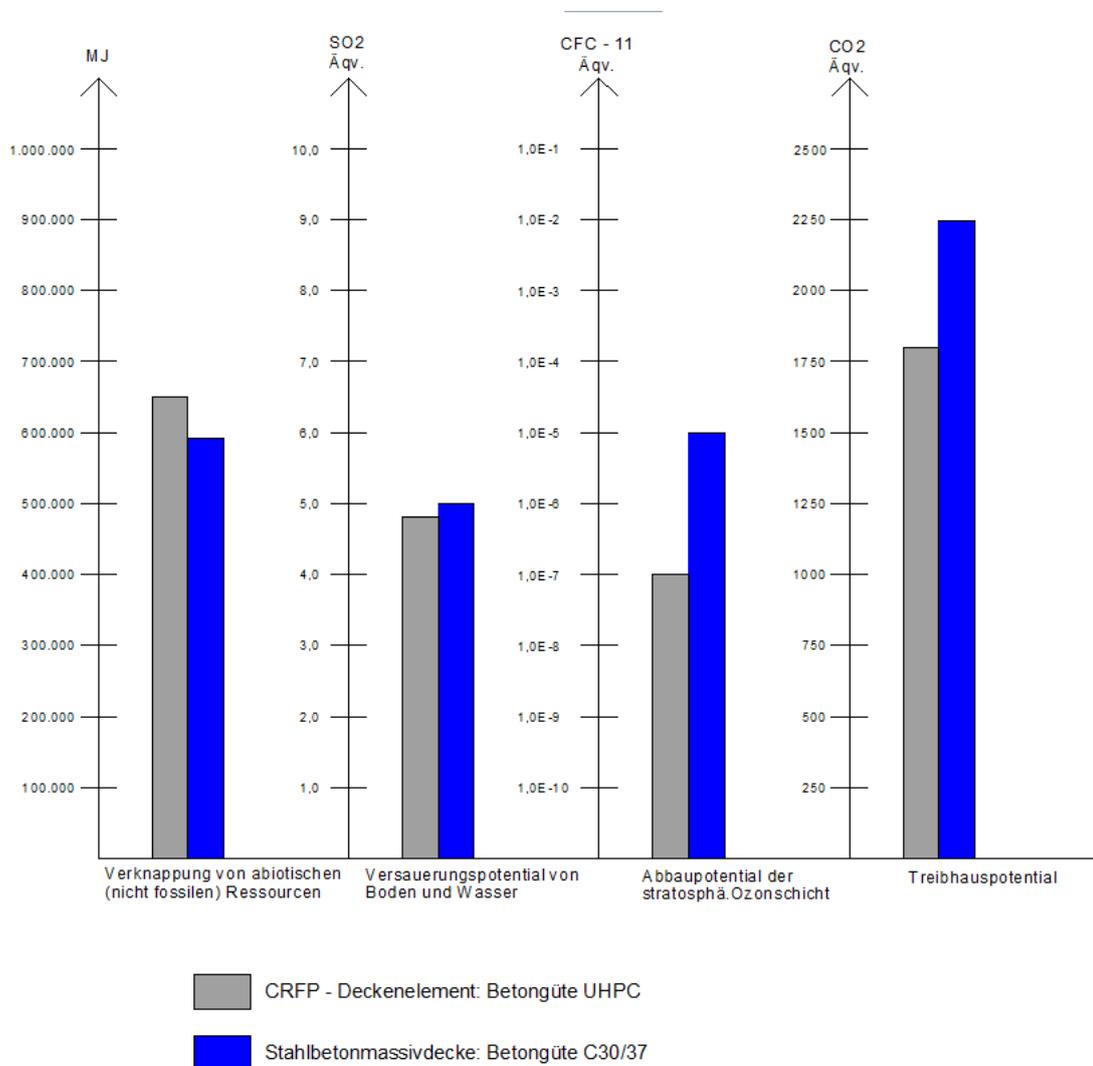
**Tab. 37:** Berechnung des Einsparungspotentials bzw. Mehrbelastung inklusive Epoxidharz in den Wirkungskategorien der beiden Deckenelemente

Beim Vergleich der Betonkubatur der beiden Deckenkonfigurationen wird das Einsparungspotential des mit karbonfaserbewehrten Deckenelements deutlich. Für diese Konfiguration sind für das gewählte statische System 1,3 m<sup>3</sup> Beton erforderlich. Die konventionell mit Bewehrungsstahl bewehrte Massivdecke benötigt für das gleiche Tragmoment 5,0 m<sup>3</sup> Beton.

Mit den Daten aus Teil 3 und der Lebenszyklusanalyse der beiden Betonmischungen kann nun die Gesamtbilanz der beiden Deckenelemente erhoben werden. Die Ergebnisse sowie ein zusammenfassendes Balkendiagramm sind in den folgenden beiden Darstellungen abgebildet.

	CFRP - Deckenelement			Stahlbetonmassivdecke		
	UHPC [m <sup>3</sup> ]	Karbon - bew. [kg]	Σ	C30/37 [m <sup>3</sup> ]	Stahl- bew. [kg]	Σ
Kubatur / Masse	1,3	73	-	5	346	-
Verknappung von abiotischer Ressourcen (fossiler Ressourcen) in MJ	6487	644197	<b>650684</b>	7650	585214	<b>592864</b>
Versauerungspotential von Boden und Wasser in SO <sub>2</sub> - Äqv.	1,86E+00	2,95E+00	<b>4,81E+00</b>	2,65E+00	2,39E+00	<b>5,03E+00</b>
Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht in kg CFC - 11 Äqv.	3,65E-08	8,76E-06	<b>8,80E-06</b>	5,65E-08	1,04E-05	<b>1,04E-05</b>
Treibhauspotential in kg CO <sub>2</sub> - Äqv.	1044	753	<b>2,E+03</b>	1430	810	<b>2,E+03</b>

**Tab. 38:** Gesamtbilanz CFRP – Deckenelement und Stahlbetonmassivdecke



**Abb. 26:** Zusammenfassung Gesamtbilanz: CFRP – Deckenelement u. Stahlbetonmassivdecke

Die Abbildung 26 zeigt, dass vor allem in den beiden Kategorien „Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht“ und „Treibhauspotential“ Einsparungspotential vorhanden

ist. In der Kategorie „Verknappung von abiotischen (nicht fossilen) Ressourcen“ hat die Herstellung des CFRP – Deckenelements größere ökologische Auswirkungen als die Stahlbetonmassivdecke. Wie jedoch aus dem statischen System in Abbildung 23 ersichtlich ist, musste aufgrund des Eigengewichts der Massivdecke die Nutzlast auf  $1,61 \text{ kN/m}^2$  reduziert werden, um das einwirkende Moment von  $M_{e,d} = 112,0 \text{ kNm}$  zu erhalten. Aus diesem Grund wird im folgenden Abschnitt eine weitere Massivdecke mit einer Nutzlast von  $3,0 \text{ kN/m}^2$  berechnet.

#### **4.7 Stahlbetonmassivdecke: $g_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$ ; $q_k = 3,0 \text{ kN/m}^2$**

Die Stahlbetonmassivdecke aus Abschnitt 4.5 wurde so entworfen, dass das einwirkende Moment dem Traglastmoment aus der CFRP – Deckenkonfiguration 4 entspricht ( $M_{e,d} = M_{r,d}$ ). Wie aus dem statischen System erkennbar ist, kann auf Grund des hohen Eigengewichts der Stahlbetonmassivdecke nur noch eine Nutzlast von  $q_k = 1,61 \text{ kN/m}^2$  in Rechnung gestellt werden, was beinahe der halben Nutzlast der CFRP - Deckenkonfigurationen entspricht. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen wird im folgenden Abschnitt eine Stahlbetonmassivdecke unter Eigengewicht, Bodenaufbau ( $2,0 \text{ kN/m}^2$ ) und Nutzlast ( $3,0 \text{ kN/m}^2$ ) bemessen, um eine Aussage über die ökologischen Auswirkungen im Vergleich zum CFRP – bewehrten Deckenelemente treffen zu können. Das statische System wird gleich wie in Abbildung 22 gewählt. Die Berechnung erfolgt mit der Betonqualität C30/37. Der Bewehrungsstahl wird nach ÖNORM B4707 mit der Güte BSt 550 gewählt [ÖNORM B4707 2017].

##### **4.7.1 Bemessung Stahlbetonmassivdecke: $g_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$ ; $q_k = 3,0 \text{ kN/m}^2$**

Die Deckenstärke wird so gewählt, dass im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit die Einwirkungen aus Eigengewicht, Bodenaufbau ( $2,0 \text{ kN/m}^2$ ) und Nutzlast ( $3,0 \text{ kN/m}^2$ ) die Durchbiegung von  $l/300$  eingehalten wird. Daraus erfolgt eine gewählte Deckenstärke von  $28,0 \text{ cm}$ .

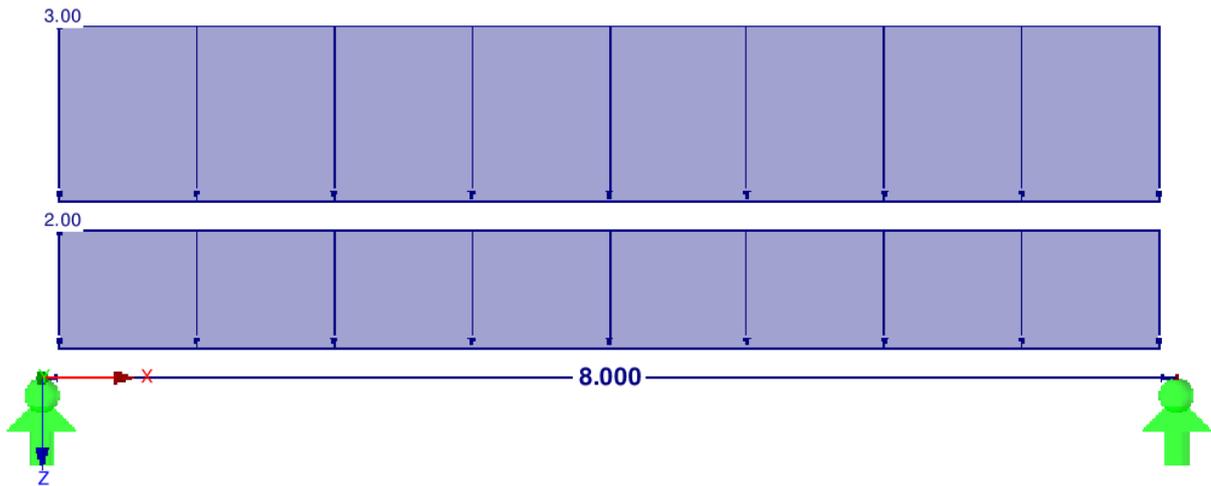


Abb. 27: statisches System inkl. Belastung aus Eigengewicht, Bodenaufbau und Nutzlast

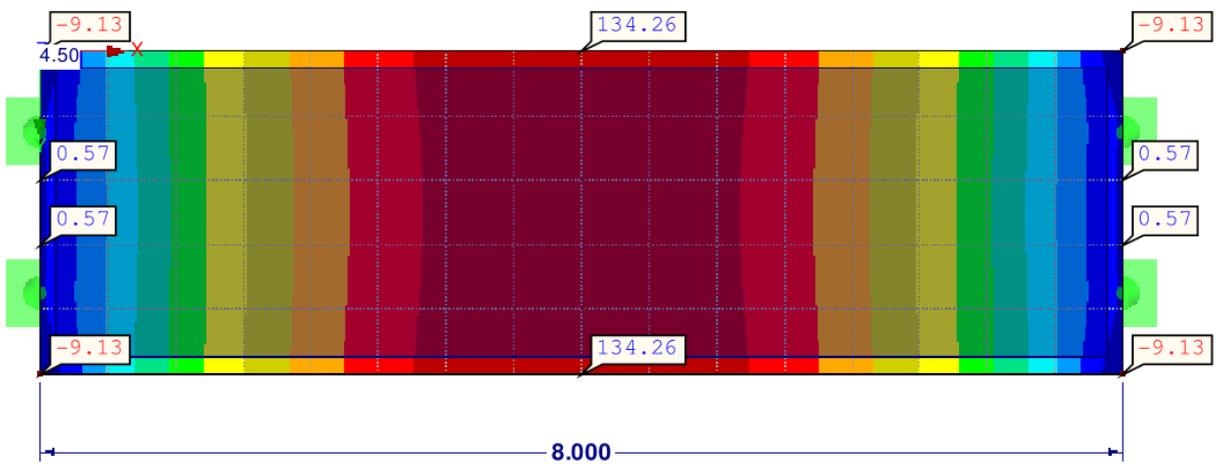


Abb. 28: Bemessungsmoment  $M_{e,d}$

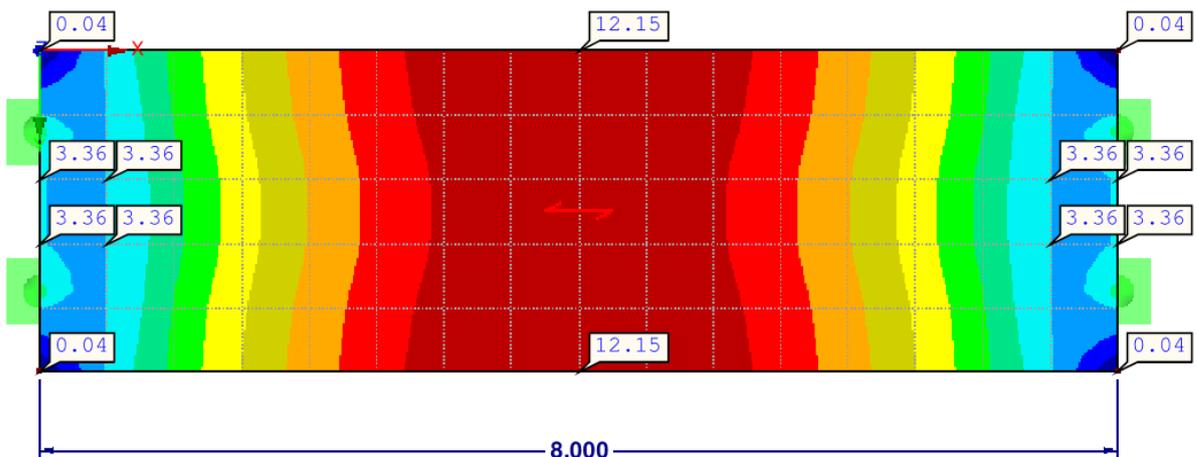


Abb. 29: erforderliche Bewehrung in x – Richtung (unten)

Die Mindestbewehrung  $a_{s,min}$  nach DIN EN 1992-1-1 beträgt  $3,4\text{cm}^2/\text{m}$  [Eurocode 2 2013]. Um dieser Forderung Rechnung zu tragen wird die obere Lage mit einem Baustahlgitter AQ 70 ( $3,85\text{ cm}^2/\text{m}$ ) BSt 550 bewehrt.

Die Biegemessung in der Zugzone ergibt  $a_{s,erf} = 12,15 \text{ cm}^2/\text{m}$ . Dieser Wert wird mit  $\phi 14/12,5 (=12,75 \text{ cm}^2/\text{m})$  abgedeckt. Aus der Bedingung nach DIN EN 1992-1-1, dass 50% der Feldbewehrung am Auflager zu verankern sind, wird jedes zweite Eisen aus der Feldbewehrung zu den Auflagern geführt ( $= 6,4 \text{ cm}^2/\text{m} > a_{s,min}$ ) [Eurocode 2 2013]. Die Verankerungslänge beträgt 50 cm. Daraus ergibt sich eine Bewehrungstahllänge der Feldbewehrung für die Elementbreite von 2,4 m wie folgt:

9 Stück à 6,6 m

10 Stück à 7,94 m

Die Randeinfassungsnadeln werden mit  $\phi 14/25$  und einer Gesamtlänge von 120 cm gewählt (50+20+50 cm). Für den Umfang von  $2 \times 8,0 \text{ m} + 2 \times 2,4 \text{ m} = 20,8 \text{ m}$  ergibt sich eine Gesamtanzahl von 83 Randeinfassungen à 1,20 m.

Die folgende Tabelle fasst die benötigten Massen der Stahlbetonmassivdecke mit den Abmessungen 2,4 m x 8,0 m unter der Einwirkung von Eigengewicht, Bodenaufbau ( $2,0 \text{ kN/m}^2$ ) und Nutzlast ( $3,0 \text{ kN/m}^2$ ) zusammen.

Bauteil	Betonkubatur [m <sup>3</sup> ]	Bewehrung $\phi 14$ [m]	Matte AQ 70 [m <sup>2</sup> ]	Bewehrung $\phi 14$ [kg]	Matte AQ 70 [kg]	$\Sigma$ Bewehrung [kg]
Massivdecke 2,4 x 8,0m	5,4	238	19	288	115	403

Tab. 39: Massenermittlung Stahlbetonmassivdecke

#### 4.8 Vergleich der ökologischen Auswirkungen CFRP bewehrtes Deckenelement Konfiguration 4 mit Stahlbetonmassivdecke $g_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$ ; $q_k = 3,0 \text{ kN/m}^2$

Der Vergleich der ökologischen Auswirkungen der beiden Deckenelemente wird zuerst wie in Abschnitt 4.3 auf Grundlage einer Äquivalenzeinheit in „kg Stahl äquiv.“ geführt und im Anschluss wird die Gesamtbilanz der beiden Decken erstellt.

Die Massenermittlung aus 4.7 hat eine benötigte Stahlmenge von 403 kg für die Stahlbetonmassivdecke ergeben. Diese Menge wird in der folgenden Tabelle mit den Werten der Äquivalenztabelle aus Tabelle 22 verglichen, um das Einsparungspotential bzw. die Mehrbelastung in den Wirkungskategorien auf Basis des karbonfaserbewehrten Deckenelements zu erhalten.

Wirkungskategorie	CFRP Decken- element [„kg Stahl äquiv.“]	Stahlbetonmas- sivdecke [kg Stahl]	Einsparungspo- tential/ Mehr- belastung [%]
Verknappung von abiotischen (nicht fossilen) Ressourcen	161	403	60
Verknappung von abiotischen (fossilen) Ressourcen	380	403	6
Versauerungspotential von Boden und Wasser	431	403	7
Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht	299	403	26
Treibhauspotential	321	403	20

**Tab. 40:** Berechnung des Einsparungspotentials bzw. Mehrbelastung der Bewehrung in den Wirkungskategorien der beiden Deckenelemente

Das berechnete Einsparungspotential aus Tabelle 40 bezieht sich rein auf die Produktion der Karbonfaser und muss daher wie in Abschnitt 4.3 erklärt um 25 % durch die Produktion des Epoxidharzes beaufschlagt werden. Die folgende Tabelle zeigt daher die Berechnung des Einsparungspotentials bzw. der Mehrbelastung inklusive des Anteils des nötigen Epoxidharzes.

Wirkungskategorie	CFRP Decken- element [„kg Stahl äquiv.“]	Stahlbeton- massivdecke [kg Stahl]	Einsparungs- potential/ Mehrbelas- tung [%]
Verknappung von abiotischen (nicht fossilen) Ressourcen	201	403	50
Verknappung von abiotischen (fossilen) Ressourcen	475	403	18
Versauerungspotential von Boden und Wasser	539	403	34
Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht	374	403	7
Treibhauspotential	401	403	0

**Tab. 41:** Berechnung des Einsparungspotentials bzw. Mehrbelastung inklusive Epoxidharz in den Wirkungskategorien der beiden Deckenelemente

Beim Vergleich der Betonkubatur der beiden Deckenkonfigurationen wird das Einsparungspotential des mit karbonfaserbewehrten Deckenelements deutlich. Für diese Konfiguration sind für das gewählte statische System 1,3 m<sup>3</sup> Beton erforderlich. Die konventionell mit Bewehrungsstahl bewehrte Massivdecke benötigt für das gleiche Tragmoment 5,4 m<sup>3</sup> Beton.

Auf Grundlage der Daten aus Teil 3 und der Lebenszyklusanalyse der beiden Betonmischungen kann nun die Gesamtbilanz der beiden Deckenelemente erhoben werden. Die Ergebnisse sowie ein zusammenfassendes Balkendiagramm sind in den folgenden beiden Darstellungen abgebildet.

	CFRP - Deckenelement			Stahlbetonmassivdecke		
	UHPC [m <sup>3</sup> ]	Karbon - bew. [kg]	Σ	C30/37 [m <sup>3</sup> ]	Stahl- bew. [kg]	Σ
Kubatur / Masse	1,3	73	-	5,4	403	-
Verknappung von abiotischer Ressourcen (fossiler Ressourcen) in MJ	6,49E+03	6,44E+05	<b>6,51E+05</b>	8,26E+03	6,82E+05	<b>6,90E+05</b>
Versauerungspotential von Boden und Wasser in SO <sub>2</sub> - Äqv.	1,86E+00	2,95E+00	<b>4,81E+00</b>	2,86E+00	2,78E+00	<b>5,64E+00</b>
Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht in kg CFC - 11 Äqv.	3,65E-08	8,76E-06	<b>8,80E-06</b>	6,10E-08	1,21E-05	<b>1,22E-05</b>
Treibhauspotential in kg CO <sub>2</sub> - Äqv.	1,04E+03	7,53E+02	<b>1,80E+03</b>	1,54E+03	9,43E+02	<b>2,49E+03</b>

Tab. 42: Gesamtbilanz CFRP – Deckenelement und Stahlbetonmassivdecke

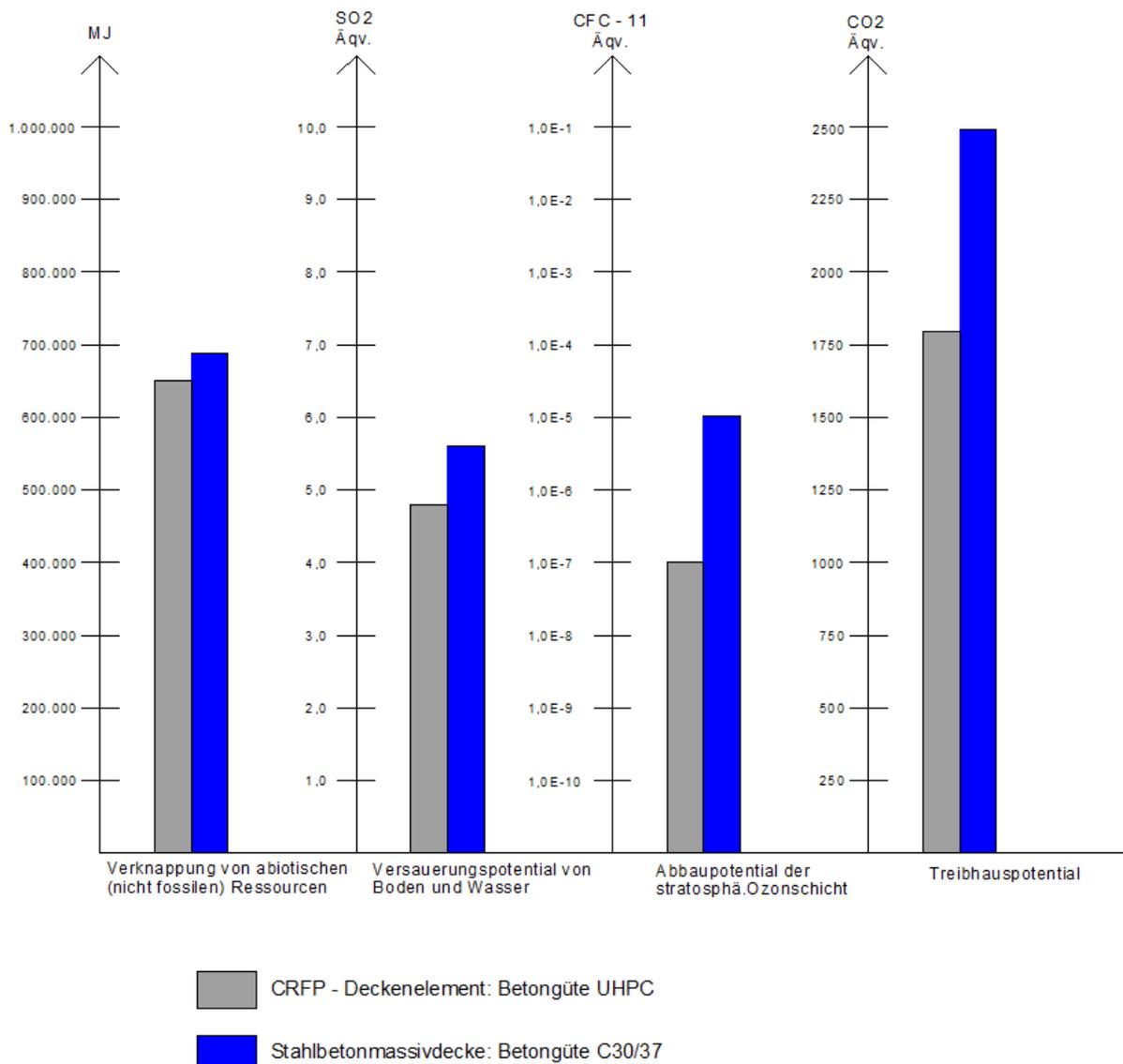


Abb. 30: Zusammenfassung Gesamtbilanz: CFRP – Deckenelement u. Stahlbetonmassivdecke

Wie in Abbildung 30 ersichtlich wird, wird bei einer angesetzten Nutzlast von  $3,0 \text{ kN/m}^2$  in sämtlichen Kategorien ein Einsparungspotential durch den Einsatz des CFRP – Deckenelements erreicht.

Einen effizienteren Einsatz der Materialien im Vergleich zur Massivdecke bietet das Flachdeckensystem der Fa. Cobiax. Aus diesem Grund werden im folgenden Abschnitt die ökologischen Auswirkungen des CFRP – Deckenelements mit einer Cobiax – Flachdecke verglichen.

#### **4.9 Cobiax - Flachdecke $M_{e,d} = 112,0 \text{ kNm}$**

Um eine Aussage über die ökologischen Auswirkungen der verschiedenen Decken treffen zu können, wird folgend eine mit Stabstahl bewehrte Cobiax – Flachdecke als Vergleichsobjekt berechnet und exemplarisch mit der Deckenkonfiguration 4 mit einem Traglastmoment von  $M_{r,d} = 112,0 \text{ kNm}$  verglichen.

Die Cobiax-Technologie beruht auf dem Erzeugen spezieller Hohlräume im Inneren einer Stahlbetondecke. Massiver Beton wird durch Kunststoffhohlkörper ersetzt und bleibt nur noch in statisch relevanten Bereichen erhalten, wodurch der Beton sehr effizient eingesetzt werden kann. Die Ressourceneffizienz begründet sich jedoch nicht nur darin, dass durch die Verwendung der Verdrängungskörper Beton eingespart wird, sondern zusätzlich durch die Betonverdrängung auch die Eigenlast reduziert wird. Dadurch kommt es wiederum zu einem geringeren Bewehrungsbedarf. Die Fa. Cobiax gibt an, dass die Verdrängungskörper selbst aus einem Regenerat, das bei der Kunststoffherstellung anfällt, hergestellt werden. Ein Regenerat ist ein durch chemische Aufbereitung gewonnenes Produkt aus gebrauchten Materialien. Dadurch ist gewährleistet, dass für die Herstellung der Hohlkörper zwar ein reines, aber dennoch für andere Produkte ungeeignetes Material wiederverwertet wird. Das ist übrigens der Grund für die bunten und willkürlichen Farben der Hohlkörper [Cobiax 2017].

Durch den Einsatz der Hohlkörper kommt es laut Herstellerangaben zu einer Reduktion von 20 % an umwelttoxischen Schadstoffen und der Einsatz der Primärenergie kann um bis zu 22% gesenkt werden. Als Beleg für diese Einsparung gibt der Hersteller im veröffentlichten Technologiehandbuch folgendes Berechnungsbeispiel an [Cobiax 2017] [S.11/2].

**4.9.1 Nachweis über die Reduktion von CO<sub>2</sub> – Emissionen durch die Anwendung der Cobiax Technologie am Beispiel des Projekts „Zollverein School of Management and Design“ in Essen**

- CO<sub>2</sub> – Bilanz einer konventionellen massiven Flachdecke

Bei der Herstellung einer Stahlbetondecke – Flachdecke fallen durch die Produktion der Baustoffe rohstoff – und energiebedingte CO<sub>2</sub> – Emissionen an. Der maßgebliche Anteil der CO<sub>2</sub> – Emissionen bei der Betonherstellung lässt sich aufgrund des erheblichen Energieaufwands (thermisch und elektrisch bedingt) und des rohstoffbedingten CO<sub>2</sub> – Ausstoßes bei der Dekarbonatisierung des Kalksteins auf die Zementproduktion zurückführen. Als Berechnungswert wird hierfür ein durchschnittlicher CO<sub>2</sub> – Ausstoß von 0,70 kg pro kg Zement angesetzt [Verein Deutscher Zementwerke 2005]. Bei der Betonproduktion entstehen darüber hinaus pro m<sup>3</sup> Beton 0,63 kg CO<sub>2</sub> [HOLCIM 2006]. Für die Produktion des Bewehrungsstahls wird ein Ausstoß von 1,73 kg CO<sub>2</sub> pro kg Stahl angenommen. Der Stahlgehalt der Decke des Fallbeispiels liegt bei 72,5 kg pro m<sup>2</sup>[Umweltbundesamt 2004].

	Masse [kg/m <sup>3</sup> Decke]	CO <sub>2</sub> –Ausstoß	
		[kg/kg Emit- tent]	[kg/m <sup>3</sup> Decke]
<b>Zement</b>	300	0,70	210,00
<b>Beton (exklusive Zement)</b>	2.200	0,0003	0,63
<b>Bewehrungsstahl</b>	145	1,73	250,85

**Tab. 43:** CO<sub>2</sub> – Emissionen bei der Herstellung einer konventionellen massiven Flachdecke je m<sup>3</sup> [Bauer & Krause 2017] [S.16/1]

Die Herstellung einer konventionellen Massivdecke würde im Fall des Projekts „Zollverein School of Management and Design“ somit bei einer Deckenstärke von 0,50 m und der Verwendung von Normalbeton (Rohdichte = 2500 kg/m<sup>3</sup>) einen CO<sub>2</sub> – Ausstoß von etwa 461,48 kg CO<sub>2</sub> pro m<sup>3</sup> Decke nach sich ziehen. Wobei an dieser Stelle anzumerken ist, dass es sich bei dem vorgestellten Projekts „Zollverein School of Management and Design“ mit einer Deckenspannweite von bis zu 24,0 m um ein sehr außergewöhnliches statisches System handelt.

- CO<sub>2</sub> – Bilanz einer Cobiax Flachdecke

Das Volumen aller Flachdecken im Projekt Zollverein beträgt 1.600 m<sup>3</sup> (bei 3200 m<sup>2</sup> Deckenfläche und 0,50 m Deckenstärke). Es werden insgesamt 19.530 Cobiax Hohlkörper mit einem Volumen von jeweils 0,0244 m<sup>3</sup> eingebracht. Daraus ergibt sich das Gesamtvolumen der Betonverdrängung von 477 m<sup>3</sup> Beton, was einer Einsparung von etwa 30% des gesamten Betonvolumens in den Decken entspricht. Des Weiteren kann durch das Ein-

bringen der Hohlkörper bei der Cobiax Flachdecke gemäß einer vergleichenden statischen Berechnung laut Hersteller eine Einsparung von 17 % des statisch erforderlichen Bewehrungsstahls realisiert werden. Die Cobiax Körbe zur Positionierung der Cobiax Hohlkörper sind statisch nicht in der Rechnung mit angesetzt, werden aber gemäß untenstehender Tabelle in der CO<sub>2</sub> Bilanz berücksichtigt [Bauer & Krause 2007] [S16/2].

Der Energieverbrauch bei der Produktion eines Cobiax Hohlkörpers aus rezykliertem Polyethylen (Eigengewicht: 0,81 kg) liegt bei 0,04 kWh pro Stück. Bei einem CO<sub>2</sub> – Aufkommen von 0,70 kg CO<sub>2</sub> je kWh ergibt sich ein CO<sub>2</sub> – Ausstoß von 0,34 kg CO<sub>2</sub> pro m<sup>3</sup> Decke [Umweltbundesamt 2004].

	Masse	CO <sub>2</sub> –Ausstoß	
	[kg/m <sup>3</sup> Decke]	[kg/kg Emit- tent]	[kg/m <sup>3</sup> Decke]
<b>Zement</b>	210	0,70	147,00
<b>Beton (exklusive Zement)</b>	1.540	0,0003	0,44
<b>Bewehrungsstahl</b>	120	1,73	207,60
<b>HDPE Rezyklat (Hohlkörper)</b>	10	0,03	0,34
<b>Cobiax Körbe</b>	8	1,73	13,84

**Tab. 44:** CO<sub>2</sub> – Emissionen bei der Herstellung einer Cobiax Flachdecke je m<sup>3</sup> [Bauer & Krause 2007] [S16/2]

Damit ergibt sich ein CO<sub>2</sub> – Ausstoß von etwa 369,22 kg und somit eine Einsparung von 92,26 kg CO<sub>2</sub> pro m<sup>3</sup> Decke im direkten Vergleich zur Massivdecke.

Zusammenfassend konnte durch den Einsatz der Cobiax Technologie beim Projekt „Zollverein School of Management“ in Essen bei der Herstellung der Flachdecken der Ausstoß von CO<sub>2</sub> um eine Summe von etwa 148 t reduziert werden. Dies entspricht einer Vermeidung der CO<sub>2</sub> – Emissionen um 20% im Vergleich zu einer konventionellen massiven Flachdecke. Keine Berücksichtigung finden bei diesem rein produktionsbezogenen Ansatz die folgenden Einflüsse auf die CO<sub>2</sub> - Bilanzen:

- \* Materialtransport für die Deckenherstellung außerhalb der Produktionsstätten, also beim Transport zur Baustelle

Ersparnis: ca. 1.200 t Beton  
Ca. 40 t Bewehrungsstahl

Mehraufwand: ca. 16 t Cobiax Kunststoffhohlkörper  
Ca. 12,8 t Cobiax Bewehrungskörbe

- \* Verschlingung der tragenden Konstruktion um ca. 10% infolge des geringeren Eigengewichts der Cobiax Decken [Bauer & Krause 2007] [S16/2].

#### 4.9.2 Bemessung Cobiax Flachdecke ( $M_{r,d} = 112,0 \text{ kNm}$ )

Die Deckenstärke der Cobiax Flachdecke wird so gewählt, dass im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit die Einwirkung von Eigengewicht, Bodenaufbau ( $2,0 \text{ kN/m}^2$ ) und Nutzlast ( $3,0 \text{ kN/m}^2$ ) die Durchbiegung von  $l/300$  eingehalten wird. Daraus folgt eine gewählte Deckenstärke von  $26,0 \text{ cm}$ . Diese Deckenstärke ermöglicht einen Cobiax Hohlkörpertyp S120 – 140C. Dieser Hohlkörpertyp reduziert das Eigengewicht um  $160 \text{ kg/m}^2$ , wodurch sich ein Gesamtgewicht des Deckenelements mit den Abmessungen von  $2,4 \text{ m} \times 8,0 \text{ m}$  von rund  $9400 \text{ kg}$  ergibt. Die benötigte Betonkubatur beträgt  $3,8 \text{ m}^3$ . Als Betongüte wird wie bereits bei den vorigen Abschnitten C30/37 gewählt. Als statisches System wird wie in Abschnitt 4.2 ein Einfeldsystem mit einer Spannweite von  $8,0 \text{ m}$  gewählt.

Die Bemessung für Biegung kann laut DIN 1045-1 mit den allgemein gültigen Bemessungshilfen wie für einen Rechteckquerschnitt durchgeführt werden, wenn folgende zwei Bedingungen eingehalten werden [Cobiax 2017] [S.2/24].

Fall 1: Die Druckzone verbleibt oberhalb der Hohlkörper

Fall 2: Die Begrenzung des bezogenen Biegemoments der Hohlkörperdecke ist eingehalten

Bei dem im Fall 2 genannten Grenzwert für das bezogene Biegemoment, welcher auf der sicheren Seite liegend mit  $0,2$  angegeben werden kann, ergeben sich die gleichen erforderlichen Stahlquerschnitte wie für den Rechteckquerschnitt, auch wenn die Druckzone in den Hohlkörperbereich hineinragt. Somit ergibt sich für den Fall 2 folgende Grenzwertbedingung [Cobiax 2017][S.11/2]:

$$\mu_{Eds} = m_{Ed} * D_{cb} * 1,96 / (d^3 * f_{ck}) < 0,2$$

mit:

$\mu_{Eds}$  = bezogenes Biegemoment im Kugelbereich [-]

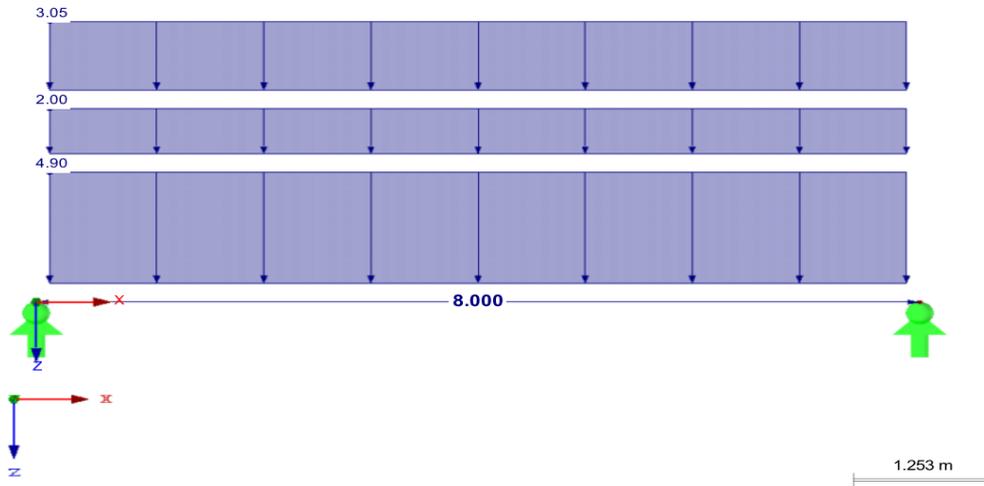
$m_{Ed}$  = max. Biegemoment [ $\text{kNm/m}$ ]

$D_{cb}$  = Hohlkörperhöhe [m]

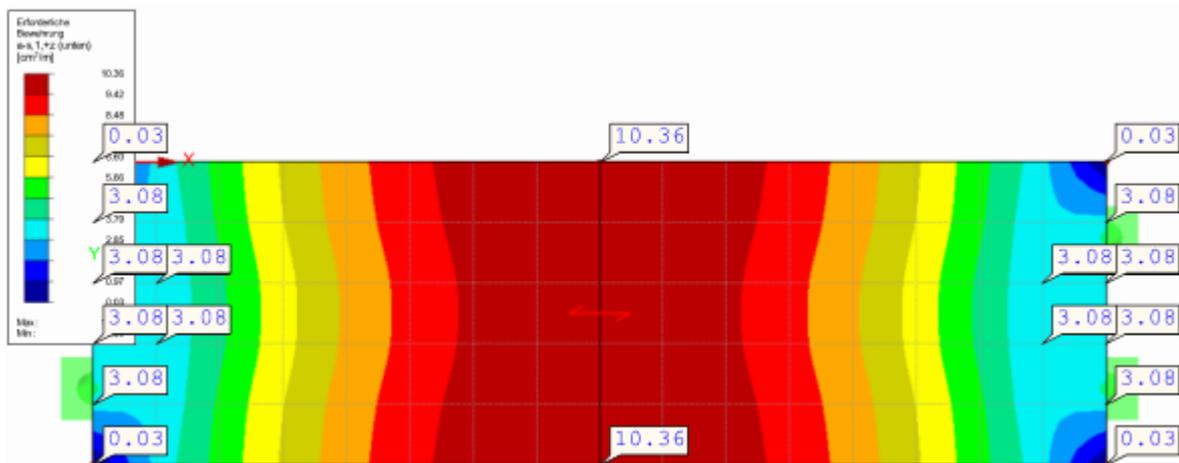
$d$  = statische Höhe [m]

$f_{ck}$  = charakteristische Festigkeit nach DIN EN 1992-1-1 [ $\text{MN/m}^2$ ]

Die Berechnung der Grenzwertbedingung mit den weiter oben erwähnten geometrischen Abmessungen ergibt für das gewählte Traglastmoment von  $M_{r,d} = 112,0 \text{ kNm}$  ein bezogenes Biegemoment  $\mu_{Eds} = 0,068 < 0,2$ , weshalb die Bemessung nach den allgemeinen Bemessungsregeln nach DIN EN 1992-1-1 erfolgt [Eurocode 2 2013].



**Abb. 31:** statisches System inkl. Belastung aus Eigengewicht, Bodenaufbau und Nutzlast



**Abb. 33:** erforderliche Bewehrung in x – Richtung (unten)

Die Mindestbewehrung  $a_{s,min}$  nach DIN EN 1992-1-1 beträgt  $3,2 \text{ cm}^2/\text{m}$  [Eurocode 2 2013]. Um dieser Forderung Rechnung zu tragen wird die obere Lage mit einem Baustahlgitter AQ 65 ( $3,32 \text{ cm}^2/\text{m}$ ) BSt 550 bewehrt.

Die Biegemessung in der Zugzone ergibt  $a_{s,erf} = 10,36 \text{ cm}^2/\text{m}$ . Dieser Wert wird mit  $\emptyset 12/10$  ( $=11,31 \text{ cm}^2/\text{m}$ ) abgedeckt. Aus der Bedingung nach DIN EN 1992-1-1, dass 50% der Feldbewehrung am Auflager zu verankern sind, wird jedes zweite Eisen aus der Feld-

bewehrung zu den Auflagern geführt ( $= 5,65 \text{ cm}^2/\text{m} > a_{s,\text{min}}$ ) [Eurocode 2 2013]. Die Verankerungslänge beträgt 43 cm. Daraus ergibt sich eine Bewehrungslänge der Feldbewehrung für die Elementbreite von 2,4 m wie folgt:

12 Stück à 6,2 m

12 Stück à 7,94 m

Die Randeinfassungsnadeln werden mit  $\varnothing 12/20$  und einer Gesamtlänge von 104 cm gewählt ( $43+18+43 \text{ cm}$ ). Für den Umfang von  $2 \times 8,0 \text{ m} + 2 \times 2,4 \text{ m} = 20,8 \text{ m}$  ergibt sich eine Gesamtanzahl von 104 Randeinfassungen à 1,04 m.

Damit die Cobiax Hohlkörper während des Betoniervorgangs nicht aufschwimmen, müsse diese durch einen Bewehrungskorb in ihrer Lage gesichert werden. Die Fa. Cobiax gibt den benötigten Stahlbedarf für diese Körbe mit  $8,0 \text{ kg}/\text{m}^3$  [Bauer & Krause 2007] [S16/2]. Das ergibt für das gewählte Deckenelement mit einer Kubatur von  $3,8 \text{ m}^3$  einen Stahlbedarf von rund 30 kg.

Die folgende Tabelle fasst benötigten Massen des Cobiax – Flachdeckenelements mit den Abmessungen 2,4 m x 8,0 m und einem Traglastmoment von  $M_{r,d} = 112 \text{ kNm}$  zusammen.

Bauteil	Betonkubatur [m <sup>3</sup> ]	Bewehrung $\varnothing 12$ [m]	Matte AQ 65 [m <sup>2</sup> ]	Bewehrung $\varnothing 12$ [kg]	Matte AQ 65 [kg]	Cobiax Korb [kg]	$\Sigma$ Bewehrung [kg]
Cobiax Flachdecke 2,4 x 8,0m	3,8	278	19	246	100	30	376

Tab. 45: Massenermittlung Cobiax Flachdeckenelement

#### 4.10 Vergleich der ökologischen Auswirkung des CFRP – Deckenelements Konfiguration 4 mit Cobiax Flachdecke

Der Vergleich der ökologischen Auswirkungen der beiden Deckenelemente wird wie in Abschnitt 4.3 zuerst auf Grundlage einer Äquivalenzeinheit in „kg Stahl äquiv.“ geführt und im Anschluss wird die Gesamtbilanz der beiden Decken erstellt.

Die Gesamtmasse der CFRP – bewehrten Deckenelements Konfiguration 4 beträgt 73 kg textile Karbonbewehrung. Dieser Wert umgerechnet in „kg Stahl äquiv.“ in den gewählten Wirkungskategorien wird in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Wirkungskategorie	„Faktor kg Stahl äquiv.“	„kg Stahl äquiv.“
Verknappung von abiotischen (nicht fossilen) Ressourcen	2,2	161
Verknappung von abiotischen (fossilen) Ressourcen	5,2	380
Versauerungspotential von Boden und Wasser	5,9	431
Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht	4,1	299
Treibhauspotential	4,4	321

**Tab. 46:** Äquivalenztabelle der ökologischen Auswirkung der Produktion von 73 kg textiler Die Massenermittlung hat eine benötigte Stahlmenge von 376 kg für die Cobiax Flachdecke ergeben. Diese Menge wird in der folgenden Tabelle mit den Werten der Äquivalenztabelle aus Tabelle 22 verglichen, um das Einsparungspotential bzw. die Mehrbelastung in den Wirkungskategorien auf Basis des karbonfaserbewehrten Deckenelements zu erhalten.

Wirkungskategorie	CFRP Deckenelement [„kg Stahl äquiv.“]	Cobiax - Flachdecke [kg Stahl]	Einsparungspotential/ Mehrbelastung [%]
Verknappung von abiotischen (nicht fossilen) Ressourcen	161	376	57
Verknappung von abiotischen (fossilen) Ressourcen	380	376	1
Versauerungspotential von Boden und Wasser	431	376	15
Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht	299	376	20
Treibhauspotential	321	376	15

**Tab. 47:** Berechnung des Einsparungspotentials bzw. Mehrbelastung der Bewehrung in den Wirkungskategorien der beiden Deckenelemente

Wie in Tabelle 47 ersichtlich ist, gibt es ähnlich wie beim Vergleich der ökologischen Auswirkungen der beiden Trägerkonfigurationen aus Abschnitt 4.3 Einsparungspotential in den gewählten Wirkungskategorien. Vor allem in der Kategorie „Verknappung von abiotischen (nicht fossiler) Ressourcen“ ergibt die Berechnung ein Einsparungspotential von

rund 57 % und unterscheidet sich kaum dem Wert der T – Trägerkonfiguration 1. Dieser Umstand ist wie bereits erwähnt den nötigen Erzen für die Stahlerzeugung geschuldet. Die berechnete Einsparung von 15 % in der Wirkungskategorie „Treibhauspotential“ ist aufgrund der Tatsache besonders bemerkenswert, da die Cobiax Flachdecke bereits ein CO<sub>2</sub> – Emissionen schonendes Produkt ist und die Technologie auf einen sehr konzentrierten und effizienten Einsatz der verwendeten Materialien setzt. Wie das Berechnungsbeispiel aus Abschnitt 4.9.1 zeigt, beträgt die Einsparung der CO<sub>2</sub> – Emissionen im Vergleich zur Stahlbetonmassivdecke rund 20 % inklusive der Belastung durch die Produktion der Cobiax Hohlkörper und trotzdem weist das karbonfaserbewehrte Deckenelement geringere CO<sub>2</sub> – Emissionen auf. Vollständigkeitshalber muss an dieser Stelle wieder darauf hingewiesen werden, dass das berechnete Einsparungspotential aus Tabelle 47 sich rein auf die Produktion der Karbonfaser bezieht und daher die einzelnen Wirkungskategorien durch die Produktion des Epoxidharzes noch um ca. 25 % beaufschlagt werden müssen. Die folgende Tabelle zeigt daher die Berechnung des Einsparungspotentials bzw. der Mehrbelastung inklusive des Anteils des nötigen Epoxidharzes.

Wirkungskategorie	CFRP Deckenelement [„kg Stahl äquiv.“]	Cobiax - Flachdecke [kg Stahl]	Einsparungspotential/ Mehrbelastung [%]
Verknappung von abiotischen (nicht fossilen) Ressourcen	201,3	376	46,4
Verknappung von abiotischen (fossilen) Ressourcen	475	376	26,3
Versauerungspotential von Boden und Wasser	538,8	376	43,4
Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht	378,8	376	7,4
Treibhauspotential	401,3	376	6,7

**Tab. 48:** Berechnung des Einsparungspotentials bzw. Mehrbelastung inklusive Epoxidharz in den Wirkungskategorien der beiden Deckenelemente

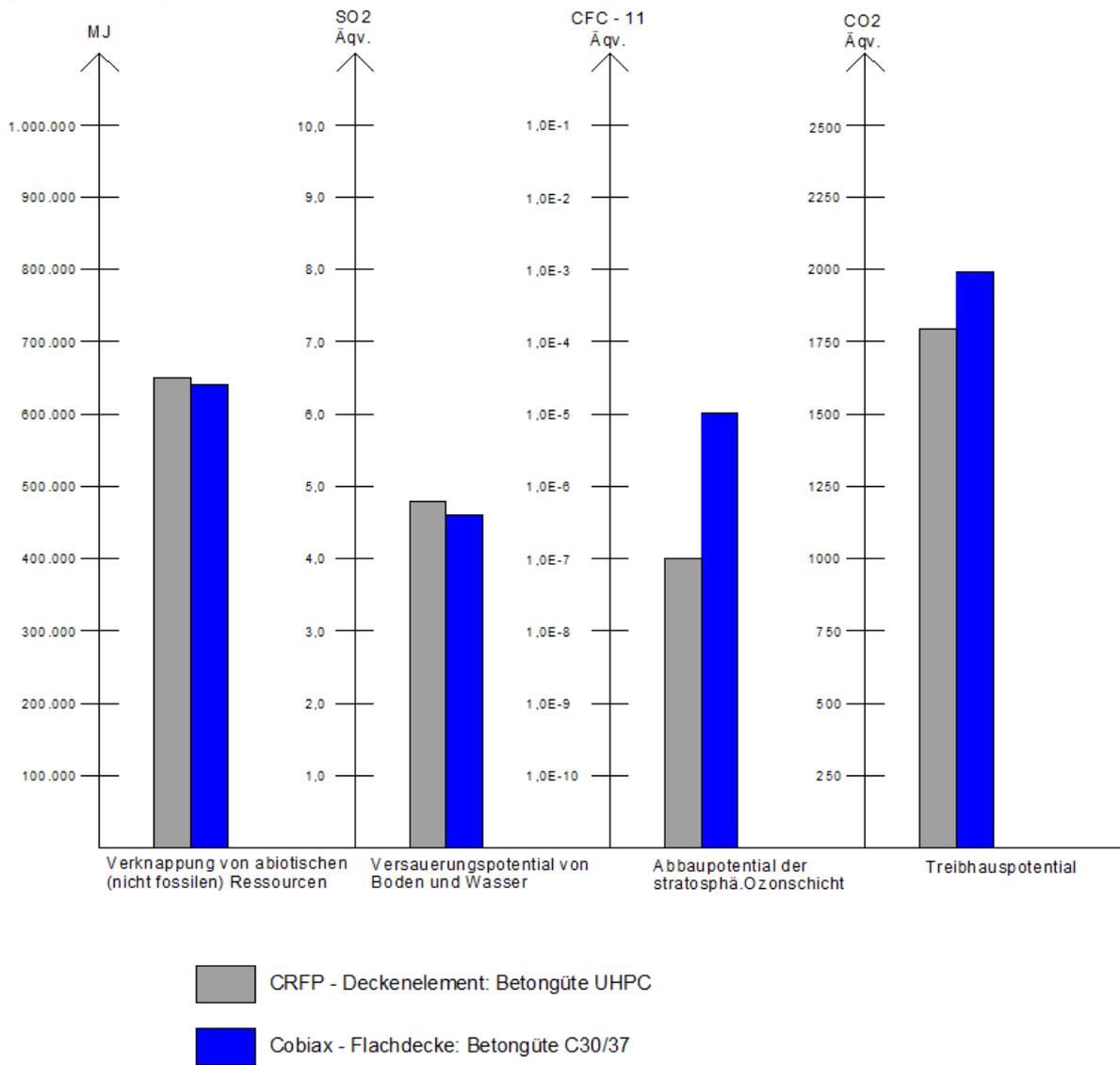
Beim Vergleich der Betonkubatur der beiden Deckenkonfigurationen wird das Einsparungspotential des mit karbonfaserbewehrten Deckenelements deutlich. Für diese Konfi-

guration sind für das gewählte statische System 1,3 m<sup>3</sup> Beton erforderlich. Die konventionell mit Bewehrungsstahl bewehrte Cobiax Flachdecke benötigt für das gleiche Tragmoment 3,8 m<sup>3</sup> Beton. Das entspricht einer Einsparung von rund 65 % des CFRP – Deckenelements obwohl bereits durch den Einsatz der Cobiax Hohlkörper das Eigengewicht im Vergleich zur Massivdecke um 1,90 kN/m<sup>2</sup> reduziert werden konnte.

Mit den Daten aus Teil 3 und der Lebenszyklusanalyse der beiden Betonmischungen kann nun die Gesamtbilanz der beiden Deckenelemente erhoben werden. Die Ergebnisse sowie ein zusammenfassendes Balkendiagramm sind in den folgenden beiden Darstellungen abgebildet.

	CFRP - Deckenelement			Cobiax - Flachdecke		
	UHPC [m <sup>3</sup> ]	Karbon - bew. [kg]	Σ	C30/37 [m <sup>3</sup> ]	Stahl - bew. [kg]	Σ
Kubatur / Masse	1,3	73	-	3,8	376	-
Verknappung von abiotischer Ressourcen (fossiler Ressourcen) in MJ	6,49E+03	6,44E+05	<b>6,51E+05</b>	5,81E+03	6,36E+05	<b>6,42E+05</b>
Versauerungspotential von Boden und Wasser in SO <sub>2</sub> - Äqv.	1,86E+00	2,95E+00	<b>4,81E+00</b>	2,01E+00	2,59E+00	<b>4,60E+00</b>
Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht in kg CFC - 11 Äqv.	3,65E-08	8,76E-06	<b>8,80E-06</b>	4,29E-08	1,13E-05	<b>1,13E-05</b>
Treibhauspotential in kg CO <sub>2</sub> - Äqv.	1,04E+03	7,53E+02	<b>1,80E+03</b>	1,09E+03	8,80E+02	<b>1,97E+03</b>

**Tab. 49:** Gesamtbilanz CFRP – Deckenelement und Cobiax - Flachdecke



**Abb. 34:** Zusammenfassung Gesamtbilanz: CRFP – Deckenelement u. Cobiax - Flachdecke

## Teil 5

### Fazit

Die Absicht dieser Arbeit bestand darin zu untersuchen, ob durch den Einsatz von carbonbewehrtem UHPC im Vergleich zu konventionellen Betontragwerken die Umweltbelastung geringer ausfällt.

Die Baubranche gehört zu den ressourcenintensivsten Wirtschaftszweigen. Durch eine verbesserte Material – und Energieeffizienz kann daher das Bauwesen eine Schlüsselrolle bei der Umsetzung von Klimazielen einnehmen. Mit dem verpflichtenden Energieausweise wurden bereits Schritte in Richtung Energieeffizienz gesetzt. Mit Blick auf die Materialeffizienz bietet die Baubranche auf Grund der immensen Massenströme große Verbesserungspotentiale.

Bezieht man die Auswertung der Lebenszyklusdaten rein auf die Produktion von jeweils 1,0 kg Karbonfaser und Stahl zeigen die Daten ganz klar, dass sowohl der Einsatz der benötigten Ressourcen, als auch die Emissionen, die Produktion der Karbonfaser erheblich größere Auswirkungen auf die Umwelt hat, als im Vergleich zur Stahlerzeugung. Bezieht man die Daten jedoch auf die Zugfestigkeit der beiden Materialien, zeigen die Daten Einsparungspotential in sämtlichen Wirkungskategorien.

Der Vergleich der Träger in Teil 4 zeigt in den Wirkungskategorien „Verknappung von abiotischen (nicht fossilen) Ressourcen“, „Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht“ und „Treibhauspotential“ geringes Einsparungspotential auf. Der Vergleich der unterschiedlichen Decken zeigt, dass das CFRP – Deckenelement sogar gegenüber dem Cobiax – Flachdeckensystem, das bereits durch einen sehr effizienten Einsatz der eingesetzten Materialien gekennzeichnet ist, in den Kategorien „Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht“ und „Treibhauspotential“ die Umweltwirkungen geringer ausfallen. Dies ist vor allem unter dem Gesichtspunkt beachtlich, da sich die ausgewerteten Daten auf die Produktion von neuen Karbonfasern beziehen und keine recycelten Faseranteile aufweisen. Da jedoch bereits Technologien für die Wiederverwendung von Karbonfaserprodukten vorhanden sind und deren Entwicklung stetig vorangetrieben wird, ist davon auszugehen, dass die Umweltbelastung durch den Einsatz von CFRP noch weiter gesenkt werden kann.

Der in dieser Diplomarbeit durchgeführte Vergleich beschränkt sich auf die Herstellung und berücksichtigt nicht den gesamten Lebenszyklus. Aus den Diagrammen in Teil 4 wird

ersichtlich, dass die Kombination aus CFRP und UHPC im Vergleich zu den mit Stabstahl bewehrten Konstruktionen in den meisten Fällen geringere Umweltbelastungen verursachen. Da jedoch UHPC nicht nur durch seine extrem hohe Festigkeit besticht, sondern auch eine extrem hohe Dauerhaftigkeit aufweist, ist ein vermehrter Einsatz von CFRP in Kombination mit UHPC empfehlenswert.

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 1:</b> Produktionsschema für PAN – basierte Kohlenstofffasern [Cherif 2011] [S.76].....	5
<b>Abb. 2:</b> Globaler Bedarf an Carbonfaser und CFK [Composites Marktbericht 2013].....	7
<b>Abb. 3:</b> Materialeinsatz Epoxidharzproduktion [Stiller 1999] [S.16] .....	15
<b>Abb. 4:</b> Arten der EPD nach einbezogenen Phasen des Lebenszyklus und Phasen des Lebenszyklus und Module für die Beschreibung und Beurteilung von Gebäuden [DIN EN 15804 2014] [S.14].....	27
<b>Abb. 5:</b> Berechnung der Mehrbelastung: Produktion Carbonfaser und Produktion Stahl pro kg .....	33
<b>Abb. 6:</b> T- Diagramm ökologische Mehrbelastung Produktion Carbonfaser und Produktion Stahl gewichtet nach der ökologischen Priorität (pro kg) .....	44
<b>Abb. 7:</b> T – Diagramm ökologische Mehrbelastung je MPa Zugfestigkeit gewichtet nach der ökologischen Priorität.....	46
<b>Abb. 8:</b> Verwertungswege von Carbonfaser / CFK Abfall [Meiners, Eversmann 2014] [S.375] .....	48
<b>Abb. 9:</b> Produktionsschema Organofolie [Meiners, Eversmann 2014] [S.377].....	50
<b>Abb. 10:</b> Querschnitt der beiden Trägerkonfigurationen: Konfiguration 1 (links); Konfiguration 2 (rechts) [Kromoser 2017][S.14] .....	54
<b>Abb. 11:</b> Bewehrungskorb (links); Konfiguration 1 und 2 (rechts) [Kromoser 2017][S.14].....	54
<b>Abb. 12:</b> Dehnungsverlauf des T – Trägers Konfiguration 1 unter einachsiger positiver Momentenbeanspruchung [Kromoser 2017][S.14].....	54
<b>Abb. 13:</b> Statisches System für die Traglastberechnung mittels FEM der T – Träger Konfigurationen [Kromoser 2017][S.15] .....	55
<b>Abb. 14:</b> statisches System Rechteckquerschnitt 20/26 cm.....	56
<b>Abb. 15:</b> einwirkendes Bemessungsmoment: $M_{y,ed}$ .....	57
<b>Abb. 16:</b> erforderliche Längs- und Bügelbewehrung .....	57
<b>Abb. 17:</b> Balkendiagramm Gesamtbilanz: T – Träger u. Rechteckquerschnitt.....	65
<b>Abb. 18:</b> Querschnitt Deckenelement [Kromoser 2017][S.11] .....	66
<b>Abb. 19:</b> Querschnitt Einzelement [Kromoser 2017][S.11].....	66
<b>Abb. 20:</b> CFRP – Bewehrungskorb (links); ausgeschaltete Einzelement (rechts) [Kromoser 2017][S.11] .....	67
<b>Abb. 21:</b> Dehnungsverlauf unter positiver Biegebeanspruchung [Kromoser 2017][S.12].....	67
<b>Abb. 22:</b> statische System CFRP – Deckenelement [Kromoser 2017][S.12].....	67
<b>Abb. 23:</b> statische System Stahlbetonmassivdecke inkl. Belastung aus Eigengewicht (autom.), Bodenaufbau und Nutzlast.....	70
<b>Abb. 24:</b> Bemessungsmoment $M_{e,d}$ .....	70
<b>Abb. 25:</b> erforderliche Bewehrung in x – Richtung (unten).....	70
<b>Abb. 26:</b> Zusammenfassung Gesamtbilanz: CFRP – Deckenelement u. Stahlbetonmassivdecke ....	74
<b>Abb. 27:</b> statisches System inkl. Belastung aus Eigengewicht, Bodenaufbau und Nutzlast.....	76
<b>Abb. 28:</b> Bemessungsmoment $M_{e,d}$ .....	76
<b>Abb. 29:</b> erforderliche Bewehrung in x – Richtung (unten).....	76
<b>Abb. 30:</b> Zusammenfassung Gesamtbilanz: CFRP – Deckenelement u. Stahlbetonmassivdecke ....	80
<b>Abb. 31:</b> statisches System inkl. Belastung aus Eigengewicht, Bodenaufbau und Nutzlast.....	85
<b>Abb. 32:</b> Bemessungsmoment $M_{e,d}$ .....	85
<b>Abb. 33:</b> erforderliche Bewehrung in x – Richtung (unten).....	85
<b>Abb. 34:</b> Zusammenfassung Gesamtbilanz: CFRP – Deckenelement u. Cobiax - Flachdecke .....	90

## Tabellenverzeichnis

<b>Tab. 1:</b> Vergleich physikalische Eigenschaften Stahl/Karbonfaser [Bergmeister 2003] [S.41].....	8
<b>Tab. 2:</b> Materialeinsatz pro Tonne erzeugter Karbonfasern [Stiller 1999] [S.14].....	14
<b>Tab. 3:</b> Materialeinsatz pro Tonne Epoxidharzproduktion [Stiller 1999] [S.16].....	16
<b>Tab. 4:</b> Materialeinsatz von textilen Bewehrungsmatten aus Karbonfaser und Epoxidharz (70% Faseranteil).....	16
<b>Tab. 5:</b> Materialeinsatz pro Tonne Rohstahl-, Stahlschrott- und Stahlproduktion (83:17) [Stiller 1999] [S.23].....	17
<b>Tab. 6:</b> Materialeinsatz pro Tonne textile Karbonbewehrung und pro Tonne Stahl in den Kategorien abiotischen Rohstoffe, Wasser, Luft; Materialaufwand pro MPa Zugkraft [t/MPa].....	18
<b>Tab. 7:</b> Übersicht der gewählten Wirkungskategorien inkl. Referenzsubstanz [DIN EN 15804 2014] [S.34].....	28
<b>Tab. 8:</b> Berechnung der Mehrbelastung in der Wirkungskategorie: Verknappung von abiotischen Ressourcen (nicht fossiler Ressourcen).....	29
<b>Tab. 9:</b> Berechnung der Mehrbelastung in der Wirkungskategorie: Verknappung von abiotischen Ressourcen (fossiler Ressourcen).....	30
<b>Tab. 10:</b> Berechnung der Mehrbelastung in der Wirkungskategorie: Versauerungspotential von Boden und Wasser.....	30
<b>Tab. 11:</b> Berechnung der Mehrbelastung in der Wirkungskategorie: Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht.....	31
<b>Tab. 12:</b> Berechnung der Mehrbelastung in der Wirkungskategorie: Treibhauspotential.....	31
<b>Tab. 13:</b> Weltweit vorhandene Reserven/Extraktionen an nicht erneuerbaren Ressourcen sowie nutzbare Jahre [Schmitz 1999] [A1-46].....	38
<b>Tab. 14:</b> Zusammenfassung der Einzelbeurteilungen der gewählten Wirkungskategorien zur Beurteilung der ökologischen Priorität nach den Kriterien: Ökologische Gefährdung und Distance-to-Target.....	43
<b>Tab. 15:</b> Berechnung ökologische Mehrbelastung Produktion Karbonfaser und Produktion Stahl je MPa Zugfestigkeit.....	46
<b>Tab. 16:</b> Materialeigenschaften UHPC [Kromoser 2017][S.10].....	53
<b>Tab. 17:</b> Materialeigenschaften textile CFRP Bewehrung [Kromoser 2017][S.10].....	53
<b>Tab. 18:</b> Materialeigenschaften Karbonbewehrungsstab [Kromoser 2017][S.10].....	53
<b>Tab. 19:</b> Berechnete Momententragfähigkeit der beiden T – Träger Konfigurationen [Kromoser 2017][S.15.].....	55
<b>Tab. 20:</b> Massenermittlung der beiden Trägerkonfigurationen.....	56
<b>Tab. 21:</b> Massenermittlung des Rechteckquerschnitts 20/26 cm.....	58
<b>Tab. 22:</b> Äquivalenztabelle der ökologischen Auswirkung der Stahlproduktion in „kg Stahl equiv.“; Basiswert: Produktion von 1,0 kg Karbonfaser.....	59
<b>Tab. 23:</b> Äquivalenztabelle der ökologischen Auswirkung der Produktion von 6,7 kg textiler Karbonbewehrung in „kg Stahl äquiv.“.....	59
<b>Tab. 24:</b> Berechnung des Einsparungspotentials bzw. Mehrbelastung der Bewehrung in den Wirkungskategorien der beiden Vergleichsquerschnitte.....	60
<b>Tab. 25:</b> Berechnung des Einsparungspotentials bzw. Mehrbelastung inkl. Anteil Epoxidharz in den Wirkungskategorien der beiden Vergleichsquerschnitte.....	61
<b>Tab. 26:</b> Zusammensetzung UHPC (pro m <sup>3</sup> ); T – Träger Konfiguration 1 [Kromoser 2017][S.5]..	62
<b>Tab. 27:</b> Zusammensetzung C30/37 (pro m <sup>3</sup> ); Rechteckquerschnitt.....	63
<b>Tab. 28:</b> Vergleich der Betonrezepturen C30/37 u. UHPC pro m <sup>3</sup> ; PENRT = Total use of nonrenewable primary energy resources; PERT = Total use of renewable primary energy resources; GWP = Global warming potential; AP = Acidification potential of land and water; EP = Eutrophication potential; ODP = Depletion potential of the stratospheric ozone layer; POCP = Formation potential of tropospheric ozone photochemical oxidations [Huber 2018].....	64

<b>Tab. 29:</b> Gesamtbilanz: T – Träger und Rechteckquerschnitt .....	64
<b>Tab. 30:</b> Materialeigenschaften UHPC [Kromoser 2017][S.10].....	68
<b>Tab. 31:</b> Materialeigenschaften textile CFRP Bewehrung [Kromoser 2017][S.10].....	68
<b>Tab. 32:</b> Zusammensetzung der Deckenkonfigurationen inkl. Momententragfähigkeit [Kromoser 2017][S.12] .....	68
<b>Tab. 33:</b> Massenermittlung der unterschiedlichen Deckenkonfigurationen.....	69
<b>Tab. 34:</b> Massenermittlung Stahlbetonmassivdecke.....	71
<b>Tab. 35:</b> Äquivalenztabelle der ökologischen Auswirkung der Produktion von 73 kg textiler Karbonbewehrung in „kg Stahl äquiv.“ .....	72
<b>Tab. 36:</b> Berechnung des Einsparungspotentials bzw. Mehrbelastung der Bewehrung in den Wirkungskategorien der beiden Deckenelemente .....	72
<b>Tab. 37:</b> Berechnung des Einsparungspotentials bzw. Mehrbelastung inklusive Epoxidharz in den Wirkungskategorien der beiden Deckenelemente .....	73
<b>Tab. 38:</b> Gesamtbilanz CFRP – Deckenelement und Stahlbetonmassivdecke.....	74
<b>Tab. 39:</b> Massenermittlung Stahlbetonmassivdecke.....	77
<b>Tab. 40:</b> Berechnung des Einsparungspotentials bzw. Mehrbelastung der Bewehrung in den Wirkungskategorien der beiden Deckenelemente .....	78
<b>Tab. 41:</b> Berechnung des Einsparungspotentials bzw. Mehrbelastung inklusive Epoxidharz in den Wirkungskategorien der beiden Deckenelemente .....	79
<b>Tab. 42:</b> Gesamtbilanz CFRP – Deckenelement und Stahlbetonmassivdecke.....	80
<b>Tab. 43:</b> CO <sub>2</sub> – Emissionen bei der Herstellung einer konventionellen massiven Flachdecke je m <sup>3</sup> [Bauer & Krause 2017] [S.16/1] .....	82
<b>Tab. 44:</b> CO <sub>2</sub> – Emissionen bei der Herstellung einer Cobiax Flachdecke je m <sup>3</sup> [Bauer & Krause 2007] [S16/2] .....	83
<b>Tab. 45:</b> Massenermittlung Cobiax Flachdeckenelement .....	86
<b>Tab. 46:</b> Äquivalenztabelle der ökologischen Auswirkung der Produktion von 73 kg textiler .....	87
<b>Tab. 47:</b> Berechnung des Einsparungspotentials bzw. Mehrbelastung der Bewehrung in den Wirkungskategorien der beiden Deckenelemente .....	87
<b>Tab. 48:</b> Berechnung des Einsparungspotentials bzw. Mehrbelastung inklusive Epoxidharz in den Wirkungskategorien der beiden Deckenelemente .....	88
<b>Tab. 49:</b> Gesamtbilanz CFRP – Deckenelement und Cobiax - Flachdecke .....	89

## Literaturverzeichnis

- BASF . (1. April 2018). *www.assets.master-builders-solutions.basf.com*. Von [https://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared%20Documents/PDF/English%20\(United%20Kingdom\)/Life%20Cycle%20Analyzer.pdf](https://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared%20Documents/PDF/English%20(United%20Kingdom)/Life%20Cycle%20Analyzer.pdf) abgerufen
- Bauer, & Krause. (2007). *Nachweis über die Reduktion von CO<sub>2</sub> - Emissionen durch Cobiax - Technologie*. Stuttgart: Fraunhofer - Instiut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO.
- Bergmeister, K. (2003). *Kolhlenstofffasern im Konstruktiven Ingenieurbau* . Wien: Ernst & Sohn.
- Cherif, C. (2011). *Textile Werkstoffe für den Leichtbau*. Dresden: Springer.
- Cobiax. (2017). *Technologiehandbuch*. Rotenturmstrasse 27/5; 1010 Vienna: Cobiax.
- Composites-Marktbericht. (2013). *2013 Marktentwicklung*. AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. .
- D. Meiners, B. E. (2014). *Recycling von Carbonfasern*. Claustahl.
- Demmel, H. (14. Januar 2016). *www.n-tv.de*. Von <http://www.n-tv.de/wirtschaft/Warum-der-Ölpreis-niedrig-ist-article16764806.html> abgerufen
- Deutsche Norm. (2009). *Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen*. Berlin: DIN EN ISO 14040.
- Deutsche Norm. (2014). *Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*. Berlin: DIN EN 15804.
- Deutsche Stiftung Weltbevölkerung. (21. Juni 2017). *UN Projektionen*. Von <https://www.dsw.org/neue-un-bevoelkerungsprojektionen-2017-entwicklung-weltbevoelkerung-bis-2100/> abgerufen
- Dr.Kulas. (19. Jänner 2015). *www.solidian.com*. Von <https://www.solidian.com/unternehmen/presse/presse-artikel/news/detail/News/textilbeton-der-solidian-gmbh-im-einsatz-in-der-schiefererlebnis-landschaft-in-dormettingen/> abgerufen
- Eurocode 2. (2013). *Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton - und Spannbetontragwerken* . Berlin: Normenausschuss Bauwesen.
- Europäische Kommission. (2001). *Grünbuch zur integrierten Produktpolitik*. Brüssel: Kommission der Europäischen Gemeinschaften.
- Europäische Kommission. (2003). *Mitteilung der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament - Auf den ökologischen Lebenszyklus-Ansatz aufbauen*. Göteborg: Europäische Akte.
- Europäische Parlament. (2005). *Entschließungsantrag des Europäischen Parlaments zur Halbzeitüberprüfung der Lissabon Strategie*. Lissabon.

- Hallwirth, L. (10. April 2017). *www.science.orf.at*. Von <http://science.orf.at/stories/2835906/> abgerufen
- HOLCIM. (2006). *Energieverbrauch / Emissionen der Kies- und Betonwerke*. Zürich.
- Huber, J. (2018). *Life Cycle Analyzer: C30/37 \_ UHPC*. Mannheim: BASF.
- Hutsteiner, R. (17. November 2017). *www.science.orf.at*. Von <http://science.orf.at/stories/2878836/> abgerufen
- Hyde, J. (2006). *Superdritical propanol, a possible route to composite carbon fibre recovery*. Composites Part A.
- Institut Bauen und Umwelt e. V. EPD: Beton der Festigkeitsklasse C30/37. (26. Juli 2013). <https://ibu-epd.com/>. Von <https://ibu-epd.com/veroeffentlichte-epds/> abgerufen
- Institut für Bauen und Umwelt e.V. EPD: Zement. (24. März 2014). <https://ibu-epd.com/>. Von <https://ibu-epd.com/veroeffentlichte-epds/> abgerufen
- Just, M. (2015). *Sicherheitskonzept für Textilbeton*. Ernst & Sohn.
- Kromoser, U. B.-I. (2017). *Building lightweight structures with CFRP-reinforced UHPC: research approach, construction materials, and conceptual design of three building components*. Insittut for Structural Engineering, TU Vienna, Karsplatz 13, 1040 Vienna: I.
- Lellan, R. M. (2014). *Living Planet Report 2014*. Gland, Switzerland: WWF International.
- Meyer, L. (2011). *Untersuchungen zur Pyrolyse - eine methode zur Rückgewinnung von Kohlenstofffasern aus CFK - Fertigungsabfällen*. Hamburg: TUHH.
- Müßig, L. (21. Juni 2017). *www.dsw.org*. Von [https://www.dsw.org/wp-content/uploads/2017/06/UN-Weltbev%C3%B6lkerungsprojektionen\\_2017\\_Highlights.pdf](https://www.dsw.org/wp-content/uploads/2017/06/UN-Weltbev%C3%B6lkerungsprojektionen_2017_Highlights.pdf) abgerufen
- Niewels, J. (2009). *Zum Tragverhalten von Betonbauteilen mit Faserverbundkunststoff-Bewehrung (Dissertation)*. Aachen: RWTH.
- ÖNORM B4707. (2017). *Bewehrungsstahl - Anforderungen, Klassifizierung und Prüfung*. Wien: ON.
- Ritthof, M. (2002). *MIPS berecgbeb - Ressourcenproduktivität von Produkten und Dienstleistungen*. Wuppertal: Wissenschaftszentrum Nordrhein-Westfalen.
- Schmidt-Bleek, F. (1994). *Wieviel Umwelt braucht der Mensch? MIPS - Das Maß für ökologischen Wirtschaften*. Basel: Birkhäuser Basel.
- Schmitz, N. (2007). *Marktanalyse und Entwicklung eines Geschäftsmodells für CFK Recycling*. Studie in Auftrag des CFK Valley Stadee.V.
- Schmitz, S. (1999). *Bewertung in Ökobilanzen - Methode des Umweltbundesamtes zur Normierung von Wirkungsindikatoren, Ordnung (Rangbildung) von Wirkungskategorien und zur Auswertung nach ISO 14042 und 14043*. Berlin: Umweltbundesamt.
- Schürmann, H. (2008). *Konstruieren mit Faser - Kunststoff - Verbunden*. Springer .
- Stiller, H. (1999). *Material Intensity of Advanced Composite Materials*. Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.

- Suzuki, T. (2005). *Prediction of Energy Intensity of Carbon Fiber Reinforced Plastics for Mass-Produced Passenger Cars*. Tokyo: The University of Tokyo.
- tagesschau.de. (22. Juni 2017). *www.tagesschau.de*. Von Zehn Milliraden Menschen bis 2050: <https://www.tagesschau.de/ausland/bevoelkerungswachstum-103.html> abgerufen
- thinkstep. (2005). <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/>. Von <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/datasetdetail/process.xhtml?uuid=db00901a-338f-11dd-bd11-0800200c9a66&version=03.00.000&stock=default> abgerufen
- Umweltbundesamt. (2004). *Emissionsfaktoren und Kohlenstoffgehalte*. Berlin: Deutsche Emissionshandelsstelle.
- Verein Deutscher Zementwerke. (2005). *Verminderung der CO<sub>2</sub> - Emissionen*. Düsseldorf: Monitorin Bericht 2000-2003.
- Willems, W. (16. September 2015). *www.science.orf.at*. Von <http://sciencev2.orf.at/stories/1762961/index.html> abgerufen
- Wolff, S. (12. Januar 2016). *www.deutschlandfunkkultur.de*. Von [http://www.deutschlandfunkkultur.de/alternative-energien-behindert-das-billige-oel-den.976.de.html?dram:article\\_id=342298](http://www.deutschlandfunkkultur.de/alternative-energien-behindert-das-billige-oel-den.976.de.html?dram:article_id=342298) abgerufen
- worldsteel. (2007). <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/>. Von <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/datasetdetail/process.xhtml?uuid=339b2536-c881-409d-ac71-49ab0d228fe3&version=03.00.000&stock=default> abgerufen