

DIPLOMARBEIT

Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks einer Betondecke im Straßenbau bei Verwendung von natürlichen und rezyklierten Gesteinskörnungen – ein Vergleich

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

von

Sophia Astner, BSc

Matr.Nr.: 01126954

unter der Anleitung von

Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. **Bernhard Hofko**
Univ. Ass. Dipl.-Ing. **Michael Gruber**

Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich Straßenwesen
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/E230-03, A-1040 Wien

Wien, im November 2022



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

Zusammenfassung

Bei der Herstellung von Betondecken im Straßenbau können sowohl natürliche Gesteinskörnungen als auch rezyklierte Gesteinskörnungen verwendet werden. Während natürliche Gesteinskörnungen aus Kiesgruben oder Steinbrüchen gewonnen werden, werden rezyklierte Gesteinskörnungen aus alten Betondecken in Recyclinganlagen hergestellt.

Inwiefern sich der Einsatz dieser beiden Gesteinskörnungen hinsichtlich der entstehenden Treibhausgasemissionen voneinander unterscheidet, wird in der vorliegenden Arbeit untersucht. Dazu werden die Treibhausgasemissionen ermittelt, die über den Lebensweg einer Betondecke entstehen – einmal bei Verwendung von natürlichen Gesteinskörnungen und einmal bei Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen. Für die Ermittlung der Treibhausgasemissionen werden Daten aus verschiedenen Datenbanken erhoben und Erfahrungswerte aus der Praxis herangezogen. Bei den betrachteten Lebenswegabschnitten handelt es sich um die Herstellung der Betonausgangsstoffe, die Betonherstellung, den Betondeckeneinbau, die Nachbehandlung der Oberfläche, die Fugenherstellung, sämtliche Materialtransporte, den Betondeckenabtrag am Ende der Lebensdauer sowie die Aufbereitung der alten Betondecke zu rezyklierter Gesteinskörnung in einer mobilen Recyclinganlage. Erhaltungsmaßnahmen und Nutzung der Straße durch den Verkehr werden hingegen nicht berücksichtigt.

Die erhobenen Treibhausgasemissionen werden anschließend auf die deklarierte Einheit von einem Kubikmeter Beton bezogen und über alle betrachteten Lebenswegabschnitte summiert. Daraus ergibt sich der CO₂-Fußabdruck der Betondecke – einmal bei Verwendung von natürlichen Gesteinskörnungen und einmal bei Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen. Ein Vergleich dieser beiden ergibt, dass der CO₂-Fußabdruck nur unwesentlich von der eingesetzten Gesteinskörnung abhängt. Die Hintergründe hierfür werden genau analysiert und diskutiert.

Darüber hinaus werden die Treibhausgasemissionen der einzelnen betrachteten Lebenswegabschnitte miteinander verglichen und jener Abschnitt mit dem größten Anteil am CO₂-Fußabdruck näher untersucht. Hierbei handelt es sich um den Betonausgangsstoff Zement, der für den Großteil der entstehenden Treibhausgasemissionen einer Betondecke verantwortlich ist. Zudem wird auf die Abhängigkeit der Ergebnisse von den herangezogenen, erhobenen Daten eingegangen.

Abstract

Both natural aggregates and recycled aggregates can be used in the production of concrete pavements. While natural aggregates are extracted from gravel pits or quarries, recycled aggregates are produced from old concrete pavements in recycling plants.

The present study investigates the extent to which the use of these two aggregates differs in terms of greenhouse gas emissions. For this purpose, the greenhouse gas emissions that arise over the life cycle of a concrete pavement are determined – once when using natural aggregates and once when using recycled aggregates. To determine the greenhouse gas emissions, data from various databases are collected and empirical values are used. The life cycle stages considered are the production of raw materials used for concrete, the production of concrete itself, concrete pavement installation, surface curing, joint construction, all material transports, concrete pavement removal at the end of its lifetime, and the processing of old concrete pavement into recycled aggregates in a mobile recycling plant. However, maintenance measures and traffic on the road during its lifetime are not taken into account.

The collected greenhouse gas emissions are then related to one cubic metre of concrete and summed up over all the considered life cycle stages. This results in the carbon footprint of the concrete pavement – once when using natural aggregates and once when using recycled aggregates. A comparison of these two shows that the carbon footprint depends only insignificantly on the aggregate used. The reasons for this are analysed and discussed in detail.

In addition, the greenhouse gas emissions of the individual life cycle stages are compared with each other, and the stage with the largest contribution to the carbon footprint is examined more closely. This concerns cement, a raw material for concrete, which is responsible for the majority of greenhouse gas emissions produced by a concrete pavement over its lifetime. In addition, the dependence of the results on the data collected is discussed.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Menschen bedanken, die mich während meiner Studienzeit unterstützt, begleitet und mit mir die Freude an der Wissenschaft geteilt haben.

Mein Dank gilt in erster Linie Herrn Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Hofko. Durch seinen Vortragstil und seine Begeisterung für die Thematik des Straßenbaus hat er auch in mir das Interesse für Straßenbaustoffe geweckt und mir darüber hinaus das Verfassen der vorliegenden Diplomarbeit ermöglicht. Auch bei Herrn Dipl.-Ing. Michael Gruber möchte ich mich herzlich für die Betreuung der Diplomarbeit bedanken. Er stand mir in jeder Situation mit Rat und Tat zur Seite und war immer für mich da.

Darüber hinaus ist es mir ein Anliegen, mich beim gesamten Forschungsbereich Straßenwesen zu bedanken. In den verschiedenen Vorlesungen und Übungen des Bachelor- und Masterstudiums wurde mir nicht nur ein ungemeiner Wissensschatz vermittelt, sondern vor allem auch meine Begeisterung und Faszination für den Straßenbau und die Wissenschaft gestärkt – Wissen gepaart mit Begeisterung lösen bei mir eines der schönsten Gefühle aus, die es gibt.

Weiters möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die mir immer zur Seite stand und immer mit mir mitgefiebert hat – danke, dass es euch gibt. Ohne euch wäre ich heute nicht da, wo ich jetzt bin. Ein ganz besonderer Dank gilt hierbei meiner Mutter Sabine, die mich von Anbeginn an mit ganzem Herzen unterstützt hat und in allen Phasen meines Studiums an mich geglaubt hat.

Schließlich möchte ich mich noch bei all meinen Studienkollegen und Freunden bedanken, die mich während meines Studiums begleitet haben – ihr habt mir so viele wundervolle Momente geschenkt und seit hier in Wien zu meiner Familie geworden. Besonders vermisse ich das stundenlange Diskutieren und Erarbeiten kniffliger Aufgaben mit euch, die es im Studium zur Genüge gab, die mich aber jedes Mal aufs Neue motiviert und erfreut haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Betonstraßen.....	4
2.1	Aufbau des Straßenkörpers mit Betondecke.....	4
2.2	Betondeckensysteme.....	5
2.2.1	Unbewehrte Betondecken.....	7
2.3	Lebensweg von Betondecken.....	8
2.3.1	Betonausgangsstoffe, Betonherstellung und -transport zum Einbauort.....	8
2.3.2	Betondeckeneinbau, Oberflächenbehandlung und Fugenherstellung	11
2.3.3	Ausbau der alten Betondecke und Betonrecycling.....	16
2.4	Österreichische Standardbauweise	19
2.5	Normen und Richtlinien	20
3	Untersuchungsrahmen und Vorgehensweise zur Ermittlung des CO ₂ -Fußabdrucks.....	21
3.1	Vorgehensweise zur Ermittlung des CO ₂ -Fußabdrucks.....	21
3.2	Betrachteter Straßenquerschnitt	22
3.3	Betrachtete Lebenswegabschnitte.....	25
3.4	Deklarierte Einheit	27
3.5	Definition der beiden Varianten A und B	27
3.6	Transportdistanzen und weitere Grafiken	28
4	Datenerhebung, Berechnung der THG-Emissionen und Ermittlung des CO ₂ -Fußabdrucks..	32
4.1	Allgemeines zur Datenerhebung	32
4.2	Herstellung der Betonausgangsstoffe.....	33
4.2.1	Datenerhebung.....	33
4.2.2	Berechnung der Treibhausgasemissionen pro m ³ Beton	38
4.3	Transport der Betonausgangsstoffe zur Mischanlage	42
4.3.1	Datenerhebung.....	42
4.3.2	Berechnung der Treibhausgasemissionen pro m ³ Beton	43
4.4	Betonmischanlage.....	44
4.4.1	Datenerhebung.....	44
4.4.2	Berechnung der Treibhausgasemissionen pro m ³ Beton	45
4.5	Transport des Betons zum Einbauort.....	45
4.5.1	Datenerhebung.....	46
4.5.2	Berechnung der Treibhausgasemissionen pro m ³ Beton	46
4.6	Herstellung weiterer Baustoffe für die Betondecke	46
4.6.1	Datenerhebung.....	46
4.6.2	Berechnung der Treibhausgasemissionen pro m ³ Beton	48

4.7	Transport der weiteren Baustoffe zum Einbauort.....	48
4.7.1	Datenerhebung.....	49
4.7.2	Berechnung der Treibhausgasemissionen pro m ³ Beton	49
4.8	Betondeckenherstellung.....	50
4.8.1	Datenerhebung.....	50
4.8.2	Berechnung der Treibhausgasemissionen pro m ³ Beton	51
4.9	Betondeckenabtrag.....	51
4.9.1	Datenerhebung.....	51
4.9.2	Berechnung der Treibhausgasemissionen pro m ³ Beton	52
4.10	Transport der abgetragenen Betondecke zur Recyclinganlage.....	52
4.10.1	Datenerhebung.....	52
4.10.2	Berechnung der Treibhausgasemissionen pro m ³ Beton	53
4.11	Ermittlung des CO ₂ -Fußabdrucks.....	53
5	Gegenüberstellung und Analyse der Ergebnisse.....	60
5.1	Gegenüberstellung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen CO ₂ -Fußabdrücke.....	60
5.2	Vergleich der Varianten A und B.....	62
5.2.1	Lebenswegabschnitt 1 – Herstellung der Betonausgangsstoffe.....	63
5.2.2	Lebenswegabschnitt 2 – Transport der Betonausgangsstoffe zur Mischanlage.....	64
5.2.3	Fazit.....	65
5.3	Anteile der betrachteten Lebenswegabschnitte am CO ₂ -Fußabdruck.....	66
5.3.1	Lebenswegabschnitt 1 – Herstellung der Betonausgangsstoffe.....	67
5.3.2	Fazit.....	69
6	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	70
	Literaturverzeichnis	73
	Tabellenverzeichnis	76
	Abbildungsverzeichnis	78
	Anhang A.....	80
	A.1 Dübel und Anker.....	80
	A.2 Fugenfüllmaterialien	82

1 Einleitung

Die Herstellung von Betonfahrbahnen hat in Österreich eine lange Tradition, die auf den Beginn des letzten Jahrhunderts zurückgeht [1], [2]. Nach einer Vielzahl von Entwicklungen [3] wird die Betondecke heutzutage vorwiegend im hochrangigen Autobahnen- und Schnellstraßennetz eingesetzt, wo rund 40 % der Straßen als Betonfahrbahnen ausgeführt sind [1], [2]. Aber auch im städtischen Gebiet kommt der Betondecke vor allem im Bereich von Busspuren, Bushaltestellen, Kreisverkehrsanlagen und im Kreuzungsbereich eine wichtige Bedeutung zu [2], [4].

Speziell bei hohen Verkehrsbelastungen ist die Lebensdauer von Betondecken länger als jene von Asphaltbefestigungen [2]. Bei richtiger Bemessung und dem Einbau nach modernen Gesichtspunkten sind Erneuerungsintervalle von (bis zu) 40 Jahren möglich [2], [4]. Wird die Betondecke schließlich ausgebaut und erneuert, ist die Abfallrahmenrichtlinie der Europäischen Gemeinschaft zu berücksichtigen. Diese sieht für Bau- und Abbruchabfälle vor, dass bis 2020 mindestens 70 % der Abfälle zur Wiederverwendung vorbereitet, recycelt bzw. stofflich verwertet werden müssen [5]. Aufgrund der Recyclingfähigkeit von Beton und dem Recycling als lang erprobtes, erfolgreiches Bauverfahren im österreichischen Betonstraßenbau ist eine Wiederverwendung der alten Betondecke im neuen Straßenkörper jedoch bereits bis zu 100 % möglich [2].

Grundlage für die Wiederverwendung der alten Betondecke im neuen Oberbau bildet das im Jahr 1990 entwickelte Recyclingkonzept, welches die Verwendung des gewonnenen und aufbereiteten Brechguts größer 4 mm als Grobzuschlag im neuen Unterbeton vorsieht bzw. die Verwendung des Brechguts kleiner 4 mm zur Stabilisierung der alten ungebundenen Tragschicht [3], [6]. Dieses Konzept fand unter anderem bei der Generalsanierung der Autobahn A1 Anwendung. Hierbei konnten durch die Wiederverwendung der alten Betondecke im neuen Straßenkörper neben ökonomischen Vorteilen wie reduzierten Material- und Transportkosten auch ökologische Vorteile festgestellt werden [7]. Zu diesen zählen ganz allgemein die Schonung natürlicher Ressourcen, die Reduzierung von Materialtransporten und die Verringerung von Deponieräumen [1], [2], [7], wodurch ein wertvoller Beitrag zum Schutz der Umwelt geleistet werden kann [1], [2].

Wie sich die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen im Vergleich zur Verwendung von natürlichen Gesteinskörnungen auf die im Betonstraßenbau entstehenden Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) auswirkt, wird in der Literatur jedoch kaum thematisiert. Zwar gibt es beispielsweise die Umwelt-Produktdeklaration in [8], welche unter anderem Werte für das Treibhausgaspotenzial von natürlichen und rezyklierten Gesteinskörnungen enthält, oder die Ökobilanz in [9], welche noch einen Schritt weitergeht und nicht nur die THG-Emissionen dieser beiden Gesteinskörnungen betrachtet, sondern zudem auch die THG-Emissionen, die bei der Betonherstellung bei Verwendung dieser Gesteinskörnungen entstehen. Von viel größerem Interesse sind nun aber jene THG-Emissionen, die über den gesamten Lebensweg einer Betondecke entstehen – auch CO₂-Fußabdruck oder Carbon Footprint genannt: von der Herstellung der Ausgangsstoffe, der Betonherstellung und dem Transport des Betons zum Einbauort, über den Einbau der Betondecke, die Nutzung und Instandhaltung der Straße, bis hin zum Ausbau der alten Betondecke sowie der anschließenden Aufbereitung zur Wiederverwertung. Diese THG-Emissionen wurden bereits in der Ökobilanz in [10] für vier verschiedene Oberbauarten ermittelt (darunter zwei Betonoberbauten und zwei Asphaltoberbauten), jedoch noch nicht für eine Betondecke mit rezyklierter Gesteinskörnung.

Daher ist es das Ziel der vorliegenden Arbeit, den CO₂-Fußabdruck einer Betondecke bei Betrachtung der beiden Varianten

- a) Verwendung von rein natürlichen Gesteinskörnungen im Deckenbeton und
- b) Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen im Deckenbeton

zu ermitteln. Dadurch können die Unterschiede in den THG-Emissionen, die sich aus dem Einsatz der natürlichen und der rezyklierten Gesteinskörnungen ergeben, quantifiziert, verglichen und den jeweiligen Lebenswegabschnitten zugeordnet werden.

Darüber hinaus besteht durch die Betrachtung der verschiedenen Lebenswegabschnitte die Möglichkeit, jene Abschnitte mit den größten THG-Emissionen auszumachen und die Ursachen dafür zu finden. Gleichzeitig kann aufgezeigt werden, welche Lebenswegabschnitte für vergleichsweise geringe THG-Emissionen verantwortlich sind und eine Optimierung der Prozesse in diesen Abschnitten somit zu keiner wesentlichen Reduktion des CO₂-Fußabdrucks führen würde.

Neben dem Vergleich der THG-Emissionen bei Verwendung von natürlichen Gesteinskörnungen mit jenen bei Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen werden in dieser Arbeit daher auch die einzelnen Lebenswegabschnitte hinsichtlich der entstehenden THG-Emissionen miteinander verglichen.

Im Folgenden wird nun noch ein kurzer Überblick über den Aufbau der vorliegenden Diplomarbeit gegeben. Beginnend mit den wesentlichen Grundlagen zu Betonstraßen in Kapitel 2, wird in diesem Kapitel das für die weitere Arbeit notwendige Wissen über den heutigen Betonstraßenbau in Österreich vermittelt. Behandelt werden dabei der Aufbau des Straßenkörpers, die verschiedenen Betondeckensysteme mit Fokus auf die österreichische Regelbauweise und der Lebensweg der Betondecke von den erforderlichen Ausgangsstoffen über den Deckeneinbau bis hin zum Recycling der alten Decke und den Möglichkeiten der Wiederverwendung. Zudem wird am Ende des Kapitels ein tabellarischer Überblick über die in Österreich geltenden Normen und Richtlinien gegeben.

In den darauffolgenden Kapiteln rückt das eigentliche Thema der Diplomarbeit – die Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks einer Betondecke – in den Fokus. Der Untersuchungsrahmen und die Vorgehensweise zur Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks werden in Kapitel 3 behandelt. Dabei wird unter anderem auf den betrachteten Straßenquerschnitt, die betrachteten Lebenswegabschnitte und die deklarierte Einheit, auf welche die Treibhausgasemissionen bezogen werden, eingegangen. Zudem werden in diesem Kapitel die beiden Varianten *Verwendung von rein natürlichen Gesteinskörnungen* und *Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen* nochmals genauer beschrieben und die Transportdistanzen für die Materialtransporte festgelegt.

An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass in der vorliegenden Arbeit aufgrund mangelnder Daten nicht alle Lebenswegabschnitte von Betondecken berücksichtigt werden können. Zu den Abschnitten, die nicht in die Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks einfließen, zählen die Nutzung der Straße sowie die erforderlichen Instandhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen zur Erreichung einer möglichst langen Lebensdauer. Alle anderen Lebenswegabschnitte werden hingegen soweit wie möglich berücksichtigt.

In Kapitel 4 folgt die Erhebung jener Daten, welche für die Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks erforderlich sind, sowie die Berechnung der Treibhausgasemissionen aus den erhobenen Daten. Aus der Summe der Treibhausgasemissionen über alle betrachteten Lebenswegabschnitte ergibt sich schließlich der CO₂-Fußabdruck der Betondecke – einmal bei Verwendung von rein

natürlichen Gesteinskörnungen (Variante A) und einmal bei Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen (Variante B) für die Herstellung der Betondecke.

Die Ergebnisse aus Kapitel 4 werden schließlich in Kapitel 5 genauer betrachtet und analysiert. Dabei werden einerseits die beiden Varianten miteinander verglichen und auf die Ursachen der sich ergebenden Unterschiede eingegangen, andererseits werden die Anteile der einzelnen Lebenswegabschnitte am CO₂-Fußabdruck der Betondecke ermittelt und jener Lebenswegabschnitt mit den höchsten Emissionen genauer untersucht.

Abschließend wird in Kapitel 6 ein Fazit über die gewonnenen Erkenntnisse gezogen und mit den Ergebnissen aus der zur Verfügung stehenden Literatur verglichen. Zudem werden jene Punkte genannt, die in der vorliegenden Diplomarbeit (aufgrund mangelnder Daten bzw. Ressourcen) nicht behandelt wurden, deren genauere Untersuchung in weiteren Arbeiten jedoch von Interesse sein könnte.

2 Betonstraßen

In diesem Kapitel wird auf die Grundlagen von Betonstraßen eingegangen, die für die anschließende Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks in den Kapiteln 3 und 4 relevant sind.

Einführend in die Thematik des Betonstraßenbaus wird in Kapitel 2.1 der Aufbau eines Straßenkörpers mit Betondecke behandelt und die Möglichkeiten der ein- und zweischichtigen Bauweise beschrieben. Im Anschluss daran werden die verschiedenen Betondeckensysteme in Kapitel 2.2 angeführt und auf den Lebensweg von Betondecken in Kapitel 2.3 eingegangen – beginnend mit der Betonherstellung und den dafür erforderlichen Ausgangsstoffen, über den Betondecken einbau und die Fugenherstellung, bis hin zum Betondeckenabtrag samt anschließender Aufbereitung der Betondecke zu wiederverwendbarer, rezyklierter Gesteinskörnung. Zum Abschluss wird nochmals zusammenfassend auf die österreichische Standardbauweise in Kapitel 2.4 eingegangen und die wichtigsten Normen und Richtlinien in Kapitel 2.5 angeführt.

Für die im vorliegenden Kapitel enthaltenen Informationen wurde in erster Linie das Buch *Betonstraßen Das Handbuch – Leitfaden für die Praxis* [2] herangezogen. Dieses enthält neben dem Fachwissen der Autoren auch die wichtigsten Informationen aus den Normen und Richtlinien, die für den Betonstraßenbau in Österreich relevant sind. Da im Folgenden nur ein Einblick in das Themengebiet des Betonstraßenbaus gegeben werden kann, wird für weiterführende Information auf [2] bzw. auf die in Kapitel 2.5 angeführten Normen und Richtlinien verwiesen.

2.1 Aufbau des Straßenkörpers mit Betondecke

Ein Straßenkörper besteht aus mehreren Schichten – unabhängig davon, ob es sich um eine Straße mit Betondecke oder um eine Straße mit Asphaltdecke handelt. Welche Schichten dies bei einer Straße mit Betondecke sind, wird im Folgenden kurz beschrieben. Für weitere Informationen zu den einzelnen Schichten und den jeweiligen Anforderungen wird auf die in Tabelle 2.1 angeführten *Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS)* verwiesen.

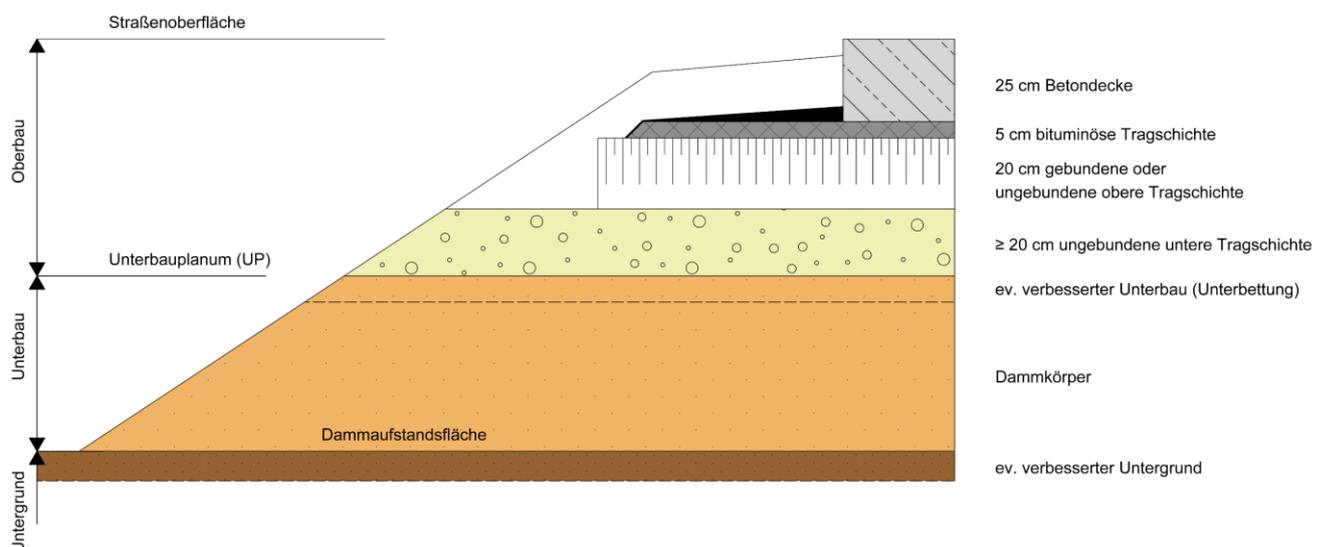


Abbildung 2.1: Aufbau des Straßenkörpers mit Betondecke, entnommen mit Genehmigung aus [2]

Wie in Abbildung 2.1 dargestellt, lässt sich der Straßenkörper in den Untergrund, den Unterbau und den Oberbau unterteilen. Der Untergrund stellt die unterste Lage dar und besteht aus dem anstehenden Boden, der eventuell zu verbessern ist. Auf dem Untergrund wird im Dammbereich der Unterbau angeordnet; im Einschnittsbereich entfällt dieser. Kann der Unterbau die an ihn gestellten Anforderungen hinsichtlich der Verdichtung und der Tragfähigkeit nicht erfüllen, ist auch dieser zu verbessern, zu stabilisieren oder durch Bodenaustausch zu ersetzen. Zudem muss das Unterbauplanum, auf welchem schließlich der Oberbau angeordnet wird, profilgerecht und eben ausgeführt sein. [2]

Für den Oberbau, der selbst aus mehreren Schichten besteht, werden in der RVS 03.08.63 *Oberbaubemessung* [11] zwei Standardbautypen unterschieden: die Bautype BE1 und die Bautype BE2. Während bei der Bautype BE1 lediglich eine ungebundene Tragschicht als Unterlage für die Betondecke vorgesehen wird, wird bei der Bautype BE2 auf der ungebundenen Tragschicht noch eine hydraulisch stabilisierte Tragschicht angeordnet. Durch die stabilisierte Tragschicht werden dauerhaft homogene Bettungsverhältnisse geschaffen, die für die Gebrauchsdauer von Betondecken wesentlich sind. Zudem sehen beide Bautypen bei höheren Lastklassen (= höhere Verkehrsbelastung) noch eine 5 cm dicke, bituminöse Tragschicht direkt unter der Betondecke vor. Diese ist erosionsbeständig und schützt die darunterliegenden Schichten vor Tausalz und Wasser, wodurch ebenfalls eine längere Gebrauchsdauer erzielt werden kann. [2]

Auf der bituminösen Tragschicht wird schließlich die Betondecke als oberste Schicht eingebaut. Diese kann entweder einschichtig oder zweischichtig hergestellt werden. Bei der zweischichtigen Bauweise wird Unterbeton für den unteren Bereich der Betondecke und Oberbeton für den oberen Bereich der Betondecke verwendet. Die Schicht aus Unterbeton wird dabei wesentlich dicker ausgeführt als die Schicht aus Oberbeton. Der Vorteil dieser Bauweise liegt darin, dass an den Unterbeton geringere Anforderungen gestellt werden und für diesen daher z.B. auch günstigere Gesteinskörnungen und Recyclingmaterialien verwendet werden können. Im Gegensatz dazu wird bei der einschichtigen Bauweise hochwertiger Beton in Oberbetonqualität über die gesamte Deckendicke eingebaut, was wesentlich unwirtschaftlicher ist. Diese Bauweise kommt daher meist nur in städtischen Bereichen oder beim händischen Einbau von kleineren Flächen zur Anwendung, während bei großen Betoneinbauflächen in der Regel zweischichtig eingebaut wird. [2]

Die Dicken der einzelnen Schichten des Oberbaus ergeben sich gemäß RVS 03.08.63 [11] in Abhängigkeit von der gewählten Bautype und der erforderlichen Lastklasse. Die in Abbildung 2.1 angeführten Schichtdicken stellen lediglich ein Beispiel dar und sind vor allem für das höherrangige Straßennetz typisch.

Nachdem in diesem Kapitel ein kurzer Einblick auf die verschiedenen Schichten des Straßenkörpers gegeben wurde, wird in den folgenden Kapiteln nur noch die oberste Schicht – die Betondecke – betrachtet.

2.2 Betondeckensysteme

Bei der konstruktiven Ausführung von Betondecken lassen sich verschiedene Deckensysteme unterscheiden, auf die im Folgenden eingegangen wird. Hintergrund dieser Deckensysteme ist die hohe Steifigkeit des Baustoffs Beton, aufgrund der es zu Rissen in der Betondecke kommen kann. Durch die hohe Verformungsresistenz entstehen nämlich infolge von Schwindvorgängen und

Temperaturänderungen Zwangsspannungen im Beton, die bei Überschreiten der Zugfestigkeit zu Rissen führen. Um mit diesen Zwangsspannungen bzw. Rissen umgehen zu können, gibt es vier verschiedene Möglichkeiten der konstruktiven Ausführung von Betondecken (= Betondeckensysteme) [2]:

1) Unbewehrte Betondecken:

Unbewehrte Betondecken werden durch Längs- und Querfugen in Felder unterteilt (siehe Abbildung 2.2). Bei den Fugen handelt es sich um Sollbruchstellen, an denen Risse kontrolliert entstehen können – willkürlich verteilte Risse werden dadurch vermieden. Dieses Betondeckensystem stellt die Regelbauweise in Österreich dar und wird daher in Kapitel 2.2.1 noch näher beschrieben. [2]

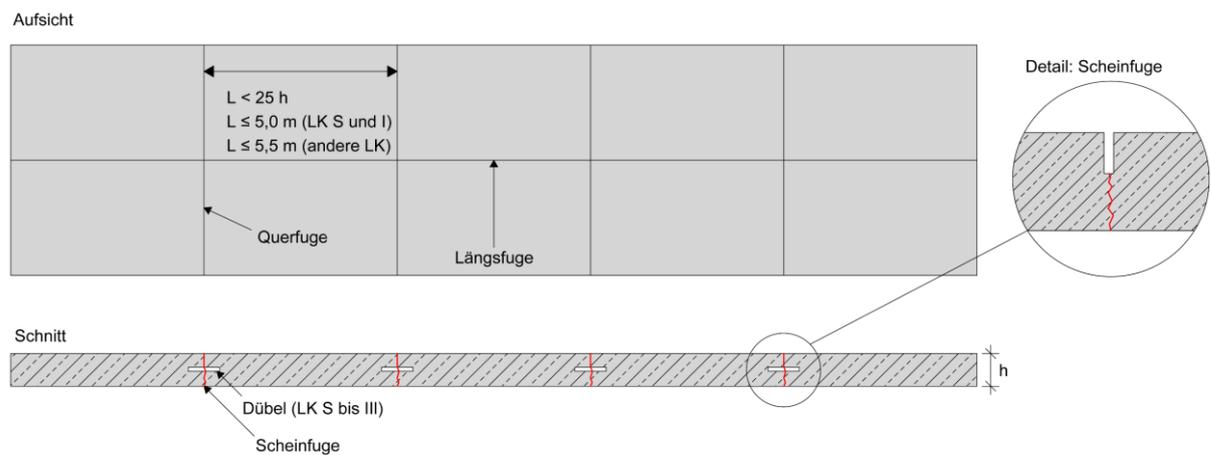


Abbildung 2.2: Unbewehrte Betondecke mit Längs- und Querfugen (schematische Darstellung) [2]

2) Schlaff bewehrte Betondecken mit Fugen:

Bei schlaff bewehrten Betondecken mit Fugen wird die Betondecke mit einer oberflächennahen Schwindbewehrung aus Baustahlgittern oder -stäben versehen, um so längere Querfugenabstände erzielen zu können als bei unbewehrten Betondecken (siehe Abbildung 2.3). Diese Ausführung kann beispielsweise planerische Gründe haben oder bei Vorliegen von sehr ungünstigen Bettungsverhältnissen notwendig sein. [2]

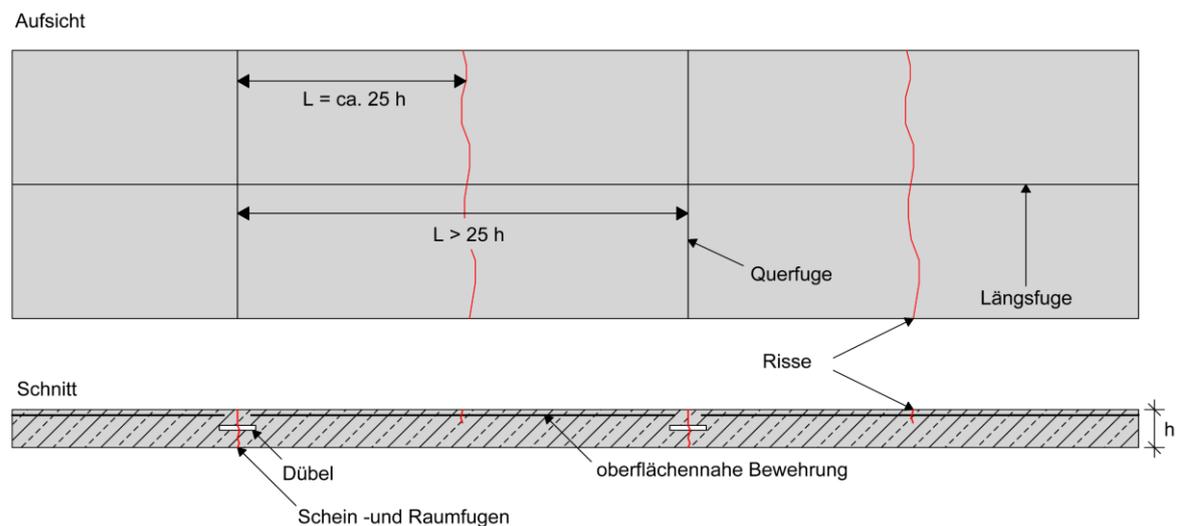


Abbildung 2.3: Schlaff bewehrte Betondecke mit Fugen (schematische Darstellung) [2]

3) Durchgehend schlaff bewehrte Betondecken:

Im Gegensatz zu schlaff bewehrten Betondecken mit Fugen wird die Betondecke in diesem Fall mit einer durchgehenden Bewehrung in Betondeckenmitte oder etwas oberhalb davon hergestellt. Auf die Anordnung von Fugen wird hierbei verzichtet (siehe Abbildung 2.4). Der Bewehrungsanteil muss so bemessen sein, dass sich Risse in relativ kurzen Abständen von 1,5 bis 3,0 m einstellen, wobei Rissweiten von maximal 0,5 mm bei Risstiefen von maximal 15 bis 20 mm erlaubt sind. Zur Anwendung kommt dieses Betondeckensystem vorwiegend in Belgien und den USA. [2]

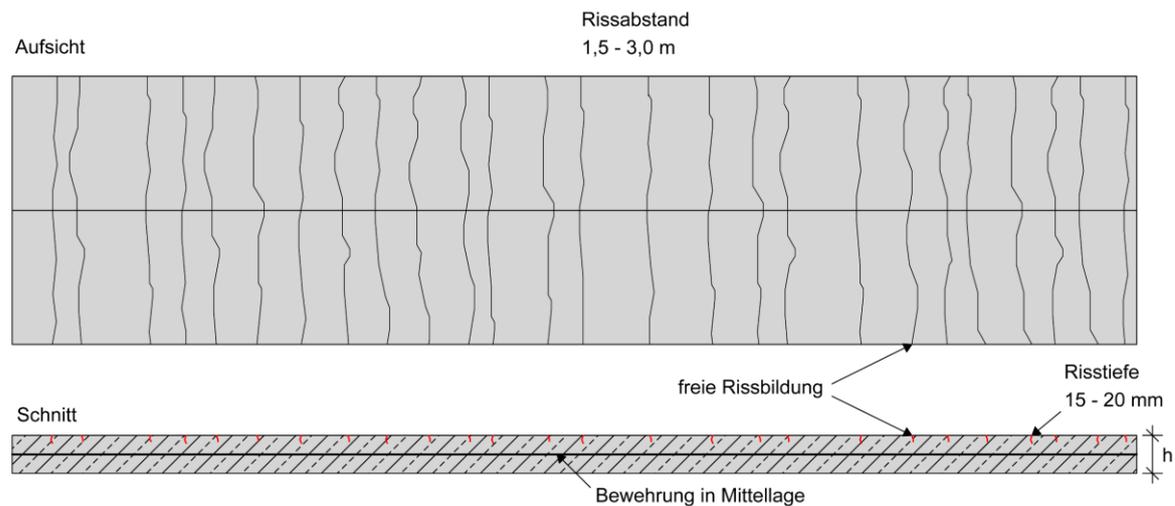


Abbildung 2.4: Durchgehend schlaff bewehrte Betondecke (schematische Darstellung) [2]

4) Vorgespannte Betondecken:

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Herstellung von vorgespannten Betondecken. Dabei handelt es sich um eine Sonderbauweise, bei der die einzelnen Deckenelemente als Fertigteile angeliefert und am Einbauort montiert werden. Bei diesem Betondeckensystem stehen eine reduzierte Deckendicke und eine Bauzeitverkürzung den höheren Herstellungskosten gegenüber. [2]

2.2.1 Unbewehrte Betondecken

Unbewehrte Betondecken stellen die Regelbauweise in Österreich dar, bei der die Betondecke durch Längs- und Querfugen in Felder unterteilt wird. Wie in Abbildung 2.2 dargestellt, verlaufen die Längsfugen dabei in Fahrtrichtung und die Querfugen normal zur Fahrtrichtung. [2]

Der Abstand zwischen zwei Querfugen wird als Feldlänge L und der Abstand zwischen zwei Längsfugen bzw. zwischen Längsfuge und Plattenrand als Feldbreite B bezeichnet. Für diese Feldabmessungen gibt es nach RVS 08.17.02 [12] bestimmte Vorgaben, die einzuhalten sind. So darf zur Begrenzung der auftretenden Temperaturspannungen die Feldlänge im Allgemeinen nicht größer als das 1,5-fache der Feldbreite sein. Weiters sollte die Feldlänge der 25-fachen Deckendicke entsprechen, darf aber maximal 5,0 m bei höheren Lastklassen bzw. 5,5 m bei niedrigeren Lastklassen betragen, um so wilde Risse infolge Verkürzung durch Abkühlen und Austrocknen des Betons zu vermeiden. [2]

Die Fugen werden dabei in der Regel als Scheinfugen ausgeführt. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass bei ihrer Herstellung nicht die gesamte Betondecke durchtrennt wird, sondern lediglich

die oberen Zentimeter angekerbt werden. Durch die auftretenden Zwangsspannungen in der Betondecke reißt diese schließlich an den hergestellten Kerben über die gesamte Dicke durch. Die Risse entstehen somit kontrolliert an den dafür vorgesehenen Sollbruchstellen und nicht wild verteilt. Zudem ist es erforderlich, Längsscheinfugen zu verankern und Querscheinfugen bei höheren Lastklassen zu verdübeln. So kann ein Auseinanderwandern benachbarter Platten verhindert werden (Längsfugen) bzw. die Kraftübertragung zwischen den Platten verbessert werden (Querscheinfugen) [2].

Auf den Einbau von Dübeln und Ankern sowie auf die Fugenherstellung wird in Kapitel 2.3.2 noch genauer eingegangen.

2.3 Lebensweg von Betondecken

Nachdem nun der Aufbau des Straßenkörpers sowie die verschiedenen Betondeckensysteme beschrieben wurden, wird diesem Kapitel auf die Lebenswegabschnitte einer Betondecke eingegangen, welche für die Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks in den Kapiteln 3 und 4 relevant sind.

2.3.1 Betonausgangsstoffe, Betonherstellung und -transport zum Einbauort

Der Lebensweg einer Betondecke beginnt mit der Herstellung des Betons aus den dafür vorgesehenen Betonausgangsstoffen. Um welche Betonausgangsstoffe es sich dabei handelt und wie die Betonherstellung abläuft, wird im Folgenden beschrieben. Zudem wird auf den Transport des hergestellten Betons zum Einbauort eingegangen.

Betonausgangsstoffe

Bei den Betonausgangsstoffen, die für die Herstellung von Straßenbeton erforderlich sind, handelt es sich um Gesteinskörnungen, Zement, Wasser und Betonzusatzmittel. Betonzusatzstoffe kommen hierbei üblicherweise nicht zum Einsatz. [2]

Im Folgenden wird nun kurz auf die einzelnen Betonausgangsstoffe eingegangen. Für weitere Informationen wird wiederum auf die in Tabelle 2.1 angeführten Normen und Richtlinien verwiesen.

- Gesteinskörnungen:

Beton besteht zu rund 70 % aus Gesteinskörnungen. Diese wirken als Stützgerüst und müssen vollständig mit Zementleim umhüllt sein. Auch die Hohlräume zwischen den einzelnen Gesteinskörnern sind mit Zementleim zu füllen. Damit hierfür möglichst wenig Zementleim erforderlich ist, ist die Zusammensetzung der Gesteinskörnung von wesentlicher Bedeutung und wird durch (Grenz-) Sieblinien vorgegeben. [2]

Bei den Anforderungen, die an die Gesteinskörnung gestellt werden, wird unterschieden, ob es sich um Gesteinskörnungen für den Unterbeton oder um Gesteinskörnungen für den Oberbeton handelt. An den Oberbeton werden grundsätzlich höhere Anforderungen gestellt als an den Unterbeton. Weiters hängen die Anforderungen davon ab, ob es sich um natürliche oder um rezyklierte Gesteinskörnungen handelt. Rezyklierte Gesteinskörnungen müssen nämlich zusätzlich zu den an die natürlichen Gesteinskörnungen gestellten Anforderungen

(z.B. Kornform, Kornzusammensetzung, Gehalt an Feinteilen) noch weitere Anforderungen (z.B. Anteil an bituminösen Anteilen < 20 %, Frost-Tausalz-Beständigkeit des Altbetons) erfüllen, um im Unterbeton verwendet werden zu dürfen. All diese sind in der RVS 08.17.02 [12] enthalten.

- Zement:

Ein weiterer Ausgangsstoff für die Herstellung von Beton ist der Zement. Bei diesem handelt es sich um ein hydraulisches Bindemittel, welches mit Wasser reagiert und dabei Zementstein bildet. Dieser verbindet die Gesteinskörner miteinander und ist wesentlich für die Güte und die Dauerhaftigkeit des Betons. Voraussetzung für eine entsprechende Qualität ist dabei das richtige Verhältnis von Wasser zu Bindemittel. [2]

Für Betondecken in Österreich kommt ein spezieller Portlandhüttenzement zum Einsatz. Bei diesem handelt es sich um den CEM II / A-S (DZ) bzw. um den CEM II / B-S (DZ). Ersterer besteht zu 80-94 % aus Portlandzementklinker und zu 6-20 % aus Hüttsand, während Zweiterer zu 65-79 % aus Portlandzementklinker und zu 21-35 % aus Hüttsand besteht. Die Abkürzung DZ hinter der Bezeichnung steht für Deckenzement. Neben den Anforderungen an Normalzement werden an den Deckenzement zusätzliche Anforderungen (z.B. hinsichtlich des Erstarrungsbeginns und der 28-Tage-Biegezugfestigkeit) gestellt, damit dieser für die Verwendung auf hochbelasteten Fahrbahnen geeignet ist. [2]

Der erforderliche Zementgehalt für die Herstellung von Straßenbeton hängt in erster Linie davon ab, ob es sich um einen Unterbeton oder um einen Oberbeton handelt. Im Oberbeton wird aufgrund der höheren Anforderungen ein höherer Zementgehalt vorgesehen als im Unterbeton. Weiters ist der Zementgehalt davon abhängig, ob der Oberbeton mit Waschbetonstruktur hergestellt wird oder nicht bzw. ob im Unterbeton Beton-Recyclingmaterial (bzw. Gesteinskörnung K1, K2) eingesetzt wird oder nicht. Die jeweiligen Werte für den Zementgehalt sind in der RVS 08.17.02 [12] angeführt.

- Zugabewasser:

Als Zugabewasser für die Reaktion mit Zement zu Zementstein kann jedes Trinkwasser verwendet werden. Brauchwasser wie Wasch- oder Regenwasser ist hingegen nicht geeignet. [2]

- Zusatzmittel:

Schließlich sind noch Betonzusatzmittel erforderlich, die dem Beton in geringen Mengen zugegeben werden, um so gewisse Betoneigenschaften gezielt zu beeinflussen. Das Betonzusatzmittel, welches für die Herstellung von Deckenbeton unerlässlich ist, ist der Luftporenbildner. Dieser erzeugt kleine Luftporen im Beton, welche für die Frost-Tausalzbeständigkeit des Betons wesentlich sind. Weiters wird durch den Luftporenbildner auch die Verarbeitbarkeit des Frischbetons verbessert und der hierfür erforderliche Wasserbedarf verringert. Bei Zugabe weiterer Zusatzmittel, wie z.B. Fließmittel oder Verzögerer, ist deren Verträglichkeit mit dem verwendeten Luftporenbildner stets nachzuweisen, um die Wirksamkeit des Luftporenbildners sicherzustellen. [2]

Betonherstellung

Sind die Betonausgangsstoffe für die Verwendung im Straßenbeton geeignet (CE-Kennzeichnung, Erstprüfung), wird daraus Beton hergestellt. Bei größeren Baulosen kommen hierfür in der Regel

mobile Mischanlagen zum Einsatz. Diese werden in unmittelbarer Nähe zum Einbauort aufgestellt und bei Fertigstellung des Bauleses wieder verladen und zur nächsten Baustelle gebracht. Bei kleineren Baulesen ist meist keine eigene Mischanlage erforderlich. In diesem Fall kann der Beton von sich in der Nähe befindenden Transportbetonwerken zugeliefert werden. [2]

Der Aufbau einer mobilen Mischanlage ist in Abbildung 2.5 schematisch dargestellt. Sie besteht im Wesentlichen aus folgenden Elementen [2]:

- Lagerflächen und Aufgabereinrichtungen für Gesteinskörnungen
- Zementlagersilos
- Lagerraum und Tanks für Zusatzmittel
- Wiege- und Dosiereinrichtungen
- Mischer

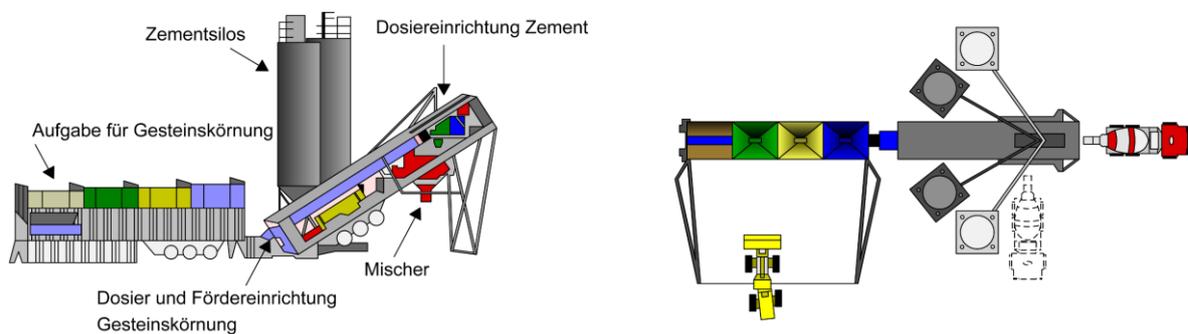


Abbildung 2.5: Mobile Mischanlage (schematische Darstellung) [2]

Wichtig bei der Lagerung der Betonausgangsstoffe ist, dass sich deren Eigenschaften (z.B. durch Entmischung oder klimatische Einwirkungen) nicht wesentlich verändern. Zudem ist bei den Gesteinskörnungen darauf zu achten, dass das Oberflächenwasser stets abfließen kann und vor allem die Oberflächenfeuchte der feinen Gesteinskörnung nicht allzu sehr schwankt. [2]

Die gelagerten Betonausgangsstoffe werden schließlich in den Mischer befördert und dort zu Beton gemischt. Das exakte Zumessen der Ausgangsstoffe erfolgt über entsprechende Wiege- und Dosiereinheiten. Meist sind die Mischanlagen mit einer Mikroprozesssteuerung ausgestattet, wodurch der Herstellungsprozess gesteuert und überwacht werden kann. In Abhängigkeit von der Oberflächenfeuchte der Gesteinskörnung erfolgt durch diese Steuerung auch eine Korrektur der Zugabewassermenge. [2]

Die Mischzeit liegt je nach Beton bei 50 bis 70 Sekunden. Zu geringe Mischzeiten führen zu einer schlechten Homogenisierung und einem nicht ausreichenden Luftporensystem im Beton, weshalb die Mischzeiten immer einzuhalten sind und eine Kontrolle des Luftgehaltes bzw. der Luftporen unerlässlich ist. Zudem sind auch die Ausstattung der Mischanlage, das Herstellverfahren und die Betoneigenschaften im Rahmen der Produktionskontrolle regelmäßig zu überwachen bzw. zu prüfen. [2]

Betontransport zum Einbauort

Ist der Beton fertig gemischt, wird er zum Einbauort transportiert. Der Transport kann mit Fahrzeugen ohne Mischwerkzeugen (z.B. bei üblichem, steifem Straßenbeton) oder mit Fahrmischern (z.B. bei Straßenbeton mit Fließmittel) erfolgen. Wichtig dabei ist, dass der Beton durch Austrocknen, Befeuchten oder Entmischen in seiner Qualität nicht beeinträchtigt wird. [2]

Auch auf eine kontinuierliche Förderung zum Einbauort ist zu achten. Besonders beim Einbau mit Betondeckenfertigern (siehe Kapitel 2.3.2) sind Stillstände durch verzögerte Anlieferungen zu vermeiden, weshalb Überlegungen zu Transportweg, Anzahl der Transportfahrzeuge und möglichen Verzögerungen bei der Anfahrt im Vorfeld zu treffen sind. [2]

2.3.2 Betondeckeneinbau, Oberflächenbehandlung und Fugenherstellung

Nachdem der Straßenbeton zum Einbauort transportiert wurde, kann mit der Herstellung der Betondecke begonnen werden. Dazu gehören der Einbau der Betondecke, die Strukturierung und Nachbehandlung der Oberfläche sowie die Herstellung von Quer- und Längsfugen. Auf diese Schritte wird nun im Einzelnen eingegangen.

Betondeckeneinbau

Die Betondecke wird im Regelfall mittels Gleitschalungsfertigern eingebaut. Ist dies nicht möglich, da beispielsweise beengte Platzverhältnisse vorliegen, erfolgt der Einbau händisch [2]. Diese beiden Möglichkeiten des Betondeckeneinbaus werden nun im Folgenden näher beschrieben:

1) Betondeckeneinbau mittels Fertiger:

Gleitschalungsfertiger sind mit sämtlichen, für den Betondeckeneinbau erforderlichen Einrichtungen ausgestattet, sodass für

- das Fördern, Verteilen und Verdichten des Betons,
- das Setzen von Dübeln und Ankern und
- das Glätten der Oberfläche

nur ein Gerät benötigt wird. Des Weiteren sind Gleitschalungsfertiger durch ihre verstellbare Breite und Höhe vielfältig einsetzbar. [2]

Zudem kann der Betondeckeneinbau mittels Fertiger sowohl ein- als auch zweischichtig erfolgen. Während beim einschichtigen Einbau nur ein Fertiger zum Einsatz kommt, werden beim zweischichtigen Einbau in der Regel zwei hintereinanderfahrende Fertiger eingesetzt. Dabei baut der vordere Fertiger den Unterbeton ein und der hintere Fertiger den Oberbeton. Wichtig dabei ist, dass der Oberbeton eingebracht und verdichtet ist, bevor der Unterbeton zu erstarren beginnt. [2]

Im Folgenden wird der Ablauf des Betondeckeneinbaus mittels Fertiger am Beispiel des zweischichtigen Einbaus näher beschrieben. Dieser ist in Abbildung 2.6 grafisch dargestellt und beginnt damit, dass der antransportierte Unterbeton vor den ersten Fertiger gelegt und mittels Bagger grob verteilt wird. Der Oberbeton wird hingegen in einen Aufnahmetrichter gefüllt und über ein Förderband zum zweiten, hinteren Fertiger befördert. Der vorgelegte Unterbeton wird nun mittels Schwertverteiler oder Verteilerschnecke nochmals gleichmäßig verteilt, sodass der Beton von der Gleitschalung aufgenommen werden kann. Das anschließende Verdichten erfolgt durch Flaschenrüttler, die am Fertiger befestigt sind. Wichtig dabei ist eine gleichmäßige Verdichtung über die gesamte Breite der Betondecke. Durch die hochfrequenten Schwingungen kann die Luft in den groben Poren entweichen – gleichzeitig darf sich der Beton aber durch eine zu hohe Verdichtungsenergie auch nicht entmischen, was zu sogenannten Rüttelgassen führen kann. In weiterer Folge werden Dübel und Anker vollautomatisch mit Dübel- und Ankersetzgeräten in die Betondecke eingerüttelt. Während all dieser

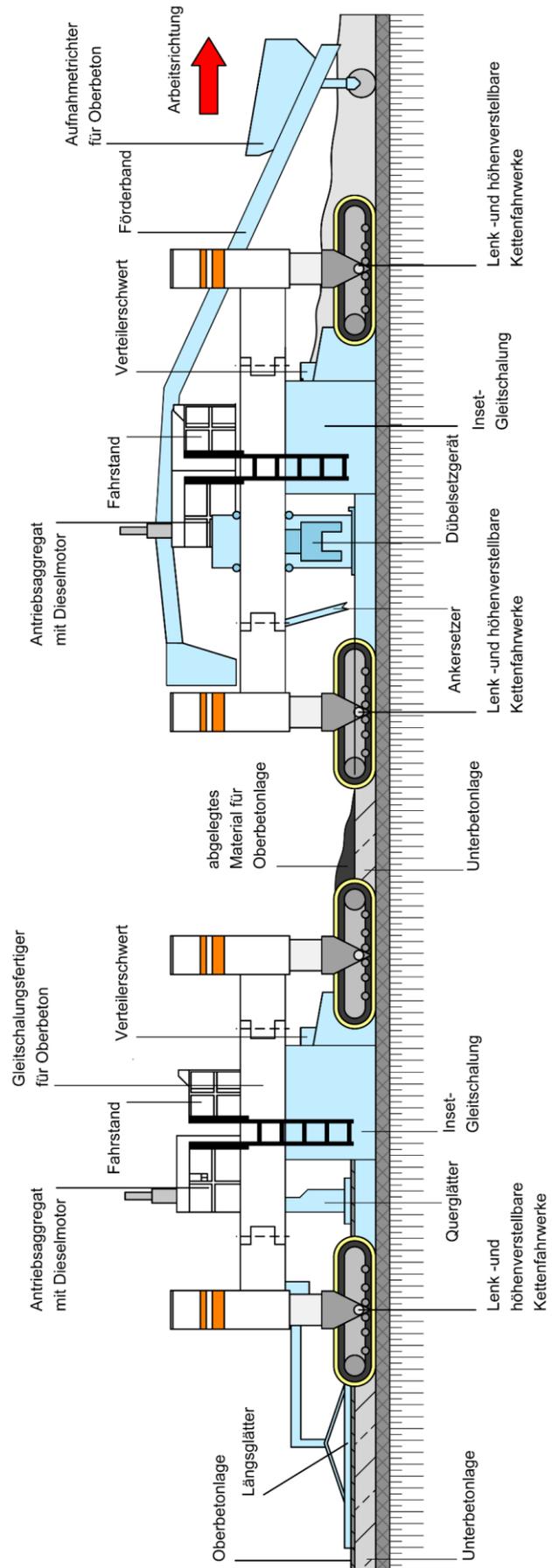


Abbildung 2.6: Zweischichtiger Betondeckeneinbau mittels Gleitschalungsfertiger (Wirtgen) [2]

Vorgänge wird die Gleitschalung kontinuierlich weitergezogen. Eine ausreichende Grundstandfestigkeit des Betons ist daher Voraussetzung, um auch nach dem Weiterziehen der Schalung in Form zu bleiben. Auf die hergestellte Unterbetonschicht folgt schließlich der Einbau des Oberbetons mit dem zweiten Fertiger. Dieser wird genauso verteilt, verdichtet und in Form gebracht wie der Unterbeton. In einem letzten Schritt wird die Oberfläche der Betondecke noch geglättet. Dies erfolgt mit einer schweren Querglättbohle, die senkrecht zur Fahrtrichtung bewegt wird, und einer Längsglättbohle, welche die Betonoberfläche durch kombinierte Längs- und Querbewegungen vollständig verschließt. [2]

Im Anschluss daran muss die Oberfläche noch strukturiert und nachbehandelt werden. Dies erfolgt beim Einsatz von Gleitschalungsfertigern meist mit einer Nachbehandlungsbühne. [2]

2) Händischer Betondeckeneinbau:

Beim händischen Einbau wird in der Regel nur einschichtig eingebaut, wobei Straßenbeton mit Fließmittel verwendet wird und das Mischgut meist Oberbetonqualität aufweist. Die Abläufe sind dieselben wie jene beim Einbau mittels Fertiger. Da die Dübel und Anker beim händischen Einbau jedoch nicht mit Dübel- und Ankeretzgeräten in die Betondecke eingerüttelt werden können, sind diese bereits vor dem Betondeckeneinbau zu verlegen und durch Dübel- und Ankerkörbe in ihrer Lage zu sichern. Weiters muss die Schalung vor dem Einbau sowohl unverschieblich sein als auch lage- und höhenmäßig exakt ausgerichtet sein. Ist dies der Fall, kann der Beton mittels Betonmischer bzw. Betonpumpe eingebracht und verdichtet werden. Für das Verdichten ist ein Klopfen mittels Rechen bzw. ein Stochern mittels Kelle meist ausreichend. Anschließend wird die Betonoberfläche noch mit einer Latte abgezogen und zur Herstellung eines ausreichenden Oberflächenschlusses mit einem Glättschwert nachgeglättet. [2]

Oberflächenstruktur und Nachbehandlung

Nachdem die Betondecke eingebaut wurde, muss die Oberfläche noch strukturiert und nachbehandelt werden. Eine Strukturierung ist erforderlich, um die Anforderungen an die Oberflächenbeschaffenheit (Rautiefe, Griffigkeit, ...) zu erfüllen, während durch eine Nachbehandlung die hergestellte Betondecke vor dem Austrocknen geschützt wird. [2]

Für die Strukturierung der Oberfläche stehen dabei folgende Möglichkeiten zur Verfügung [2]:

- Waschbetonstruktur
- Besenstrich
- Jutetuch

Die Herstellung einer Waschbetonstruktur stellt die Standardbauweise in Österreich dar. Sie wurde aufgrund ihrer lärmindernden Eigenschaften entwickelt und hat zudem sehr gute Griffigkeitseigenschaften. Um eine Waschbetonoberfläche herstellen zu können, ist ein Oberbeton mit einer speziellen Zusammensetzung erforderlich. Neben einem erhöhten Zementgehalt ist eine Gesteinskörnung zu verwenden, die eine Sieblinie mit Ausfallskörnung aufweist. Dadurch kann die grobe Gesteinskörnung an der Oberfläche – nachdem der Beton ausreichend erhärtet ist – durch Ausbürsten freigelegt werden, wodurch die typische Waschbetonstruktur entsteht. [2]

Bei der Strukturierung mittels Besen wird eine rillenförmige Struktur auf die Oberfläche eingebracht. Dies erfolgt im Allgemeinen mit einem Besenstrich längs zur Fahrtrichtung bzw. bei

langsam befahrenen Abschnitten wie beispielsweise Busbuchten und Kreisverkehren mit einem Querbesenstrich. [2]

Auch ein Jutetuch kann zur Oberflächenstrukturierung verwendet werden. Dieses wird über die gesamte Fertigerbreite gespannt und nachgezogen und ist dabei stets feucht zu halten bzw. regelmäßig zu wechseln oder auszuwaschen. Da mit diesem Verfahren die Anforderungen an die Rautiefe jedoch nicht erfüllt werden können und ein Besenstrich zudem länger hält, ist diese Art der Strukturierung heutzutage nicht mehr üblich. [2]

Unmittelbar nach der Strukturierung der Oberfläche folgt die Nachbehandlung. Dadurch kann der Beton vor zu raschem Austrocknen im oberflächennahen Bereich geschützt werden. Hierfür kommen in der Regel flüssige Nachbehandlungsmittel zum Einsatz, die auf die Oberfläche aufgesprüht werden und einen schützenden Film bilden. Weitere Möglichkeiten bestehen in der Abdeckung der Oberfläche mit einer Folie bzw. in der Nassnachbehandlung. [2]

Eine Ausnahme bei der Nachbehandlung stellt die Betondecke mit Waschbetonstruktur dar. In diesem Fall wird bereits direkt nach dem Betondeckeneinbau und vor der Herstellung der Waschbetonstruktur ein Kontaktverzögerer samt Nachbehandlungsmittel oder ein Kombinationsmittel aus beiden auf die Oberfläche aufgebracht. Zudem ist im Anschluss an die Herstellung der Waschbetonoberfläche ist der Verdunstungsschutz erneut aufzubringen, damit die Betondecke auch nach dem Ausbürsten geschützt bleibt. [2]

Fugenherstellung und -verfüllung

Etwa 6 bis 24 Stunden nach dem Betondeckeneinbau werden die Fugen hergestellt. Der genaue Zeitpunkt des Fugenschneidens ist so zu wählen, dass der Beton bereits ausreichend erhärtet ist, es aber noch zu keiner Rissbildung gekommen ist. [2]

Das Schneiden der Fuge erfolgt mittels Diamantsäge, wobei sich der Fugenschnitt mittig über den bereits eingebauten Dübeln und Ankern zu befinden hat. Der hergestellte Fugenspalt weist eine Breite von 2 bis 3,5 mm und eine Tiefe von mindestens einem Drittel der Deckendicke bei Längsfugen bzw. einem Viertel bis einem Drittel der Deckendicke bei Querschnitten auf. Bei höheren Lastklassen ist zudem im oberen Bereich des Fugenspaltes eine Aufweitung (= Stufenschnitt) vorzusehen, die anschließend verschlossen wird. Diese weist eine Breite von etwa 8 mm und eine Tiefe von etwa 20 bis 30 mm auf (siehe Abbildung 2.7). [2]

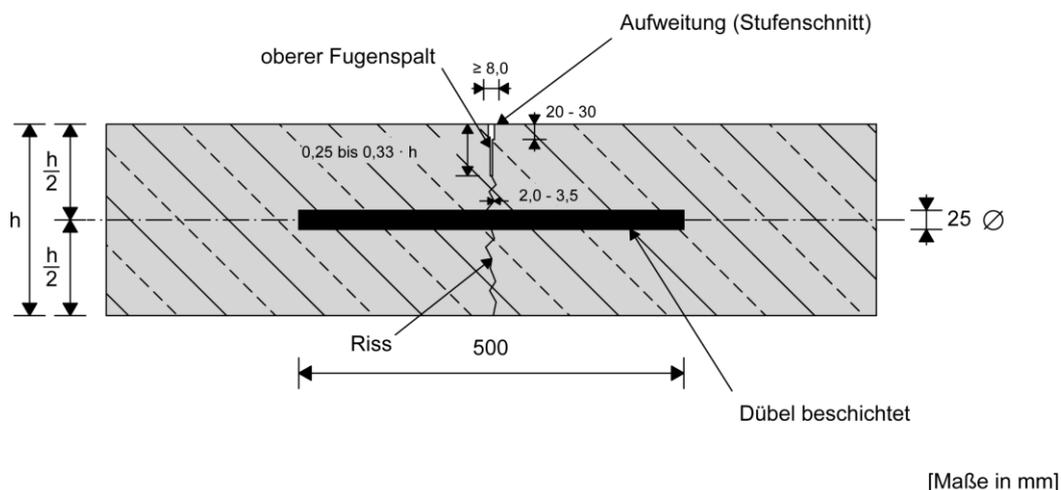


Abbildung 2.7: Scheinfuge mit Fugenspalt und Aufweitung [2]

Durch den anschließenden Fugenverschluss wird einerseits das Eindringen von Niederschlagswasser in die Fuge verhindert und andererseits das Füllen der Fuge mit Feinteilen vermieden [2]. Er kann durch

- Heißverguss,
- Kaltverguss oder
- mit Fugenprofilen

hergestellt werden. Zum Verschließen von Längsscheinfugen wird meist Heißverguss verwendet. Dabei handelt es sich um eine kunststoffmodifizierte Bitumenvergussmasse, die in die Fuge eingegossen wird, nachdem eine Unterfüllung aus hitzebeständigem, unverrottbarem Material in die Fugenkammer eingebracht wurde und die Fugenflanken gereinigt und mit einem Voranstrich versehen wurden (siehe Abbildung 2.8). Querscheinfugen werden hingegen meist mit Fugenprofilen verschlossen. Dies sind vorgefertigte Kunststoffprofile, die in die Fugenkammer eingedrückt werden (siehe Abbildung 2.9). Der Fugenverschluss durch Kaltverguss kommt aufgrund seiner Beständigkeit gegenüber Chemikalien primär auf Flugverkehrsflächen und Tankstellen zum Einsatz. [2]

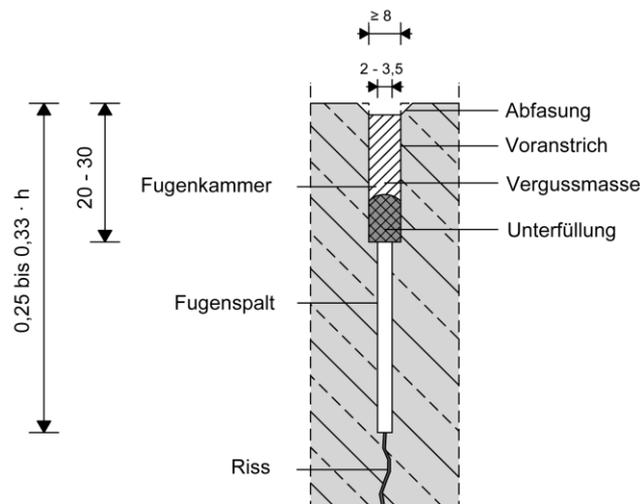


Abbildung 2.8: Fugenverschluss einer (Längs) Scheinfuge mittels Vergussmasse, Maße in mm [2]

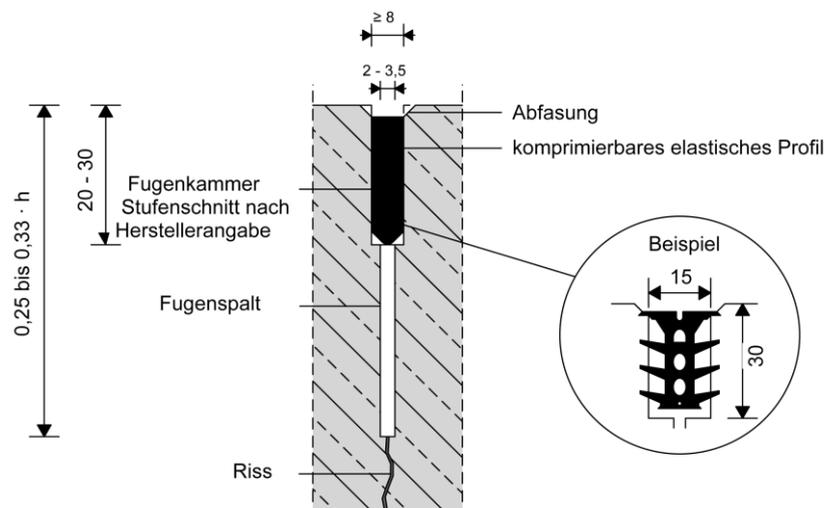


Abbildung 2.9: Fugenverschluss einer (Quer) Scheinfuge mittels Fugenprofil, Maße in mm [2]

Ist die Straße schließlich fertig hergestellt und für den Verkehr freigegeben, sind in regelmäßigen Abständen Instandhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen durchzuführen. So kann eine möglichst lange Lebensdauer der Straße erreicht werden. Da diese Maßnahmen aufgrund mangelnder Daten nicht in der anschließenden Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks berücksichtigt werden, wird auch hier nicht näher darauf eingegangen.

2.3.3 Ausbau der alten Betondecke und Betonrecycling

Nachdem die Betondecke ihre Lebensdauer erreicht hat, muss sie erneuert werden. Welche Möglichkeiten der Erneuerung es gibt und wie die alte Betondecke zu wiederverwendbarer, rezyklierter Gesteinskörnung aufbereitet werden kann, wird im Folgenden beschrieben. Weiters wird darauf eingegangen, welche Vorteile die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen mit sich bringt und in welchen Schichten die aufbereitete Gesteinskörnung wiederverwendet werden kann.

Möglichkeiten der Betondeckenerneuerung

Lassen sich die auftretenden Schäden an Betondecken durch Instandhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen nicht mehr wirtschaftlich sanieren, muss die alte Betondecke erneuert werden. Hierfür gibt es verschiedene Möglichkeiten [2]:

- die Erneuerung im Hocheinbau,
- die Erneuerung im Tiefeinbau und
- die Erneuerung in Kombination von Hoch- und Tiefeinbau

Bei der Erneuerung im Hocheinbau wird die schadhafte, alte Betondecke nicht entfernt, sondern als Unterlage für die neue Betondecke verwendet. Die alte Betondecke wird dafür in einem ersten Schritt mittels Fallschwert entspannt und zerkleinert und in einem zweiten Schritt mit einer Ausgleichsschicht aus Asphalt überbaut. Auf dieser wird schließlich die neue Betondecke eingebaut. [2]

Im Gegensatz dazu wird bei der Erneuerung im Tiefeinbau die alte Betondecke ausgebaut und durch eine neue ersetzt. Falls möglich, ist die alte Betondecke aufzubereiten und als rezyklierte Gesteinskörnung im Unterbeton der neuen Decke wiederzuverwenden. [2]

Schließlich gibt es noch die Möglichkeit, die Betondecke in Kombination von Hoch- und Tiefeinbau zu erneuern. Dabei werden die beiden beschriebenen Verfahren miteinander kombiniert, wobei grundsätzlich im Hocheinbau erneuert wird, an kritischen Stellen die alte Decke jedoch ausgebaut und durch eine neue ersetzt wird. [2]

Da in der vorliegenden Arbeit der Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen eine zentrale Rolle spielt, wird im Folgenden nur noch auf die Erneuerung im Tiefeinbau eingegangen. Konkret wird der Ausbau der alten Betondecke beschrieben und die anschließende Aufbereitung zu Recyclingzuschlag für die Wiederverwendung im Unterbeton der neuen Betondecke erläutert.

Ausbau der alten Betondecke und Aufbereitung in einer (mobilen) Recyclinganlage

Die alte Betondecke wird im Zuge des Abbruchvorgangs mittels Fallschwert entspannt und grob gebrochen. Größere Bruchstücke werden zusätzlich mit einem Bohrmeißel zerkleinert. [2]

Ob sich die alte Betondecke auch für die Aufbereitung eignet, ist durch eine genaue Erkundung festzustellen. Dazu gehören neben der Erhebung alter Unterlagen (z.B. Eignungsprüfungen, verwendete Rezepturen etc.) auch die Prüfung von Altbetoneigenschaften (z.B. Festigkeit) sowie Untersuchungen vor Ort. Zudem ist beim Abbruchvorgang auf einen möglichst sortenreinen Rückbau zu achten. [2]

Eignet sich das Material für eine Aufbereitung, wird es zu einer (mobilen) Aufbereitungsanlage gebracht und dort zwischengelagert. Die Transportdistanz vom Ausbauort zur Aufbereitungsanlage ist dabei möglichst kurz zu halten. So können Transportkilometer eingespart werden, was wiederum eine geringere Menge an Treibhausgasemissionen zur Folge hat. In einem nächsten Schritt wird das zwischengelagerte Material mittels Prallmühle zerkleinert und unerwünschte Bestandteile wie z.B. Dübel, Anker und Fugenfüllstoffe entfernt. Anschließend wird das Material noch gewaschen, gesiebt und in geeigneten Fraktionen für die Wiederverwendung gelagert (siehe Abbildung 2.10). [2]

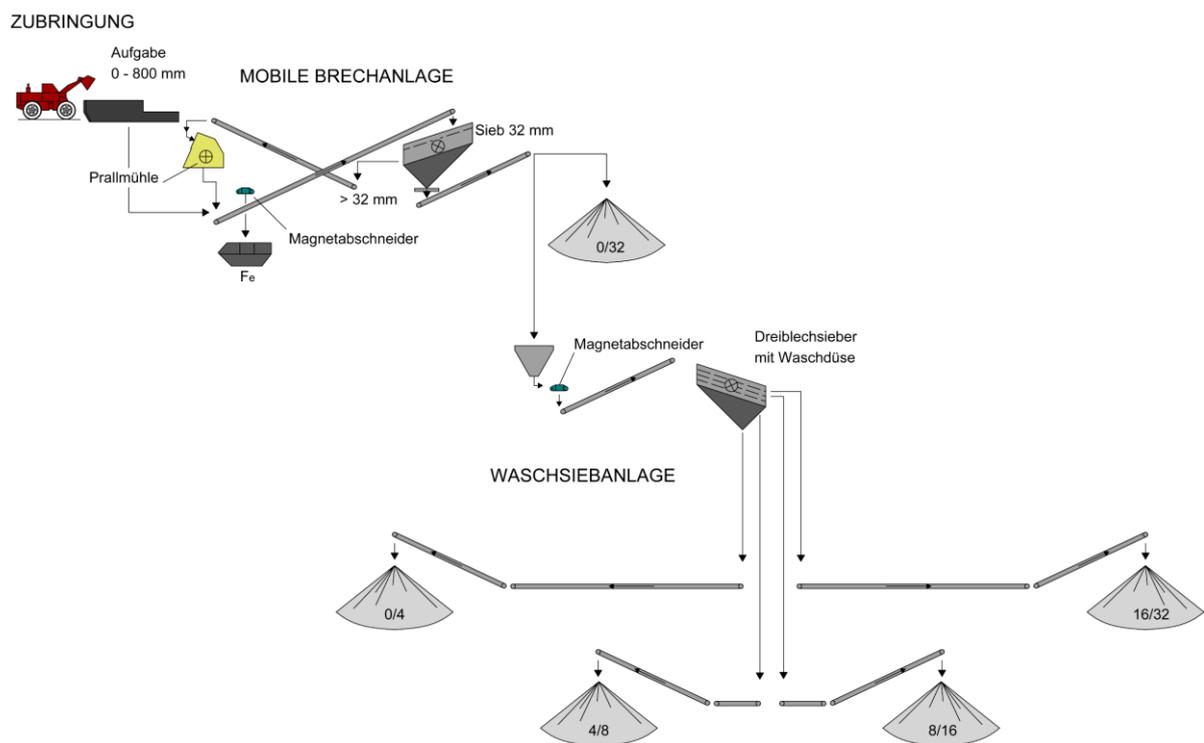


Abbildung 2.10: Betonrecyclinganlage (schematische Darstellung) [2]

Vorteile und Einsatzmöglichkeiten von rezyklierten Gesteinskörnungen

Können natürliche Gesteinskörnungen durch rezyklierte Gesteinskörnungen ersetzt werden, bringt dies einige Vorteile mit sich. Dazu zählen [2]:

- die Einsparung von natürlichen Ressourcen,
- die Reduzierung von Materialtransporten und
- die Verringerung von Deponieräumen

Diese Vorteile sind nicht nur aus ökologischer Sicht wichtig und wertvoll, sondern können auch aus ökonomischer Sicht relevant sein. So werden durch die reduzierten Transportkilometer nicht nur Treibhausgasemissionen eingespart, sondern auch Transportkosten. Ähnlich ist es mit den

Kosten für die Gewinnung natürlicher Ressourcen und die Deponierung von Abfällen, die durch das Recycling entfallen. An deren Stelle rückt zwar der Mehraufwand für die Aufbereitung, der wirtschaftliche Vorteil verschiebt sich jedoch vor allem wegen der Kosten für die Deponierung immer mehr in Richtung Recycling [2].

Für die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen gibt es nun verschiedene Möglichkeiten. Das Ziel ist stets eine möglichst hochwertige Wiederverwertung, um einen Qualitätsverlust bzw. Wertverlust des in der Regel sehr hochwertigen Altbetons zu vermeiden. [2]

Da der Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen im Oberbeton aufgrund der hohen Anforderungen an diesen nicht empfohlen wird und in der RVS 08.17.02 [12] auch nicht vorgesehen ist, besteht die höchstwertigste Wiederverwertung im Einsatz des Betonrecyclingmaterials im Unterbeton. Voraussetzung für die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen in der neuen Betondecke ist somit der zweischichtige Einbau. [2]

Das Betonrecyclingmaterial muss – um im Unterbeton verwendet werden zu dürfen – zusätzlich zu den Anforderungen, die an natürliche Gesteinskörnungen gestellt werden, noch weitere Kriterien erfüllen. Diese betreffen unter anderem die Alkali-Kieselsäure Reaktivität, den Anteil an bituminösen Anteilen sowie die Frost-Tausalz-Beständigkeit des Altbetons. Weiters dürfen nur rezyklierte Gesteinskörnungen größer 4 mm verwendet werden, da die feineren Fraktionen durch ihren erhöhten Wasserbedarf zu negativen Auswirkungen führen würden und daher durch natürliche Gesteinskörnungen ersetzt werden müssen. Bei Verwendung von Betonrecyclingmaterial ist zudem eine erhöhte Zementzugabe von +15 kg Zement / m³ Beton erforderlich (genauso wie bei Verwendung von Gesteinskörnungen der Klassen K1 und K2 [12]), was mit der größeren Oberfläche von gebrochenen Gesteinskörnungen im Vergleich zu jener von runden Gesteinskörnungen zusammenhängt. [2]

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass ein Beton, der über einen längeren Zeitraum in einer Fahrbahndecke ohne wesentlichen Qualitätsverlust gedient hat, für die Wiederverwendung als Gesteinskörnung im Unterbeton geeignet ist [2]. Kommt es jedoch vor, dass das Material die dafür notwendigen Anforderungen nicht erfüllt, so kann es auch in anderen Schichten mit geringerer Wertigkeit eingesetzt werden (z.B. in zementgebundenen Tragschichten oder in ungebundenen Tragschichten).

Die zulässigen Anwendungen und bautechnischen Einsätze sind in der *Richtlinie für Recycling-Baustoffe* [13] des Österreichischen Baustoff-Recycling Verbandes (BRV) enthalten. Diese Richtlinie befasst sich mit Recycling-Baustoffen aus mineralischen Baurestmassen und behandelt neben rezykliertem gebrochenem Betongranulat (RB) auch rezykliertes gebrochenes Asphaltgranulat (RA), rezykliertes gebrochenes Asphalt-Beton-Mischgranulat (RAB) und einige weitere.

Durch die gewonnenen Erfahrungen der letzten Jahrzehnte ist es heutzutage möglich, bis zu 100 % der alten Betondecke wiederzuverwenden (siehe Abbildung 2.11). Das aufbereitete Material der alten Betondecke, das größer als 4 mm ist (dies entspricht rund 70 % des Materials), wird dabei als grobe Gesteinskörnung für die Herstellung des neuen Unterbetons verwendet. Die restlichen 30 % hingegen sind feinere Fraktionen ≤ 4 mm, die gemeinsam mit dem Material aus der alten bituminösen Tragschicht zur Zementstabilisierung der Frostschuttschicht herangezogen werden. So ist es möglich, sämtliches Material aus der alten Betondecke in der neuen Straße optimal wiederzuverwenden. [2]

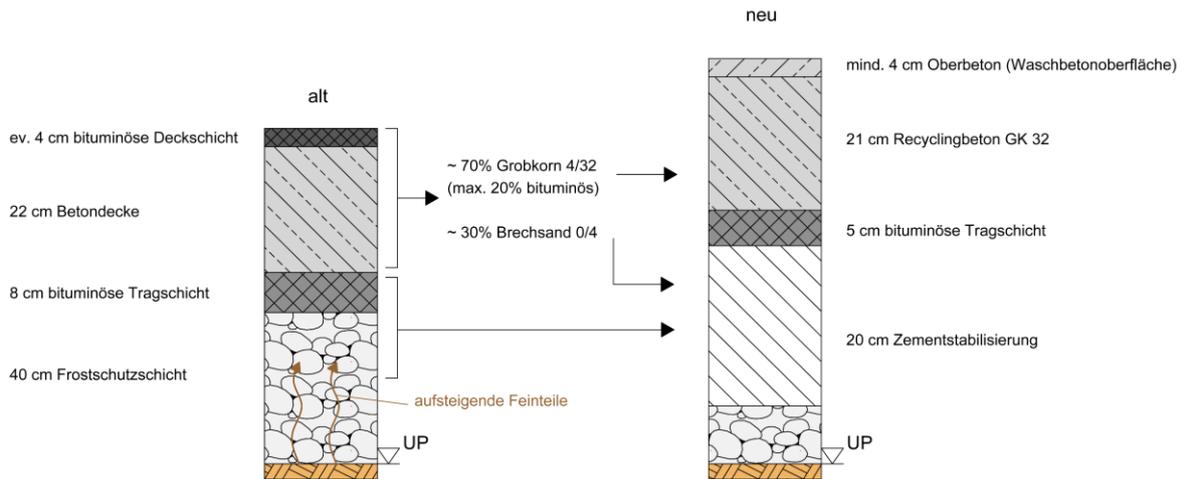


Abbildung 2.11: Bewährtes Recyclingkonzept im Betonstraßenbau [2]

2.4 Österreichische Standardbauweise

Zusammenfassend ist in Abbildung 2.12 die österreichische Standardbauweise für hochrangige Straßen dargestellt. Sämtliche in dieser Grafik enthaltenen Informationen wurden in den vorherigen Abschnitten behandelt:

- der Aufbau des Straßenkörpers mit Betondecke,
- der zweischichtige Einbau der Betondecke,
- die Einteilung der Decke in Felder mit Fugen, Dübeln und Ankern,
- die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen im Unterbeton und
- die Herstellung einer Oberfläche mit Waschbetonstruktur

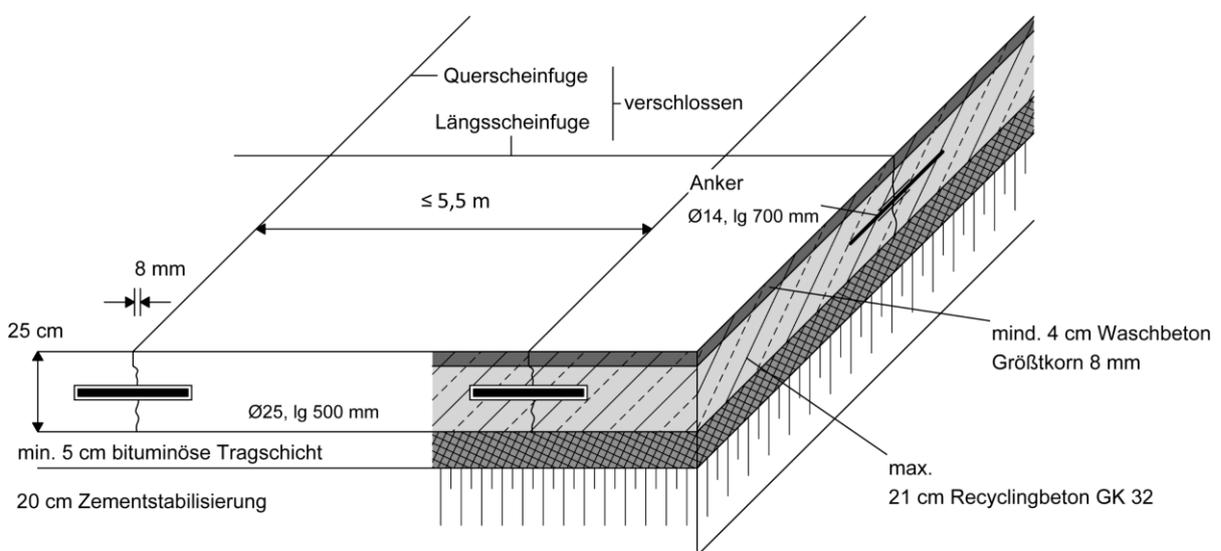


Abbildung 2.12: Österreichische Standardbauweise (Grafik VÖZfi) [2]

2.5 Normen und Richtlinien

Die wichtigsten Normen und Richtlinien zu den in diesem Kapitel behandelten Themen sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Tabelle 2.1: Wichtige Normen, Richtlinien und Verordnungen

Normen, Richtlinien und Verordnungen

Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen:

- RVS 08.03.01 Erdarbeiten
- RVS 08.15.01 Ungebundene Tragschichten
- RVS 08.17.01 Mit Bindemittel stabilisierte Tragschichten
- RVS 08.16.01 Anforderungen an Asphalttschichten
- RVS 08.17.02 Deckenherstellung
- RVS 08.17.04 Fugen in Betonfahrbahndecken
- RVS 11.06.42 Nachbehandlungsmittel für Beton
- RVS 03.08.63 Oberbaubemessung

Österreichische und europäische Normen:

- ÖNORM EN 206 Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- ÖNORM B 4710-1 Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität – Teil 1: Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206 für Normal- und Schwerbeton
- ÖNORM EN 197-1 Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement
- ÖNORM B 3327-1 Zemente gemäß ÖNORM EN 197-1 für besondere Verwendungen – Teil 1: Zusätzliche Anforderungen
- ÖNORM EN 12620 Gesteinskörnungen für Beton
- ÖNORM B 3131 Gesteinskörnungen für Beton – Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 12620
- ÖNORM B 3140 Rezyklierte Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Anwendungen sowie für Beton
- ÖNORM EN 934-2 Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel – Teil 2: Betonzusatzmittel – Definitionen, Anforderungen, Konformität, Kennzeichnung und Beschriftung

Weitere Richtlinien und Verordnungen:

- Richtlinie Recycling-Baustoffe
 - Recycling-Baustoffverordnung
-

3 Untersuchungsrahmen und Vorgehensweise zur Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks

Nachdem die theoretischen Grundlagen zu Betonstraßen in Kapitel 2 behandelt wurden, wird in diesem Kapitel auf den Untersuchungsrahmen und die Vorgehensweise zur Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks (auch Carbon Footprint genannt) einer Betondecke eingegangen.

In Kapitel 3.1 werden die dafür relevanten Normen angeführt und die in dieser Arbeit gewählte Vorgehensweise beschrieben. Im Anschluss daran wird der für die Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks herangezogene Straßenquerschnitt definiert (Kapitel 3.2), die betrachteten Lebenswegabschnitte festgelegt (Kapitel 3.3), auf die deklarierte Einheit eingegangen (Kapitel 3.4) und die beiden Varianten *Verwendung von rein natürlichen Gesteinskörnungen* und *Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen* genauer beschrieben (Kapitel 3.5). In Kapitel 3.6 sind schließlich noch die gewählten Transportdistanzen für die Materialtransporte angeführt sowie die Verknüpfung der einzelnen betrachteten Prozesse bzw. Lebenswegabschnitte grafisch dargestellt.

Die Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks selbst erfolgt in Kapitel 4, die Gegenüberstellung und Analyse der Ergebnisse in Kapitel 5.

3.1 Vorgehensweise zur Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks

Für die Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks – des Carbon Footprint von Produkten (CFP) – gibt es eine eigene internationale Norm, die ISO 14067 [14]. Diese verfolgt das Ziel der „Quantifizierung von emittierten THG-Mengen im Zusammenhang mit den Lebenswegabschnitten eines Produkts, beginnend bei der Ressourcengewinnung und Rohstoffbeschaffung über die Phasen der Produktion, der Nutzung und des Lebensendes des Produkts“ [14], um daraus „den potentiellen Beitrag dieses Produkts zur Erderwärmung zu berechnen, angegeben als CO₂Äq“ [14].

Zudem gibt es für Ökobilanzen die internationalen Normen ISO 14040 [15] und ISO 14044 [16]. Zu den Zielen von Ökobilanzen gehört es, „eine informierte Entscheidung zu einer umfassenden Anzahl von potentiellen Umweltwirkungen zu ermöglichen“ [16]. Diese geben also nicht nur Auskunft über den möglichen Beitrag eines Produkts zum Klimawandel, sondern können darüber hinaus auch noch weitere Wirkungskategorien abdecken. Zu diesen zählen nach [17] beispielsweise die Emissionskategorien

- Stratosphärischer Ozonabbau,
- Photochemische Oxidantienbildung,
- Versauerung,
- Eutrophierung und Sauerstoffzehrung,
- toxische Schädigung von Menschen durch Feinstaub

und die Ressourcenkategorien

- Naturraumbeanspruchung und
- Ressourcenbeanspruchung.

Da in der vorliegenden Arbeit jedoch der CO₂-Fußabdruck der Betondecke im Fokus steht, erfolgt die Quantifizierung des Carbon Footprint in Anlehnung an die ISO 14067. Dabei wurde bewusst eine Anlehnung gewählt, denn die Einhaltung aller darin vorgesehenen Vorgaben bzw. Anforderungen würde einerseits den Rahmen dieser Arbeit sprengen und andererseits für die in Kapitel 4 erhobenen Daten nicht in dieser Weise möglich sein.

Bei der Ermittlung des Carbon Footprint in Kapitel 4 wird daher so vorgegangen, dass in einem ersten Schritt die Treibhausgasemissionen für die betrachteten Lebenswegabschnitte und die beiden Varianten erhoben werden und diese in einem zweiten Schritt auf die deklarierte Einheit von 1 m³ Beton (siehe Kapitel 3.4) bezogen werden. Aus der Summe der Treibhausgasemissionen aller betrachteten Lebenswegabschnitte ergibt sich schließlich der CO₂-Fußabdruck der Betondecke, angegeben in kg CO₂-Äquivalenten pro m³ Beton – einmal bei Verwendung von rein natürlichen Gesteinskörnungen (Variante A) und einmal bei Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen (Variante B).

3.2 Betrachteter Straßenquerschnitt

Wie in der Einführung in Kapitel 1 beschrieben, finden Betondecken vorwiegend auf Autobahnen Anwendung. Daher wird zur Quantifizierung des CO₂-Fußabdrucks ein Autobahnabschnitt herangezogen, für den im Folgenden die Querschnittsabmessungen und die Fugenanordnungen definiert werden.

Die betrachtete Autobahnlänge ist für die vorliegende Arbeit nicht von Interesse, da die Ergebnisse nicht auf eine bestimmte Länge bezogen werden, sondern auf die deklarierte Einheit von 1 m³ Beton.

Straßenbreite:

Die Straßenbreite wird mit 12 Metern pro Richtung angenommen. Dies entspricht der Breite der befestigten Fläche des in den *Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA)* definierten Regelquerschnitts RQ 31 [18]. Bei diesem Querschnitt handelt es sich um den Standardquerschnitt für Autobahnen in Deutschland mit insgesamt vier Fahrstreifen (siehe Abbildung 3.1) [18]. Obwohl in der vorliegenden Diplomarbeit nicht auf den Betonstraßenbau in Deutschland eingegangen wird, wurde die Breite des RQ 31 herangezogen, da sich die Abmessungen der Fahr- und Abstellstreifen in Österreich kaum von jenen in Deutschland unterscheiden. Zudem ist es möglich, Betondecken bei Verwendung von Gleitschalungsfertigern über eine Einbaubreite von 12 Metern in einem Durchgang herzustellen. Entsprechende Gleitschalungsfertiger sind beispielsweise in [19] angeführt.

Weiters wird bei der Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks in Kapitel 4 angenommen, dass die Betondecke mit derselben Dicke über die gesamte Breite von 12 Metern eingebaut wird – unabhängig davon, ob es sich um einen der beiden Fahrstreifen oder um den Abstellstreifen handelt.

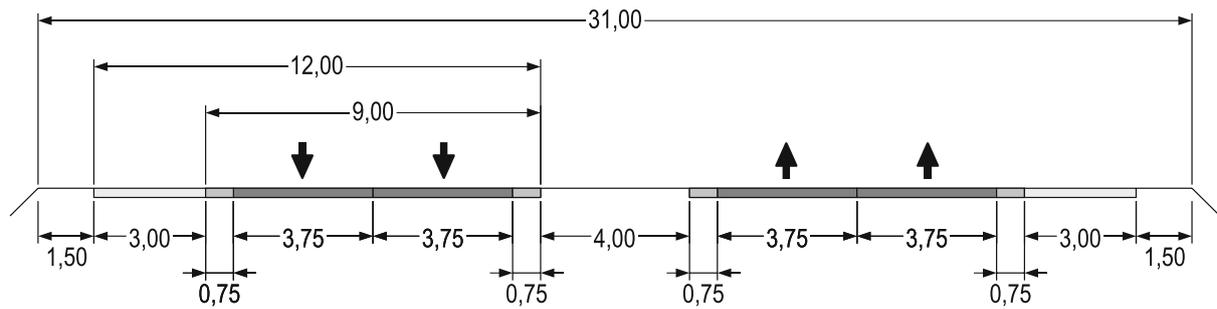


Abbildung 3.1: Regelquerschnitt RQ 31, gemeinfrei von [20]

Deckendicke:

Zur Bestimmung der Betondeckendicke wird die RVS 03.08.63 *Oberbaubemessung* [11] herangezogen. Diese unterscheidet bei Betondecken zwischen zwei Bautypen und neun Lastklassen. In Abhängigkeit von der gewählten Bautype und der Lastklasse gibt sie unterschiedliche Dicken für die Betondecke und die darunter liegenden Tragschichten vor.

In der vorliegenden Arbeit werden die Bautype BE2 und die Lastklasse LK40 (für 18-40 Mio. BNLW) gewählt, welche als repräsentativ für den betrachteten Autobahnabschnitt erachtet werden. Wie bereits in Kapitel 2.1 beschrieben, weist die Bautype BE2 (im Gegensatz zur Bautype BE1) eine hydraulisch stabilisierte Tragschicht auf, wodurch dauerhaft homogene Bettungsverhältnisse geschaffen werden, die für die Gebrauchsdauer von Betondecken wesentlich sind. Die stabilisierte Tragschicht wird dabei zwischen der ungebundenen Tragschicht und der bituminösen Tragschicht angeordnet.

Die gewählte Lastklasse LK40 entspricht der Lastklasse LK S aus früheren Versionen der RVS 03.08.63, welche damals die höchste Lastklasse war. Inzwischen gibt es zwei Lastklassen, die auf eine noch höhere Verkehrsbeanspruchung ausgelegt sind. Es wurde jedoch entschieden, dass die Lastklasse LK40 für den betrachteten Autobahnabschnitt mit zwei Fahrstreifen pro Richtung ausreichend ist.

Die sich für die Bautype BE2 und die Lastklasse LK40 ergebenden Dicken der Betondecke und der darunter liegenden Tragschichten sind in Abbildung 3.2 dargestellt. Von Interesse für die anschließende Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks ist lediglich die Betondeckendicke, welche 25 cm beträgt.

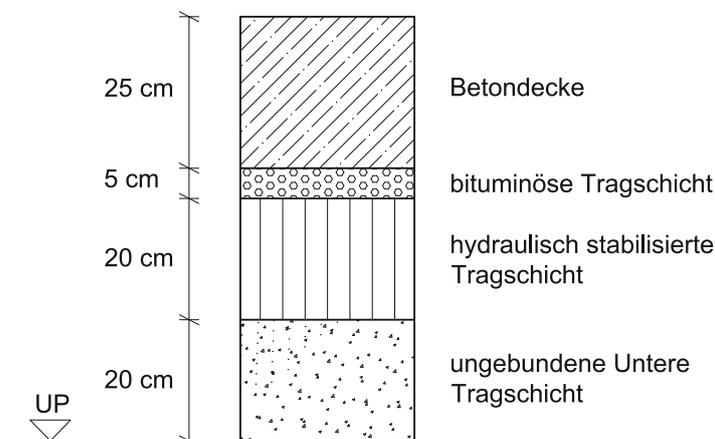


Abbildung 3.2: Dicke der Betondecke und der darunter liegenden Tragschichten gemäß [11]

Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, kann die Betondecke entweder einschichtig oder zweischichtig eingebaut werden. Da bei großen Betoneinbauflächen in der Regel zweischichtig eingebaut wird, wird diese Bauweise auch für die Berechnung des CO₂-Fußabdrucks gewählt. Die 25 cm dicke Betondecke besteht somit im unteren Bereich aus Unterbeton und im oberen Bereich aus Oberbeton.

Die RVS 08.17.02 *Deckenherstellung* [12] sieht für den Oberbeton in Abhängigkeit vom gewählten Größtkorn verschiedene Regeldicken vor. Da in Kapitel 4 für den Oberbeton ein Waschbeton mit einem Größtkorn von 8 Millimetern (GK 8) verwendet wird, ergibt sich die Dicke des Oberbetons gemäß [12] zu 4 cm. In weiterer Folge lässt sich aus dieser Oberbetondicke und der Gesamtdicke von 25 cm die Dicke des Unterbetons ableiten. Diese beträgt somit 21 cm.

Fugenanordnung:

Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, wird die Betondecke in Österreich durch Fugen in Felder unterteilt. Die Längsfugen werden hierbei zwischen den beiden Fahrstreifen bzw. zwischen dem Fahrstreifen und dem Abstellstreifen des Regelquerschnitts RQ 31 angeordnet, während für die Anordnung der Querfugen die Vorgaben nach RVS 08.17.02 [12] gelten. Diese sehen vor, dass der Abstand zwischen zwei Querfugen grundsätzlich der 25-fachen Deckendicke entsprechen soll, bei der gewählten Lastklasse LK40 jedoch höchstens 5,0 m betragen darf. Zudem darf der Abstand im Allgemeinen nicht größer als das 1,5-fache der Feldbreite sein. Schlagend wird im vorliegenden Fall das Kriterium, dass der Abstand zwischen zwei Querfugen höchstens 5,0 m betragen darf.

Zusammengefasst sind die in diesem Kapitel definierten Abmessungen des Straßenquerschnitts und Fugenabstände nochmals in Abbildung 3.3 grafisch dargestellt.

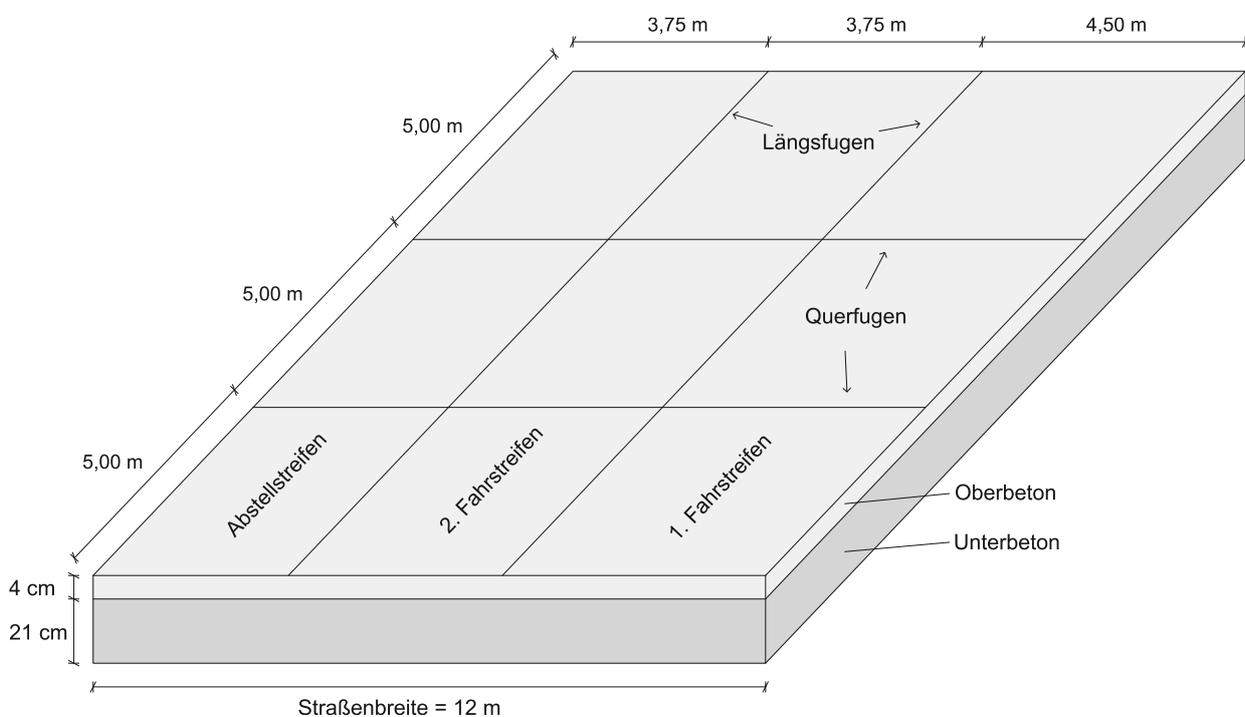


Abbildung 3.3: Abmessungen des Straßenquerschnitts samt Fugenanordnung

3.3 Betrachtete Lebenswegabschnitte

Nachdem der betrachtete Straßenquerschnitt in Kapitel 3.2 festgelegt wurde, wird in diesem Kapitel auf die Lebenswegabschnitte der Betondecke eingegangen, die bei der Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks berücksichtigt werden.

Zuvor wird jedoch noch der Begriff *Lebensweg* gemäß ISO 14067 [14] definiert. Demnach handelt es sich dabei um „aufeinanderfolgende und miteinander verbundene Stufen in Verbindung mit einem *Produkt* [...] von der Rohstoffgewinnung oder Rohstoffherzeugung bis zur Behandlung am Ende des Produktlebenswegs“ [14]. Die ISO 14067 sieht vor, dass bei der Quantifizierung des Carbon Footprint der gesamte Lebensweg des Produkts betrachtet wird. Werden nicht alle Lebenswegabschnitte betrachtet, wird vom sogenannten partiellen Carbon Footprint gesprochen. Bei diesem handelt es sich um die „Summe der emittierten *THG-Mengen* [...] durch einen oder mehrere ausgewählte *Prozesse* [...] in einem *Produktsystem* [...], angegeben als *CO₂-Äquivalente* [...] und beruhend auf den ausgewählten Abschnitten oder Prozessen innerhalb des *Lebenswegs* [...]“ [14].

Da – wie folgt beschrieben – nicht alle Lebenswegabschnitte einer Betondecke erhoben und betrachtet werden (können), handelt es sich streng genommen um den partiellen Carbon Footprint, der quantifiziert wird. Unter der Voraussetzung, dass sich der Leser der in der vorliegenden Arbeit betrachteten Lebenswegabschnitte bewusst ist, wird der Einfachheit halber weiterhin vom Carbon Footprint bzw. dem CO₂-Fußabdruck gesprochen.

Bei den betrachteten Lebenswegabschnitten, die in die Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks einfließen, handelt es sich schließlich um:

- 1) die Herstellung der Betonausgangsstoffe (inkl. rezyklierter Gesteinskörnungen)
- 2) den Transport der Betonausgangsstoffe zur Mischanlage
- 3) die Betonmischanlage
- 4) den Transport des Betons zum Einbauort
- 5) die Herstellung weiterer Baustoffe für die Betondecke
- 6) den Transport der weiteren Baustoffe zum Einbauort
- 7) die Betondeckenherstellung
- 8) den Betondeckenabtrag
- 9) den Transport der abgetragenen Betondecke zur Recyclinganlage

Nicht berücksichtigt werden hingegen (aufgrund mangelnder Daten) die Nutzung der Straße sowie die erforderlichen Instandhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen über die Lebensdauer der Betondecke.

Für die neun betrachteten Lebenswegabschnitte werden zudem einige Annahmen getroffen, die für die Erhebung der Daten in Kapitel 4 von Bedeutung sind, und auf die daher kurz eingegangen wird:

- Bei der betrachteten Betonmischanlage und der Recyclinganlage handelt es sich um mobile Anlagen. Durch deren Einsatz verringern sich im Vergleich zu stationären Anlagen die Transportdistanzen der Lebenswegabschnitte 2 (im Speziellen die Transportdistanz der rezyklierten Gesteinskörnungen zur mobilen Betonmischanlage), 4 (die Transportdistanz des Betons zum Einbauort) und 9 (die Transportdistanz der abgetragenen Betondecke zur mobilen Aufbereitungsanlage). Der Einsatz von stationären Mischanlagen bzw. stationären Recyclinganlagen wird in der vorliegenden Arbeit nicht behandelt.

- Bei den genannten weiteren Baustoffen in den Lebenswegabschnitten 5 und 6 handelt es sich um Hilfsmittel und Materialien, die neben dem Beton zur Herstellung einer Betondecke notwendig sind. Betrachtet werden in der vorliegenden Arbeit Dübel und Anker, Nachbehandlungsmittel sowie Fugenfüllmaterialien. Obwohl diese Materialien nur in sehr geringen Mengen eingesetzt werden, werden die bei ihrer Herstellung und ihrem Transport entstehenden Treibhausgasemissionen aus Gründen der Vollständigkeit erhoben.
- Der Einbau der Betondecke im Lebenswegabschnitt 7 erfolgt mittels Gleitschalungsfertigern über die gesamte Straßenbreite von 12 Metern in einem Durchgang. Für die Oberflächenbehandlung kommt eine Nachbehandlungsbühne zum Einsatz. Auf den händischen Einbau des Betons wird in der vorliegenden Arbeit nicht eingegangen, da ihm im Autobahnbau eine eher geringe Bedeutung zukommt.

Zudem ist an dieser Stelle zu erwähnen, dass die Lebenswegabschnitte 1, 2 und 3 in ebendiese Abschnitte unterteilt wurden und die Daten in Kapitel 4 für diese Abschnitte getrennt erhoben wurden. Anstatt dieser Unterteilung hätten die drei Lebenswegabschnitte auch zu einem einzigen Lebenswegabschnitt zusammengefasst werden können und die Treibhausgasemissionen direkt für 1 m³ hergestellten Beton erhoben werden können. Dies wäre ein geringerer Aufwand gewesen und es hätten in verschiedenen Datenbanken ausreichende Mengen an Daten zur Verfügung gestanden. Im Folgenden wird daher kurz beschrieben, warum dennoch gegen eine Zusammenfassung der drei Lebenswegabschnitte entschieden wurde und diese für die vorliegende Arbeit auch nicht zweckmäßig gewesen wäre:

- Im Lebenswegabschnitt 1 können durch die Unterteilung in die verschiedenen Abschnitte die Ausgangsstoffe für den Straßenbaubeton selbst gewählt werden und anschließend nach eigenen Betonrezepten gemischt werden. Das gilt sowohl für den Unterbeton als auch für den Oberbeton.
Bei der Erhebung von Daten für den zusammengefassten Lebenswegabschnitt wären sowohl die Betonausgangsstoffe als auch die Betonrezepte bereits vorgegeben gewesen. Zudem würde es sich in vielen Fällen um keinen Straßenbaubeton handeln, sondern beispielsweise um einen Beton aus dem Hochbau, welcher für die vorliegende Arbeit jedoch nicht von Interesse ist.
- Zudem können durch die eigene Wahl der Betonausgangsstoffe die beiden Varianten *Verwendung von rein natürlichen Gesteinskörnungen* und *Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen* für die Herstellung von Straßenbaubeton unterschieden werden, was zu den Hauptaufgaben der vorliegenden Arbeit gehört.
- Auch die Transportdistanzen der Betonausgangsstoffe zur Mischanlage können durch die getrennte Erhebung im Lebenswegabschnitt 2 selbst gewählt werden, was besonders für den Vergleich der beiden Varianten von Bedeutung ist.
- Weiters kann bei der Analyse der Ergebnisse in Kapitel 5 durch die Betrachtung der einzelnen Lebenswegabschnitte genau festgestellt werden, welcher Lebenswegabschnitt für welchen Anteil am CO₂-Fußabdruck verantwortlich ist und darüber hinaus auch welcher Betonausgangsstoff für welchen Anteil verantwortlich ist.

All dies wäre durch Zusammenfassen der Lebenswegabschnitte 1, 2 und 3 zu einem einzigen Lebenswegabschnitt und der Erhebung der THG-Emissionen für diesen zusammengefassten Abschnitt nicht möglich.

3.4 Deklarierte Einheit

Nachdem nun auf den Straßenquerschnitt und die Lebenswegabschnitte zur Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks eingegangen wurde, werden in diesem Kapitel die Begrifflichkeiten *funktionelle Einheit* und *deklarierte Einheit* erläutert sowie die Vergleichseinheit für die Berechnungen in Kapitel 4 festgelegt.

Gemäß ISO 14067 [14] ist die „CFP-Studie [...] um eine funktionelle Einheit (CFP) oder um eine deklarierte Einheit (partieller CFP) aufgebaut und die Ergebnisse werden bezogen auf diese funktionelle Einheit oder deklarierte Einheit berechnet“. Diese Einheiten dienen somit „im Wesentlichen dazu, einen Bezug zu schaffen, auf den die Inputs und die Outputs bezogen werden“ [14]. Sie werden wie folgt definiert:

- Funktionelle Einheit: „quantifizierter Nutzen eines *Produktsystems* [...] für die Verwendung als Vergleichseinheit“ [14].
- Deklarierte Einheit: „Menge eines *Produkts* [...] für die Verwendung als eine Vergleichseinheit bei der Quantifizierung eines *partiellen CFP* [...]“ [14].

In der vorliegenden Arbeit wird die deklarierte Einheit als Vergleichseinheit herangezogen, da streng genommen nicht der Carbon Footprint, sondern der partielle Carbon Footprint quantifiziert wird (siehe Kapitel 3.3). Bei der gewählten deklarierten Einheit handelt es sich um 1 m³ Beton. Eingebaut in der Betondecke besteht dieser – für die in Kapitel 3.2 festgelegten Unterbeton- und Oberbetondicken – aus 0,84 m³ Unterbeton und aus 0,16 m³ Oberbeton (siehe Abbildung 3.4). Diese Unterteilung ist für bestimmte Berechnungen in Kapitel 4 von Relevanz, da z.B. für den Unterbeton und den Oberbeton verschiedene Betonrezepturen verwendet werden.

In weiterer Folge werden die Treibhausgasemissionen auf diese deklarierte Einheit bezogen und daraus schließlich der CO₂-Fußabdruck ermittelt.

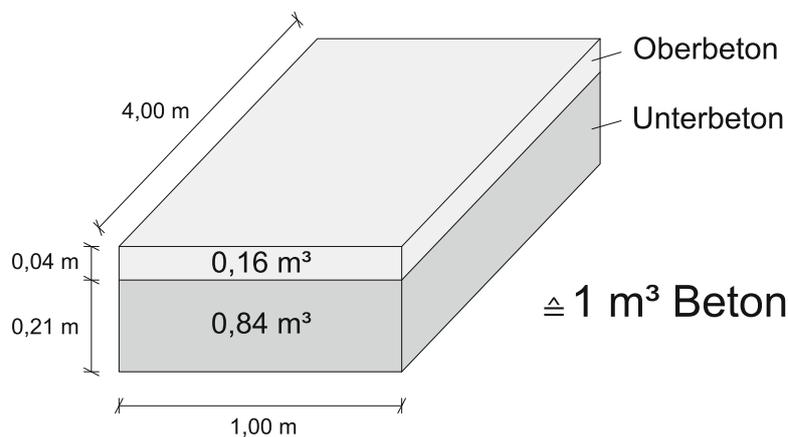


Abbildung 3.4: Zusammensetzung eines Kubikmeters Beton in der eingebauten Betondecke

3.5 Definition der beiden Varianten A und B

Eines der Hauptziele der vorliegenden Arbeit ist der Vergleich des CO₂-Fußabdrucks von Betondecken bei Verwendung von rein natürlichen Gesteinskörnungen (Variante A) mit jenem bei Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen (Variante B). Da nun aber nicht alle

Gesteinskörnungen in einer Betondecke durch rezyklierten Gesteinskörnungen ersetzt werden dürfen, wird in diesem Kapitel nochmals genauer auf die Definition der beiden Varianten eingegangen.

Während im Fall von Variante A für die Herstellung der Betondecke zu 100 % natürliche Gesteinskörnungen verwendet werden, werden im Fall von Variante B die natürlichen Gesteinskörnungen überall dort durch rezyklierte Gesteinskörnungen ersetzt, wo es die RVS 08.17.02 [12] zulässt. Wie bereits in Kapitel 2.3.3 beschrieben, gibt es für die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen im Straßenbaubeton gewisse Vorgaben bzw. Einschränkungen. So ist die Verwendung von Betonrecyclingmaterial im Oberbeton aufgrund der höheren Anforderungen an diesen grundsätzlich nicht vorgesehen. Im Unterbeton hingegen darf das Aufbruchmaterial von alten Betondecken ab einer Größe von 4 mm und bei Erfüllung bestimmter Anforderungen verwendet werden. Letztere werden in der vorliegenden Arbeit als erfüllt angenommen. Daraus ergibt sich schließlich, dass im Fall von Variante B nicht ausschließlich rezyklierte Gesteinskörnungen eingesetzt werden dürfen, sondern zu einem gewissen Anteil auch natürliche Gesteinskörnungen erforderlich sind.

Ein Überblick über die in den Varianten A und B verwendeten Gesteinskörnungen ist in Abbildung 3.5 nochmals zusammenfassend dargestellt.

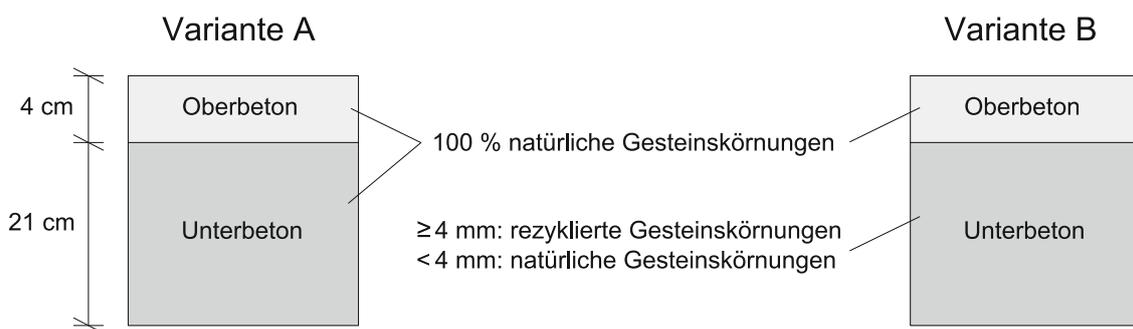


Abbildung 3.5: Verwendete Gesteinskörnungen im Fall von Variante A und Variante B

In den folgenden Kapiteln werden oft nur noch die Begriffe Variante A und Variante B verwendet, wobei vorausgesetzt wird, dass bekannt ist, worum es sich bei diesen Begrifflichkeiten handelt. Weiters wird vorausgesetzt, dass sich der Leser bewusst ist, dass in Variante B nicht rein rezyklierte Gesteinskörnungen für die Herstellung der Betondecke verwendet werden, sondern zu einem gewissen Anteil auch natürliche Gesteinskörnungen erforderlich sind.

3.6 Transportdistanzen und weitere Grafiken

In diesem letzten Kapitel sind schließlich noch einige weitere Grafiken angeführt, die für die Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks in Kapitel 4 von Bedeutung sind.

Die erste Abbildung 3.6 enthält die gewählten Transportdistanzen für die Materialtransporte der Lebenswegabschnitte 2, 4, 6 und 9 (siehe Kapitel 3.3). Dabei ist zu erwähnen, dass die Transportdistanzen von Bauprojekt zu Bauprojekt unterschiedlich sind und es sich daher bei den gewählten Distanzen lediglich um Beispiele handelt.

Die beiden weiteren Grafiken 3.7 und 3.8 wurden mit der Software STAN 2 [21] erstellt und enthalten die betrachteten Prozesse bzw. Lebenswegabschnitte einer Betondecke sowie deren

Verknüpfungen. Zudem enthalten die Flüsse, welche die einzelnen Prozesse miteinander verbinden, Informationen zu den Massen der jeweiligen Materialien und Baustoffe, angegeben in kg / m³ Beton. Diese Massen werden zwar erst in Kapitel 4 erhoben, sind jedoch der Vollständigkeit halber bereits hier angeführt und zeigen die Unterschiede zwischen den beiden Varianten A (Abbildung 3.7) und B (Abbildung 3.8) auf. Weiters ist zu erwähnen, dass die beiden Abbildungen aus Gründen der Übersichtlichkeit nur die wichtigsten Prozesse und Flüsse enthalten und daher nicht ganz vollständig sind.

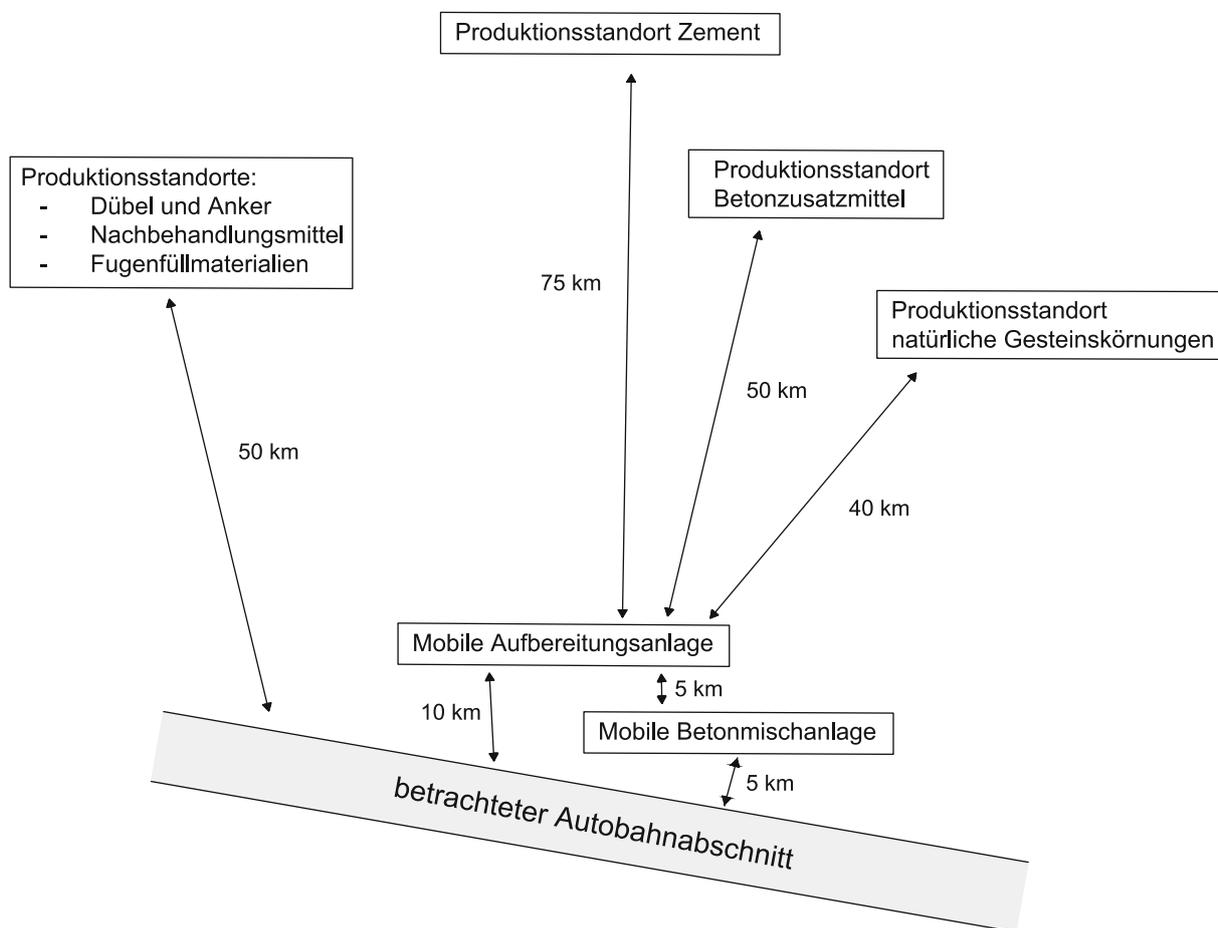


Abbildung 3.6: Gewählte Transportdistanzen für die Materialtransporte

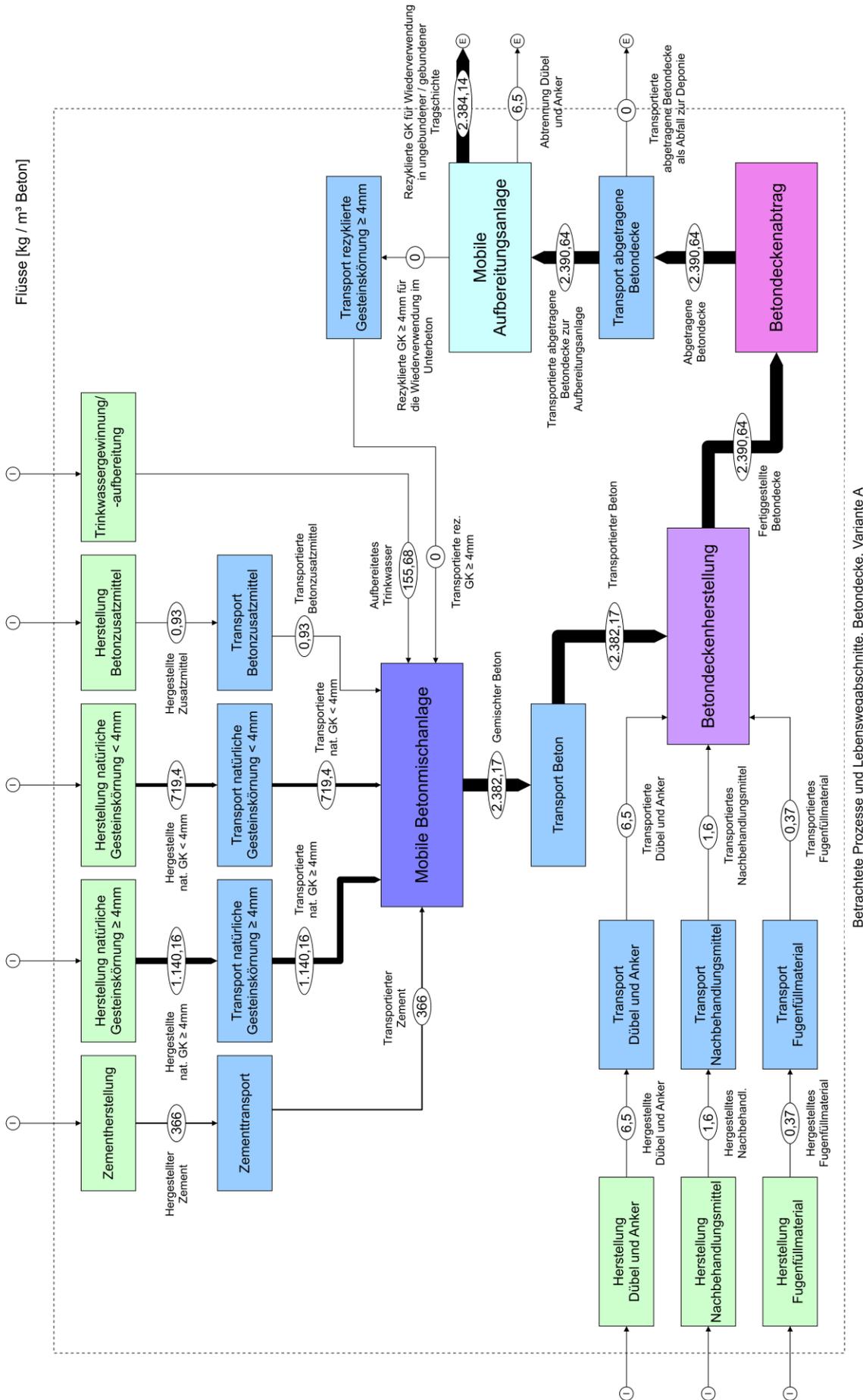


Abbildung 3.7: Prozesse und Lebenswegabschnitte (Variante A)

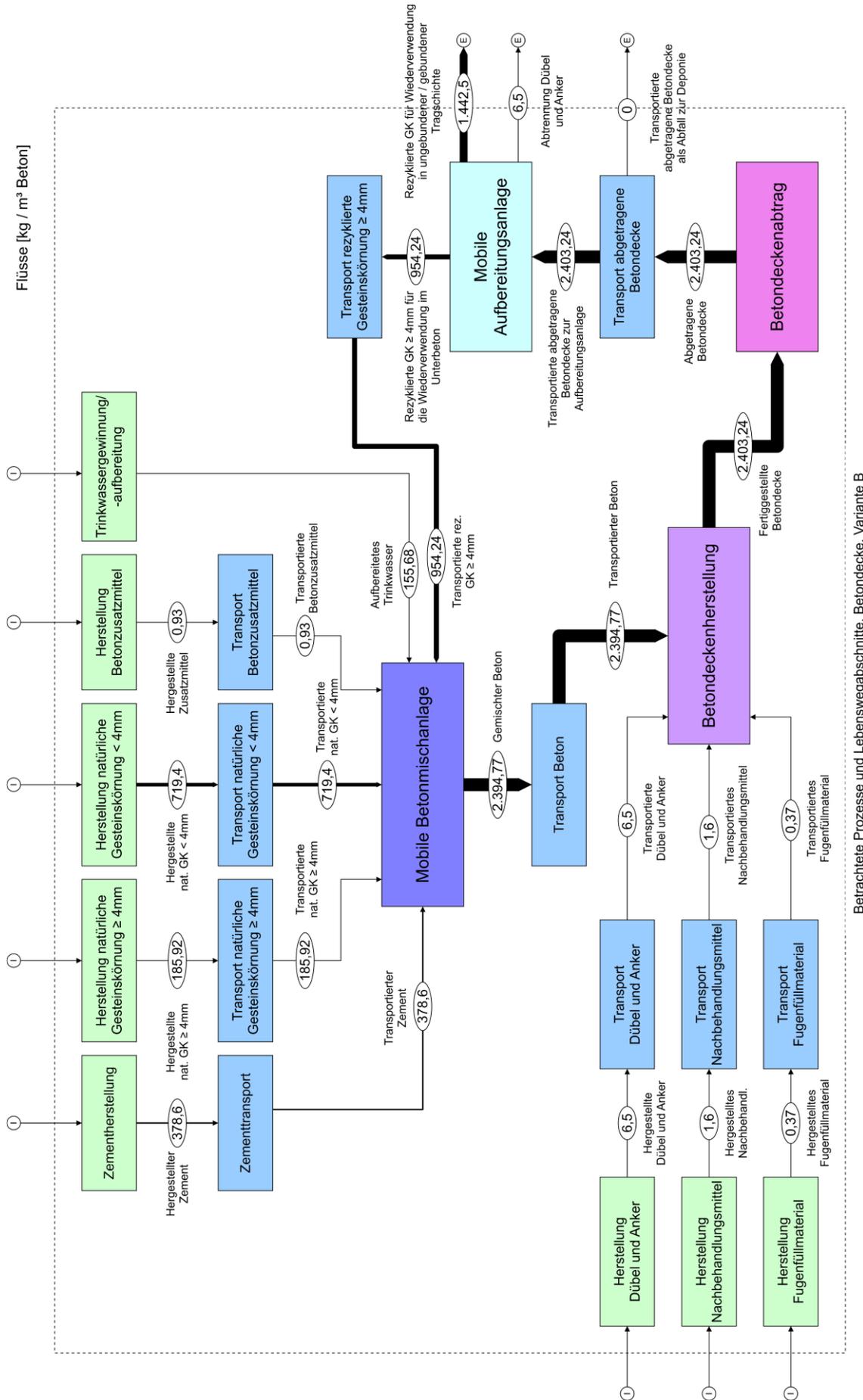


Abbildung 3.8: Prozesse und Lebenswegabschnitte (Variante B)

4 Datenerhebung, Berechnung der THG-Emissionen und Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks

Nachdem in Kapitel 3 auf den Untersuchungsrahmen und die Vorgehensweise zur Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks einer Betondecke eingegangen wurde, wird dieser nun im vorliegenden Kapitel für die beiden Varianten A und B ermittelt.

Dazu werden die erforderlichen Daten für die einzelnen, betrachteten Lebenswegabschnitte erhoben und daraus in weiterer Folge die Treibhausgasemissionen pro m³ Beton berechnet (Kapitel 4.2 bis 4.10). Aus der Summe der Treibhausgasemissionen aller betrachteten Lebenswegabschnitte ergibt sich schließlich der CO₂-Fußabdruck der Betondecke. Dieser wird sowohl für Variante A als auch für Variante B ermittelt und ist in Kapitel 4.11 angeführt.

Eine Gegenüberstellung und Analyse der Ergebnisse folgt im Anschluss daran in Kapitel 5.

4.1 Allgemeines zur Datenerhebung

Da eine umfassende Datenerhebung Voraussetzung für die Quantifizierung des CO₂-Fußabdrucks ist, wurde besonders viel Zeit in die Erhebung der Daten investiert.

Für die verschiedenen Lebenswegabschnitte sind dabei unterschiedliche Daten von Interesse. Allen Lebenswegabschnitten ist jedoch gemein, dass Daten mit Informationen zu den entstehenden Treibhausgasemissionen erforderlich sind. Diese Treibhausgasemissionen beziehen sich in den meisten Fällen jedoch noch nicht auf die deklarierte Einheit von einem Kubikmeter Beton, sondern auf eine andere Einheit (z.B. auf eine Tonne Zement oder auf einen Liter Diesel). Durch die Erhebung weiterer Daten können diese THG-Emissionen schließlich umgerechnet und auf einen Kubikmeter Beton bezogen werden. All diese Daten, die für die Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks erforderlich sind, sind in den nachfolgenden Kapiteln 4.2 bis 4.10 angeführt.

Bei der Datenerhebung wurde zudem darauf geachtet, dass die Daten einerseits repräsentativ für Österreich bzw. Europa sind und andererseits aus möglichst vielen verschiedenen und vertrauenswürdigen Quellen stammen. Bei den herangezogenen Quellen bzw. Datenbanken handelt es sich in erster Linie um Folgende:

- Ecoinvent [22],
- ÖKOBAUDAT [23],
- ProBas (Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme) [24],
- IBU (Institut Bauen und Umwelt e.V.) [25],
- Umweltbundesamt Österreich [26] und Deutschland [27],
- sowie zur Verfügung gestellte Daten aus der Praxis [28].

Sind mehrere Daten aus verschiedenen Quellen für ein und denselben Prozess bzw. Lebenswegabschnitt verfügbar, so wird in den folgenden Kapiteln der Mittelwert aus diesen Daten gebildet und für die Berechnung der THG-Emissionen pro m³ Beton herangezogen.

4.2 Herstellung der Betonausgangsstoffe

In diesem Kapitel werden die THG-Emissionen ermittelt, die bei der Herstellung der Betonausgangsstoffe entstehen. Dazu werden in einem ersten Schritt die dafür erforderlichen Daten erhoben und aus diesen in einem zweiten Schritt die THG-Emissionen pro m³ Beton berechnet.

Bei den Betonausgangsstoffen handelt es sich – wie in Kapitel 2 beschrieben – um natürliche bzw. rezyklierte Gesteinskörnungen, Zement, Wasser und Betonzusatzmittel. Die genaue Zusammensetzung erfolgt dabei nach Betonrezepten, welche ebenfalls erhoben wurden und nachfolgend angeführt sind.

4.2.1 Datenerhebung

Um die THG-Emissionen der Betonausgangsstoffe pro m³ Beton berechnen zu können, sind folgende Daten erforderlich:

- die THG-Emissionen, die bei der Herstellung der Betonausgangsstoffe entstehen (angegeben in kg CO₂-Äquivalente / Tonne hergestelltem Betonausgangsstoff) und
- die Betonrezepte für den Ober- und Unterbeton

Erstere konnten zum Großteil aus Umwelt-Produktdeklarationen (EPDs) gewonnen werden, teilweise aber auch aus Datenbanken wie ecoinvent, ÖKOBAUDAT und ProBas. Allen ist gemein, dass die gesamte Herstellungsphase von der Wiege bis zum Werktor in den Daten berücksichtigt wurde. Also nicht nur die Herstellung bzw. Produktion der Ausgangsstoffe selbst, sondern auch die Rohstoffbereitstellung und der Transport der Rohstoffe zur Produktionsanlage.

Um diese THG-Emissionen schließlich auf die deklarierte Einheit von einem Kubikmeter Beton zu beziehen, sind Betonrezepte erforderlich. Diese geben die Massen der einzelnen Betonausgangsstoffe pro m³ Beton an.

All diese erhobenen Daten, die für die Berechnung der THG-Emissionen des ersten Lebenswegabschnittes erforderlich sind, werden nun in weiterer Folge angeführt und näher beschrieben.

Natürliche Gesteinskörnungen

In diesem Abschnitt wird auf die Erhebung der Treibhausgasemissionen eingegangen, die bei der Herstellung von natürlichen Gesteinskörnungen entstehen. Dabei wird in die Herstellung von groben Gesteinskörnungen (Kies) und in die Herstellung von feinen Gesteinskörnungen (Sand) unterschieden. Auf eine Unterscheidung der Gesteinskörnungen nach deren Gewinnung (aus Steinbrüchen oder Kiesgruben) wird in der vorliegenden Arbeit hingegen verzichtet.

Die erhobenen THG-Emissionen sind am Ende des Kapitels in Tabelle 4.15 für Kies und in Tabelle 4.16 für Sand angeführt. Daraus ist ersichtlich, dass sich die groben und die feinen Gesteinskörnungen hinsichtlich der entstehenden THG-Emissionen kaum voneinander unterscheiden. In manchen Fällen wurden von ein und derselben Quelle sogar die gleichen Werte für Kies und Sand angegeben, in anderen Fällen unterscheiden sich die Werte minimal voneinander.

Für die anschließende Berechnung der Treibhausgasemissionen pro m³ Beton in Kapitel 4.2.2 wurden aus den erhobenen Daten die jeweiligen Mittelwerte gebildet. Diese sind zusammen mit den erhobenen minimalen und maximalen Werten im Folgenden angeführt:

- Kies:

Minimum:	1,60 kg CO ₂ Äq. / t Kies
Mittelwert:	2,53 kg CO ₂ Äq. / t Kies
Maximum:	3,51 kg CO ₂ Äq. / t Kies

- Sand:

Minimum:	1,61 kg CO ₂ Äq. / t Sand
Mittelwert:	2,35 kg CO ₂ Äq. / t Sand
Maximum:	3,13 kg CO ₂ Äq. / t Sand

Rezyklierte Gesteinskörnungen

Da die natürlichen Gesteinskörnungen im Unterbeton teilweise durch rezyklierte Gesteinskörnungen ersetzt werden können (Variante B), werden in diesem Abschnitt die bei der Herstellung von rezyklierten Gesteinskörnungen entstehenden THG-Emissionen erhoben.

Die Erhebung stellte sich dabei als schwieriger heraus als jene für natürliche Gesteinskörnungen, da kaum Daten in Datenbanken oder EPDs gefunden werden konnten. Deshalb wurde auf verschiedene Berichte und Ökobilanzen zurückgegriffen, die in Tabelle 4.17 zusammen mit den erhobenen Daten angeführt sind. Aus diesen wurde wiederum der Mittelwert gebildet, der sich zusammen mit den erhobenen Minimal- und Maximalwerten wie folgt ergibt:

- Rezyklierte GK:

Minimum:	1,49 kg CO ₂ Äq. / t rez. GK
Mittelwert:	2,79 kg CO ₂ Äq. / t rez. GK
Maximum:	3,71 kg CO ₂ Äq. / t rez. GK

Ein Vergleich dieser Daten mit jenen von natürlichen Gesteinskörnungen lässt erkennen, dass sich die Werte nur unwesentlich voneinander unterscheiden – trotz der unterschiedlichen Datengrundlagen und obwohl es sich in einem Fall um die Herstellung von rezyklierten Gesteinskörnungen handelt und im anderen Fall um die Herstellung von natürlichen Gesteinskörnungen.

Zusatz:

Für rezyklierte Gesteinskörnungen wurden zusätzlich zu den erhobenen Daten aus der Literatur noch Erfahrungswerte aus der Praxis zur Verfügung gestellt [28]. Diese gelten für eine mobile Aufbereitungsanlage, für welche sowohl die Kraftstoffverbräuche als auch die Menge an gebrochenem Beton pro Zeiteinheit abgeschätzt wurden. Die Kraftstoffverbräuche wurden dabei mit insgesamt 100 Litern Diesel pro Stunde angegeben, wobei der Lader zum Beschicken der Anlage ca. 20 l/h benötigt und die Brech-, Wasch- und Siebanlage in Summe etwa 80 l/h. Die Menge an gebrochenem Beton beträgt rund 100 Tonnen pro Stunde. Zusammen mit den THG-Emissionen von Diesel (siehe Kapitel 4.4.1) lassen sich aus diesen Daten in weiterer Folge die THG-Emissionen pro m³ Beton berechnen, die bei der Herstellung von rezyklierten Gesteinskörnungen entstehen.

Für rezyklierte Gesteinskörnungen stehen somit sowohl Daten aus der Literatur als auch Daten aus der Praxis zur Verfügung. Aus beiden werden in Kapitel 4.2.2 die THG-Emissionen pro m³ Beton berechnet, wodurch ein Vergleich der beiden Datensätze möglich wird. Im Optimalfall sollten sich die Ergebnisse nur unwesentlich voneinander unterscheiden.

Zement

In diesem Abschnitt werden nun die Treibhausgasemissionen erhoben, die bei der Zementherstellung entstehen. Da es sich bei dem im Betonstraßenbau eingesetzten Zement um einen speziellen Portlandhüttenzement – den Deckenzement (DZ) mit der Bezeichnung CEM II/A-S bzw.

CEM II/B-S (siehe Kapitel 2.3.1) – handelt, wurden bei der Datenerhebung nur THG-Emissionen von CEM II-Zementen bzw. Durchschnittszementen erhoben. THG-Emissionen von reinen Portlandzementen (CEM I) oder Hochofenzementen (CEM III) wurden demnach nicht herangezogen, da diese Zemente andere Anteile an Zementklinker aufweisen als CEM II-Zemente. Vernachlässigt wurde bei der Erhebung hingegen, ob es sich bei den eingesetzten Zuschlagstoffen tatsächlich um Hüttensand (S) handelt oder um andere Zuschlagstoffe, wie beispielsweise Flugasche (V) oder Kalkstein (L).

Die erhobenen THG-Emissionen sind in Tabelle 4.18 angeführt. Bei deren Betrachtung sind besonders zwei Dinge auffällig. Erstens sind die THG-Emissionen, die bei der Herstellung von einer Tonne Zement entstehen, um mehr als zwei Zehnerpotenzen größer als jene, die bei der Herstellung von einer Tonne Gesteinskörnung entstehen. Zweitens gibt es große Unterschiede in den erhobenen THG-Emissionen von Zement. Diese gehen von 493 kg CO₂-Äq. / t Zement für den Durchschnittszement in Österreich bis hin zu 875 kg CO₂-Äq. / t Zement für den Zement CEM II/A in Deutschland.

Um mit diesen sehr unterschiedlichen THG-Emissionen bei der Zementherstellung besser umgehen zu können, wurde entschieden, für die anschließende Berechnung in Kapitel 4.2.2 nicht den Mittelwert aller erhobenen europäischen Zementdaten heranzuziehen, sondern in die Mittelwertbildung lediglich die Daten aus der DACH-Region einfließen zu lassen (Deutschland, Österreich, Schweiz). Diese sind in Tabelle 4.18 fett dargestellt. Zudem wurden die Mittelwerte für Deutschland, Österreich und die Schweiz zuerst getrennt berechnet und anschließend aus diesen drei Werten ein gemeinsamer Mittelwert für die DACH-Region gebildet. Dieser geht zusammen mit dem erhobenen Minimal- bzw. Maximalwert in die Berechnung der THG-Emissionen pro m³ Beton in Kapitel 4.2.2 ein:

- Zement: Minimum: 493,0 kg CO₂-Äq. / t Zement
 Mittelwert: **606,0** kg CO₂-Äq. / t Zement
 Maximum: 875,5 kg CO₂-Äq. / t Zement

Zugabewasser

In diesem Abschnitt werden die Treibhausgasemissionen von Zugabewasser erhoben. Da für den Deckenbeton nur Trinkwasser verwendet werden darf (siehe Kapitel 2.3.1), handelt es sich bei den erhobenen Daten um die THG-Emissionen von Trinkwasser. Diese sind in Tabelle 4.19 angeführt.

In die Berechnung der THG-Emissionen pro m³ Beton in Kapitel 4.2.2 geht wiederum der Mittelwert der erhobenen Daten ein. Dieser ergibt sich zusammen mit dem erhobenen Minimal- und Maximalwert zu:

- Wasser: Minimum: 0,04 kg CO₂-Äq. / t Wasser
 Mittelwert: **0,15** kg CO₂-Äq. / t Wasser
 Maximum: 0,27 kg CO₂-Äq. / t Wasser

Betonzusatzmittel

In diesem Abschnitt werden schließlich noch die THG-Emissionen der Betonzusatzmittel erhoben. Bei den verwendeten Betonzusatzmitteln handelt es sich um einen Luftporenbildner und ein Fließmittel, für welche jeweils nur ein Wert erhoben werden konnte (siehe Tabelle 4.20). Dies

wird für die vorliegende Arbeit jedoch als ausreichend erachtet, da die Betonzusatzmittel dem Beton nur in sehr geringen Mengen zugegeben werden. Die erhobenen THG-Emissionen betragen:

- Luftporenbildner: **439** kg CO₂-Äq. / t Luftporenbildner
- Fließmittel: **1530** kg CO₂-Äq. / t Fließmittel

Zusammenfassung der erhobenen THG-Emissionen der Betonausgangsstoffe

Zusammenfassend sind die erhobenen minimalen, mittleren und maximalen THG-Emissionen, die bei der Herstellung der einzelnen Betonausgangsstoffe entstehen, in Tabelle 4.1 angeführt.

Tabelle 4.1: Erhobene THG-Emissionen der Betonausgangsstoffe pro Tonne Ausgangsstoff

Betonausgangsstoffe	Treibhausgasemissionen [kg CO ₂ -Äq. / t Ausgangsstoff]		
	Minimum	Mittelwert	Maximum
Natürliche Gesteinskörnung Kies	1,60	2,53	3,51
Natürliche Gesteinskörnung Sand	1,61	2,35	3,13
Rezyklierte Gesteinskörnung	1,49	2,79	3,71
Zement	493,0	606,0	875,5
Wasser	0,04	0,15	0,27
Luftporenbildner	439	439	439
Fließmittel	1530	1530	1530

Zusätzlich sind die Mittelwerte der erhobenen THG-Emissionen in Abbildung 4.1 grafisch dargestellt. Auf der horizontalen Achse sind dabei die Betonausgangsstoffe angeführt und auf der vertikalen Achse die mittleren THG-Emissionen im logarithmischen Maßstab.

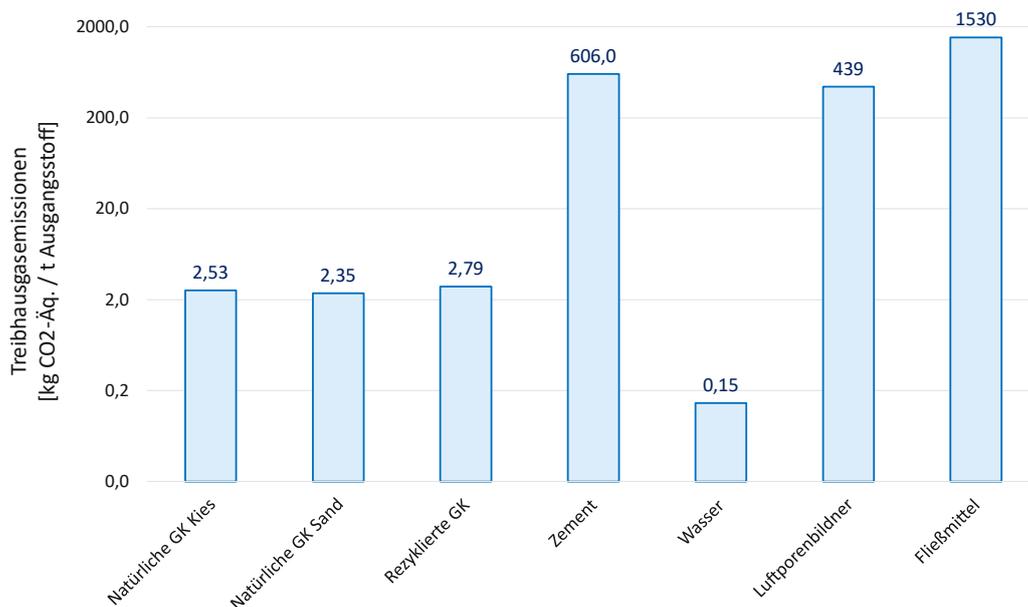


Abbildung 4.1: Mittelwerte der erhobenen THG-Emissionen der Betonausgangsstoffe pro Tonne Ausgangsstoff

Die Darstellung im logarithmischen Maßstab ist deshalb erforderlich, weil die THG-Emissionen, die bei der Herstellung von Zement, Luftporenbildner und Fließmittel entstehen, um Zehnerpotenzen größer sind als jene THG-Emissionen, die bei der Herstellung von Gesteinskörnungen und der Aufbereitung von Trinkwasser entstehen.

Betonrezepte

In diesem Abschnitt werden schließlich noch die erhobenen Betonrezepte angeführt, mit denen die THG-Emissionen, die bei der Herstellung der Betonausgangsstoffe entstehen, auf einen Kubikmeter Beton umgerechnet werden können. Für die beiden Varianten A und B sind hierfür insgesamt drei Betonrezepte erforderlich:

- ein Rezept für den Oberbeton (mit natürlicher Gesteinskörnung),
- ein Rezept für den Unterbeton mit natürlicher Gesteinskörnung und
- ein Rezept für den Unterbeton mit rezyklierter Gesteinskörnung.

Wie in Kapitel 3.5 beschrieben, dürfen im Oberbeton keine rezyklierten Gesteinskörnungen verwendet werden. Daher gibt es für die Varianten A und B lediglich Unterschiede in den Betonrezepten für den Unterbeton. In diesem dürfen rezyklierte Gesteinskörnungen ab einer Korngröße von 4 Millimetern eingesetzt werden.

Die erhobenen Rezepte sind in Tabelle 4.2 angeführt. Bei den ersten beiden Rezepten handelt es sich um gängige Mischgutrezepte aus der Praxis, die zur Verfügung gestellt wurden [28]. Das Erste ist ein Rezept für einen Oberbeton mit natürlichen Gesteinskörnungen und Waschbetonoberfläche (GK 8), das Zweite ein Rezept für einen Unterbeton mit natürlichen Gesteinskörnungen. Das dritte Rezept – ein Rezept für einen Unterbeton mit rezyklierten Gesteinskörnungen – wurde aus dem zweiten Rezept abgeleitet und so adaptiert, dass die in [12] vorgeschriebene Zementmenge bei Verwendung von Beton-Recyclingmaterial eingehalten wird. Es handelt sich dabei um zusätzliche 15 kg Zement / m³ Beton. Zudem wurden die natürlichen Gesteinskörnungen ≥ 4 mm durch rezyklierte Gesteinskörnungen ersetzt. Die Massen aller weiteren Betonausgangsstoffe wurden nicht verändert, sodass anschließend ein guter Vergleich der beiden Varianten möglich ist.

Tabelle 4.2: Betonrezepte für den Oberbeton (mit natürlicher GK), den Unterbeton mit natürlicher GK und den Unterbeton mit rezyklierter GK

Betonausgangsstoffe	Rezeptur [kg/m ³]		
	Oberbeton (Variante A+B)	Unterbeton (Variante A)	Unterbeton (Variante B)
Natürliche Gesteinskörnung ≥ 4 mm	1162	1136	-
Rezyklierte Gesteinskörnung ≥ 4 mm	-	-	1136
Natürliche Gesteinskörnung < 4 mm	522	757	757
Zement	450	350	365
Wasser	175	152	152
Luftporenbildner	0,68	0,63	0,63
Fließmittel	1,80	-	-

4.2.2 Berechnung der Treibhausgasemissionen pro m³ Beton

Nachdem nun alle erforderlichen Daten erhoben wurden, werden in diesem Kapitel die THG-Emissionen pro m³ Beton berechnet, die bei der Herstellung der Betonausgangsstoffe entstehen.

Die Berechnung erfolgt dabei getrennt für Variante A und für Variante B. Zudem werden – im Gegensatz zu den späteren Kapiteln – neben den durchschnittlichen THG-Emissionen auch die minimalen und die maximalen THG-Emissionen pro m³ Beton berechnet. Der Grund dafür sind die sehr hohen und gleichzeitig sehr unterschiedlichen THG-Emissionen, die für den Zement erhoben wurden; und da der Zement dem Beton in relativ großen Mengen zugegeben wird, ergeben sich in Abhängigkeit von den herangezogenen Werten wesentliche Unterschiede in den Ergebnissen der berechneten THG-Emissionen pro m³ Beton. Eine zusätzliche Betrachtung der Minimal- und Maximalwerte ist daher sinnvoll und wird der Vollständigkeit halber nicht nur für den Zement, sondern auch für die anderen Betonausgangsstoffe vorgesehen.

Variante A – Verwendung von rein natürlichen Gesteinskörnungen

In diesem Abschnitt werden die Treibhausgasemissionen der Betonausgangsstoffe pro m³ Beton bei Verwendung von rein natürlichen Gesteinskörnungen berechnet. Dazu werden die erhobenen Treibhausgasemissionen pro Tonne Betonausgangsstoff in Tabelle 4.1 mit den entsprechenden Werten aus den ersten beiden Betonrezepten in Tabelle 4.2 multipliziert.

Dabei ist anzumerken, dass es zu einer kleinen Unstimmigkeit zwischen den erhobenen Treibhausgasemissionen in Tabelle 4.1 und den Betonrezepten in Tabelle 4.2 kommt. Die Treibhausgasemissionen wurden nämlich getrennt für die Gesteinskörnungen Sand und Kies erhoben, während in den Betonrezepten (und im Betonstraßenbau allgemein) zwischen Gesteinskörnungen ≥ 4 mm und < 4 mm unterschieden wird. Da sich die erhobenen Treibhausgasemissionen von Sand und Kies jedoch kaum voneinander unterscheiden, wurden die THG-Emissionen von Kies der Einfachheit halber mit den Massen der Gesteinskörnungen ≥ 4 mm multipliziert und die THG-Emissionen von Sand mit den Massen der Gesteinskörnungen < 4 mm. Daraus ergeben sich schließlich die minimalen, durchschnittlichen und maximalen THG-Emissionen der Betonausgangsstoffe pro m³ Oberbeton in Tabelle 4.3 bzw. pro m³ Unterbeton in Tabelle 4.4.

Tabelle 4.3: THG-Emissionen der Betonausgangsstoffe pro m³ Oberbeton – Variante A und Variante B

Betonausgangsstoffe	Treibhausgasemissionen [kg CO ₂ -Äq. / m ³ Oberbeton]		
	Minimum	Mittelwert	Maximum
Nat. Gesteinskörnung ≥ 4 mm	1,86	2,94	4,08
Nat. Gesteinskörnung < 4 mm	0,84	1,23	1,63
Zement	221,9	272,7	394,0
Wasser	0,01	0,03	0,05
Luftporenbildner	0,30	0,30	0,30
Fließmittel	2,75	2,75	2,75
Summe (1 m ³ Oberbeton)	227,61	279,95	402,79

Tabelle 4.4: THG-Emissionen der Betonausgangsstoffe pro m³ Unterbeton – Variante A

Betonausgangsstoffe	Treibhausgasemissionen [kg CO ₂ -Äq. / m ³ Unterbeton]		
	Minimum	Mittelwert	Maximum
Nat. Gesteinskörnung ≥ 4mm	1,82	2,88	3,99
Nat. Gesteinskörnung < 4mm	1,22	1,78	2,37
Zement	172,6	212,1	306,4
Wasser	0,01	0,02	0,04
Luftporenbildner	0,28	0,28	0,28
Fließmittel	-	-	-
Summe (1 m³ Unterbeton)	175,87	217,06	313,10

Aus den beiden Tabellen ist ersichtlich, dass die Treibhausgasemissionen pro m³ Oberbeton größer sind als die Treibhausgasemissionen pro m³ Unterbeton. Dieser Unterschied ergibt sich in erster Linie daraus, dass die eingesetzten Zementmengen im Oberbeton wesentlich größer sind als jene im Unterbeton.

Da ein Kubikmeter Beton im Straßenkörper nun aus 0,16 m³ Oberbeton und 0,84 m³ Unterbeton besteht (siehe Kapitel 3.4), werden die Werte in Tabelle 4.3 noch mit dem Faktor 0,16 multipliziert und jene in Tabelle 4.4 mit dem Faktor 0,84. Die Ergebnisse werden anschließend addiert. Daraus ergeben sich schließlich die THG-Emissionen der Betonausgangsstoffe pro m³ Beton, die in Tabelle 4.5 angeführt sind. Diese liegen in Summe für alle Betonausgangsstoffe zwischen rund 184 und 327 kg CO₂-Äq. / m³ Beton und betragen im Mittel ca. 227 kg CO₂-Äq. / m³ Beton.

Tabelle 4.5: THG-Emissionen der Betonausgangsstoffe pro m³ Beton – Variante A

Betonausgangsstoffe	Treibhausgasemissionen [kg CO ₂ -Äq. / m ³ Beton]		
	Minimum	Mittelwert	Maximum
Nat. Gesteinskörnung ≥ 4mm	1,82	2,89	4,00
Nat. Gesteinskörnung < 4mm	1,16	1,69	2,25
Zement	180,44	221,80	320,43
Wasser	0,01	0,02	0,04
Luftporenbildner	0,28	0,28	0,28
Fließmittel	0,44	0,44	0,44
Summe (1 m³ Beton)	184,15	227,12	327,45

Variante B – Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen

In diesem Abschnitt werden nun die THG-Emissionen der Betonausgangsstoffe pro m³ Beton bei Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen berechnet. Die Vorgehensweise ist dabei die gleiche wie jene für Variante A. Ebenso gelten die in Tabelle 4.3 angeführten THG-Emissionen der Betonausgangsstoffe pro m³ Oberbeton gleichermaßen für Variante B, da im Oberbeton keine rezyklierten Gesteinskörnungen verwendet werden dürfen. Die THG-Emissionen der Betonausgangsstoffe pro m³ Unterbeton werden hingegen durch Multiplikation der erhobenen THG-

Emissionen pro Tonne Betonausgangsstoff (Tabelle 4.1) mit den entsprechenden Werten aus dem dritten Betonrezept (Tabelle 4.2) neu berechnet. Daraus ergeben sich schließlich die minimalen, durchschnittlichen und maximalen Treibhausgasemissionen der Betonausgangsstoffe pro m³ Unterbeton, die in Tabelle 4.6 angeführt sind.

Tabelle 4.6: THG-Emissionen der Betonausgangsstoffe pro m³ Unterbeton – Variante B

Betonausgangsstoffe	Treibhausgasemissionen [kg CO ₂ -Äq. / m ³ Unterbeton]		
	Minimum	Mittelwert	Maximum
Rez. Gesteinskörnung ≥ 4mm	1,69	3,17	4,21
Nat. Gesteinskörnung < 4mm	1,22	1,78	2,37
Zement	179,9	221,2	319,6
Wasser	0,01	0,02	0,04
Luftporenbildner	0,28	0,28	0,28
Fließmittel	-	-	-
Summe (1 m ³ Unterbeton)	183,14	226,44	326,46

Analog zu Variante A werden die berechneten THG-Emissionen der Betonausgangsstoffe pro m³ Oberbeton (Tabelle 4.3) wiederum mit dem Faktor 0,16 multipliziert und jene der Betonausgangsstoffe pro m³ Unterbeton (Tabelle 4.6) mit dem Faktor 0,84. Durch anschließende Addition dieser Werte ergeben sich schließlich die THG-Emissionen der Betonausgangsstoffe pro m³ Beton wie er im Straßenkörper vorkommt. Diese sind in Tabelle 4.7 angeführt und betragen im Mittel 235 kg CO₂-Äq. / m³ Beton.

Tabelle 4.7: THG-Emissionen der Betonausgangsstoffe pro m³ Beton – Variante B

Betonausgangsstoffe	Treibhausgasemissionen [kg CO ₂ -Äq. / m ³ Beton]		
	Minimum	Mittelwert	Maximum
Nat. + Rez. Gesteinskörnung ≥ 4mm	1,72	3,13	4,19
Nat. Gesteinskörnung < 4mm	1,16	1,69	2,25
Zement	186,65	229,44	331,46
Wasser	0,01	0,02	0,04
Luftporenbildner	0,28	0,28	0,28
Fließmittel	0,44	0,44	0,44
Summe (1 m ³ Beton)	190,25	235,00	338,67

Treibhausgasemissionen – Herstellung der Betonausgangsstoffe:

Variante A – Verwendung von rein natürlichen Gesteinskörnungen:

Minimum:	184,15	kg CO ₂ -Äq. / m ³ Beton
Mittelwert:	227,12	kg CO ₂ -Äq. / m ³ Beton
Maximum:	327,45	kg CO ₂ -Äq. / m ³ Beton

Variante B – Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen:

Minimum:	190,25	kg CO ₂ -Äq. / m ³ Beton
Mittelwert:	235,00	kg CO ₂ -Äq. / m ³ Beton
Maximum:	338,67	kg CO ₂ -Äq. / m ³ Beton

Zusatz:

Für rezyklierte Gesteinskörnungen wurden in Kapitel 4.2.1 neben den Werten aus der Literatur (welche für die Berechnung der THG-Emissionen pro m³ Unterbeton in Tabelle 4.6 herangezogen wurden) auch Daten aus der Praxis erhoben. In diesem Zusatz werden nun aus Gründen der Vollständigkeit auch die Treibhausgasemissionen pro m³ Unterbeton bei Verwendung der Daten aus der Praxis berechnet und anschließend mit jenen in Tabelle 4.6 verglichen.

Für die Berechnung werden die erhobenen THG-Emissionen pro Liter Diesel mit dem Dieselverbrauch der mobilen Aufbereitungsanlage multipliziert und schließlich durch die Menge an gebrochenem Beton pro Stunde dividiert. Daraus ergeben sich die Treibhausgasemissionen der rezyklierten Gesteinskörnungen pro Tonne Ausgangsstoff zu:

- Rezyklierte Gesteinskörnung: $3,14 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{1} \cdot (20 + 80) \frac{1}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{100 \text{ t}} = \mathbf{3,14} \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{t rez. GK}}$

Um diese schließlich auf einen Kubikmeter Unterbeton zu beziehen, werden die THG-Emissionen noch mit dem Wert für rezyklierte Gesteinskörnungen ≥ 4 mm aus dem Betonrezept für den Unterbeton (Variante B) in Tabelle 4.2 multipliziert. Daraus ergeben sich die Treibhausgasemissionen der rezyklierten Gesteinskörnungen pro m³ Unterbeton zu:

- Rezyklierte Gesteinskörnung: $3,14 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{t rez.GK}} \cdot 1136 \frac{\text{kg rez.GK}}{\text{m}^3 \text{ UB}} = \mathbf{3,56} \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{m}^3 \text{ UB}}$

Mit 3,56 kg CO₂-Äq. / m³ Unterbeton liegen die THG-Emissionen der rezyklierten Gesteinskörnungen, die sich aus den Praxisdaten ergeben, zwischen den mittleren (3,17 kg CO₂-Äq. / m³ Unterbeton) und den maximalen (4,21 kg CO₂-Äq. / m³ Unterbeton) THG-Emissionen, die aus den Literaturdaten berechnet wurden und die in Tabelle 4.6 angegebenen sind.

Fazit dieses Zusatzes ist daher, dass die aus der Praxis zur Verfügung gestellten Daten mit jenen aus der Literatur sehr gut übereinstimmen. Es spricht also nichts dagegen, dass in einigen anschließenden Kapiteln für die Berechnung der THG-Emissionen aufgrund mangelnder Literaturdaten lediglich die Daten aus der Praxis herangezogen werden.

4.3 Transport der Betonausgangsstoffe zur Mischanlage

In diesem Kapitel werden die Treibhausgasemissionen ermittelt, die beim Transport der Betonausgangsstoffe von deren Produktionsstätten zur Betonmischanlage entstehen. Dabei wird angenommen, dass alle Transporte mittels LKW abgewickelt werden. Diese Annahme gilt in weiterer Folge auch für die anschließenden Kapitel, in denen die THG-Emissionen von Transporten ermittelt werden.

4.3.1 Datenerhebung

Für die Berechnung der Treibhausgasemissionen pro m³ Beton, die beim Transport der Betonausgangsstoffe zur mobilen Mischanlage entstehen, sind folgende Daten erforderlich:

- die beim LKW-Transport entstehenden THG-Emissionen pro Tonnenkilometer,
- die jeweiligen Transportdistanzen von den Produktionsstätten der Betonausgangsstoffe zur Betonmischanlage und
- die Masse der transportierten Baustoffe pro m³ Beton

Daten zu den THG-Emissionen pro Tonnenkilometer werden sowohl vom österreichischen als auch vom deutschen Umweltbundesamt zur Verfügung gestellt und wurden zudem aus der Datenbank ecoinvent erhoben. All diese Daten sind in Tabelle 4.21 angeführt. Deren Mittelwert, der in die anschließende Berechnung der THG-Emissionen pro m³ Beton eingeht, ergibt sich zu:

LKW-Transport: **0,13** kg CO₂Äq. / tkm

Weiters sind die Transportdistanzen der einzelnen Betonausgangsstoffe zur Mischanlage erforderlich. Diese wurden bereits in Kapitel 3.6 festgelegt und sind in Tabelle 4.8 nochmals zusammengefasst angeführt. Hierbei ist zu betonen, dass es sich bei den gewählten Distanzen lediglich um Beispiele handelt und diese von Bauprojekt zu Bauprojekt variieren können.

Tabelle 4.8: Transportdistanzen der Betonausgangsstoffe zur Mischanlage

Betonausgangsstoffe	Produktionsstandort → mobile Betonmischanlage [km]
Natürliche Gesteinskörnung ≥ 4 mm	40
Rezyklierte Gesteinskörnung ≥ 4 mm	5
Natürliche Gesteinskörnung < 4 mm	40
Zement	75
Wasser	0
Luftporenbildner	50
Fließmittel	50

Aus diesen Daten lassen sich bereits die THG-Emissionen pro Tonne Betonausgangsstoff berechnen. Um die THG-Emissionen schließlich auf einen Kubikmeter Beton beziehen zu können,

sind noch die jeweiligen Massen der Betonausgangsstoffe pro m³ Beton erforderlich. Diese werden aus den bereits erhobenen Betonrezepten in Kapitel 4.2.1, Tabelle 4.2, entnommen.

4.3.2 Berechnung der Treibhausgasemissionen pro m³ Beton

Aus den erhobenen Daten können schließlich die THG-Emissionen der LKW-Transporte pro m³ Beton berechnet werden. Die Berechnung erfolgt dabei getrennt für Variante A und für Variante B, da sich diese hinsichtlich der Transportdistanzen der Gesteinskörnungen ≥ 4 mm und hinsichtlich der Betonrezepte für den Unterbeton voneinander unterscheiden.

Für die Berechnung werden nun die erhobenen THG-Emissionen pro Tonnenkilometer mit den jeweiligen Transportdistanzen und den entsprechenden Werten aus den Betonrezepten multipliziert. Daraus ergeben sich die THG-Emissionen der LKW-Transporte pro m³ Oberbeton bzw. pro m³ Unterbeton. Diese sind in Tabelle 4.9 enthalten.

Tabelle 4.9: THG-Emissionen der LKW-Transporte pro m³ Oberbeton (Variante A+B), pro m³ Unterbeton (Variante A) und pro m³ Unterbeton (Variante B)

Betonausgangsstoffe	Treibhausgasemissionen [kg CO ₂ -Äq. / m ³ Beton]		
	Oberbeton (Variante A+B)	Unterbeton (Variante A)	Unterbeton (Variante B)
Natürliche Gesteinskörnung ≥ 4 mm	5,92	5,78	-
Rezyklierte Gesteinskörnung ≥ 4 mm	-	-	0,72
Natürliche Gesteinskörnung < 4 mm	2,66	3,85	3,85
Zement	4,30	3,34	3,48
Wasser	0,00	0,00	0,00
Luftporenbildner	0,00	0,00	0,00
Fließmittel	0,01	-	-
Summe:	12,88	12,98	8,06

Da ein Kubikmeter Beton im Straßenkörper nun wiederum aus 0,16 m³ Oberbeton und 0,84 m³ Unterbeton besteht, werden die berechneten THG-Emissionen in Tabelle 4.9 noch mit den Faktoren 0,16 bzw. 0,84 multipliziert. Durch anschließende Addition der Werte ergeben sich schließlich die THG-Emissionen der LKW-Transporte pro m³ Beton. Diese sind in Tabelle 4.10 für die beiden Varianten A und B angeführt.

Tabelle 4.10: THG-Emissionen der LKW-Transporte pro m³ Beton für Variante A und Variante B

Betonausgangsstoffe	Treibhausgasemissionen [kg CO ₂ -Äq. / m ³ Beton]	
	Variante A	Variante B
Natürliche Gesteinskörnung ≥ 4 mm	5,80	-
Rezyklierte Gesteinskörnung ≥ 4 mm	-	1,55
Natürliche Gesteinskörnung < 4 mm	3,66	3,66
Zement	3,49	3,61
Wasser	0,00	0,00
Luftporenbildner	0,00	0,00
Fließmittel	0,00	0,00
Summe:	12,97	8,84

Die Treibhausgasemissionen, die beim LKW-Transport der Betonausgangsstoffe von deren Produktionsstätten zur Betonmischanlage entstehen, betragen somit bei Verwendung von rein natürlichen Gesteinskörnungen (Variante A) in Summe 12,97 kg CO₂-Äq. / m³ Beton und bei Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen (Variante B) in Summe 8,84 kg CO₂-Äq. / m³ Beton.

Treibhausgasemissionen – Transport der Betonausgangsstoffe zur Mischanlage:

Variante A – Verwendung von rein natürlichen Gesteinskörnungen:

12,97 kg CO₂-Äq. / m³ Beton

Variante B – Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen:

8,84 kg CO₂-Äq. / m³ Beton

4.4 Betonmischanlage

In diesem Kapitel werden nun die Treibhausgasemissionen ermittelt, die beim Mischen der Betonausgangsstoffe in einer mobilen Mischanlage entstehen.

4.4.1 Datenerhebung

Mobile Mischanlagen werden meist in unmittelbarer Nähe zur Baustelle aufgestellt, wo sie oft über ein Stromaggregat betrieben werden. Ein Anschluss an das dortige Stromnetz ist nur selten möglich. Als Kraftstoff für das Stromaggregat kommt Diesel zum Einsatz.

Bei den Daten, die für die Berechnung der THG-Emissionen pro m³ Beton erforderlich sind, handelt es sich daher um Folgende:

- die THG-Emissionen, die bei der Herstellung und Verbrennung von Diesel entstehen,
- den Dieselverbrauch des Stromaggregats pro Zeiteinheit und

- die Menge an gemischtem Beton pro Zeiteinheit

Erstere werden vom Umweltbundesamt Österreich in [29] zur Verfügung gestellt und sind in Tabelle 4.11 angeführt. Hierbei wird zwischen direkten Emissionen, indirekten Emissionen und Gesamtemissionen unterschieden. Bei den direkten Emissionen handelt es sich um jene Emissionen, die am Ort der Energieumwandlung anfallen. Die indirekten Emissionen hingegen fallen bereits bei der Herstellung von Diesel selbst an und werden daher auch als vorgelagerte Emissionen bezeichnet [29]. Beide Emissionen zusammen ergeben die Gesamtemissionen, welche für die anschließende Berechnung der THG-Emissionen pro m³ Beton von Interesse sind.

Tabelle 4.11: THG-Emissionen von Diesel [29]

THG-Emissionen [kg CO ₂ -Äquivalent / l Diesel]	
Direkte Emissionen	2,50
Indirekte Emissionen	0,64
Gesamtemissionen	3,14

Bei den weiteren Daten handelt es sich um Erfahrungswerte aus der Praxis, die zur Verfügung gestellt wurden [28]. So wurde der Dieserverbrauch des Stromaggregats mit rund 80 Litern pro Stunde angegeben und die Menge an gemischtem Beton mit durchschnittlich 180 Kubikmetern pro Stunde.

4.4.2 Berechnung der Treibhausgasemissionen pro m³ Beton

Die THG-Emissionen pro m³ Beton, die beim Mischen der Betonausgangsstoffe in einer mobilen Mischanlage entstehen, lassen sich nun durch Multiplikation der erhobenen THG-Emissionen pro Liter Diesel mit dem Dieserverbrauch des Stromaggregats pro Stunde und anschließende Division durch die Menge an gemischtem Beton pro Stunde berechnen:

- Mobile Mischanlage: $3,14 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{l}} \cdot 80 \frac{\text{l}}{\text{h}} \cdot \frac{1}{180 \text{ m}^3 \text{ Beton}} = \mathbf{1,39} \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{m}^3 \text{ Beton}}$

Die Treibhausgasemissionen, die beim Mischen der Betonausgangsstoffe in einer mobilen Mischanlage entstehen, betragen somit 1,39 kg CO₂-Äq. / m³ Beton.

Treibhausgasemissionen – Betonmischanlage:	1,39 kg CO ₂ -Äq. / m ³ Beton
--	--

4.5 Transport des Betons zum Einbauort

In diesem Kapitel werden die Treibhausgasemissionen ermittelt, die beim Transport des Betons von der mobilen Mischanlage zum Einbauort entstehen.

4.5.1 Datenerhebung

Bei den Daten, die für die Berechnung der THG-Emissionen pro m³ Beton erforderlich sind, handelt es sich um:

- die beim LKW-Transport entstehenden THG-Emissionen pro Tonnenkilometer,
- die Transportdistanz von der mobilen Mischanlage zum Einbauort und
- die Dichte von Beton

Die beim LKW-Transport entstehenden THG-Emissionen pro Tonnenkilometer wurden bereits in Kapitel 4.3.1 erhoben und betragen durchschnittlich 0,13 kg CO₂-Äq. / tkm. Auch die Transportdistanz von der mobilen Mischanlage zum Einbauort wurde bereits festgelegt und beträgt 5 km (siehe Kapitel 3.6). Schließlich ist noch die Betondichte erforderlich; diese kann aus den Betonrezepten in Tabelle 4.2 abgeleitet werden und ergibt sich zu rund 2,4 t / m³ Beton.

4.5.2 Berechnung der Treibhausgasemissionen pro m³ Beton

Aus den erhobenen Daten können schließlich die THG-Emissionen pro m³ Beton berechnet werden, die beim Transport des Betons von der mobilen Mischanlage zum Einbauort entstehen. Diese ergeben sich durch Multiplikation der erhobenen THG-Emissionen pro Tonnenkilometer mit der Transportdistanz und mit der Betondichte zu:

- Transport des Betons: $0,13 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{tkm}} \cdot 5 \text{ km} \cdot 2,4 \frac{\text{t}}{\text{m}^3 \text{ Beton}} = 1,53 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{m}^3 \text{ Beton}}$

Die beim Transport des Betons von der mobilen Mischanlage zum Einbauort entstehenden Treibhausgasemissionen betragen somit 1,53 kg CO₂-Äq. / m³ Beton.

Treibhausgasemissionen –

Transport des Betons zum Einbauort:

1,53 kg CO₂-Äq. / m³ Beton

4.6 Herstellung weiterer Baustoffe für die Betondecke

In diesem Kapitel werden die Treibhausgasemissionen ermittelt, die bei der Herstellung von Dübeln und Ankern, Nachbehandlungsmitteln und Fugenfüllmaterialien entstehen. Diese Materialien und Baustoffe kommen im Betonstraßenbau in sehr geringen Mengen zum Einsatz. Dennoch werden die bei ihrer Herstellung entstehenden THG-Emissionen aus Gründen der Vollständigkeit berechnet.

4.6.1 Datenerhebung

Für die Berechnung der entstehenden THG-Emissionen pro m³ Beton sind folgende Daten erforderlich:

- die THG-Emissionen, die bei der Herstellung der betrachteten Materialien und Baustoffe entstehen und
- die eingesetzten Massen dieser Materialien und Baustoffe pro m³ eingebautem Beton

Da für Erstere keine Daten in Datenbanken gefunden werden konnten, wurden THG-Emissionen erhoben, die bei der Herstellung ähnlicher Baustoffe entstehen. Um welche Baustoffe es sich dabei handelt, wird im Folgenden beschrieben.

Um diese THG-Emissionen schließlich auf einen m³ Beton beziehen zu können, sind zudem die Massen der jeweiligen Materialien und Baustoffe pro m³ eingebautem Beton erforderlich. Diese wurden unter Berücksichtigung der in Kapitel 3.2 festgelegten Betondeckenabmessungen und Fugenanordnungen in Anhang A berechnet. Die Ergebnisse der Berechnungen sind zusammen mit den erhobenen THG-Emissionen im Folgenden angeführt.

Dübel und Anker

Für Dübel und Anker werden als gute Näherung jene Treibhausgasemissionen herangezogen, die bei der Herstellung von Bewehrungsstahl entstehen. Diese wurden erhoben und sind in Tabelle 4.22 enthalten. Für die Berechnung der THG-Emissionen pro m³ Beton wird wiederum der Mittelwert dieser Daten herangezogen. Dieser ergibt sich zu:

- Dübel + Anker: **435** kg CO₂-Äq. / t Bewehrungsstahl

Weiters betragen die in Anhang A berechneten Massen der in der Betondecke eingebauten Dübel und Anker:

- Masse Dübel: **6,17** kg / m³ Beton
- Masse Anker: **0,34** kg / m³ Beton

Nachbehandlungsmittel

Für den auf Paraffinbasis hergestellten Verdunstungsschutz wurden die THG-Emissionen von Paraffinen erhoben. Diese sind in Tabelle 4.23 angeführt und werden schließlich für die Berechnung der THG-Emissionen pro m³ Beton herangezogen. Die erhobenen THG-Emissionen betragen:

- Verdunstungsschutz: **654** kg CO₂-Äq. / t Paraffin

Die ebenfalls erforderliche Masse an Verdunstungsschutz pro m³ Beton ergibt sich aus der auf die Oberfläche aufgetragenen Menge an Verdunstungsschutz bezogen auf die Betondeckendicke. Die aufgetragene Menge beträgt rund 200 g/m² [28], [30], wobei der Verdunstungsschutz im Zuge der Nachbehandlung von Waschbetonoberflächen zweimal aufgebracht wird. Bei einer Betondeckendicke von 25 cm ergibt sich die Masse an Verdunstungsschutz pro m³ Beton somit zu:

- Masse Verdunstungsschutz: $2 \cdot 0,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{Fläche}} \cdot \frac{1}{0,25} \frac{\text{m}^2 \text{Fläche}}{\text{m}^3 \text{Beton}} = \mathbf{1,60}$ kg / m³ Beton

Fugenfüllmaterialien

Für die eingesetzten bituminösen Fugenfüllmaterialien werden als Näherung jene Treibhausgasemissionen herangezogen, die bei der Herstellung von Bitumen entstehen. Diese wurden bereits in [31] erhoben und für die vorliegende Arbeit zur Verfügung gestellt (siehe Tabelle 4.24).

In die Berechnung der THG-Emissionen pro m³ Beton geht wiederum der Mittelwert dieser Daten ein. Dieser ergibt sich zu:

- Fugenfüllmaterialien: **408** kg CO₂-Äq. / t Bitumen

Weiters betragen die in Anhang A berechneten Massen der eingesetzten Fugenfüllmaterialien:

- Masse Fugenfüllmaterialien Längsfugen: **0,17** kg / m³ Beton
- Masse Fugenfüllmaterialien Quersfugen: **0,20** kg / m³ Beton

4.6.2 Berechnung der Treibhausgasemissionen pro m³ Beton

Aus den erhobenen Daten können schließlich die THG-Emissionen pro m³ Beton berechnet werden, die bei der Herstellung der betrachteten Materialien und Baustoffe entstehen. Diese ergeben sich durch Multiplikation der erhobenen THG-Emissionen mit den jeweiligen Massen zu:

- Herstellung Dübel und Anker:

$$435 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{t}} \cdot \left(0,17 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \text{Beton}} + 0,34 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \text{Beton}} \right) = \mathbf{2,83} \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{m}^3 \text{Beton}}$$

- Herstellung Nachbehandlungsmittel:

$$654 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{t}} \cdot 1,60 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \text{Beton}} = \mathbf{1,05} \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{m}^3 \text{Beton}}$$

- Herstellung Fugenfüllmaterialien:

$$408 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{t}} \cdot \left(0,17 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \text{Beton}} + 0,20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \text{Beton}} \right) = \mathbf{0,15} \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{m}^3 \text{Beton}}$$

In Summe betragen die bei der Herstellung der weiteren Materialien und Baustoffe entstehenden Treibhausgasemissionen somit 4,03 kg CO₂-Äq. / m³ Beton. Diese sind deshalb so gering, weil die im Betonstraßenbau eingesetzten Massen an Dübeln und Ankern, Nachbehandlungsmitteln und Fugenfüllmaterialien pro m³ Beton sehr gering sind.

Treibhausgasemissionen –

Herstellung weiterer Baustoffe für die Betondecke: **4,03** kg CO₂-Äq. / m³ Beton

4.7 Transport der weiteren Baustoffe zum Einbauort

In diesem Kapitel werden nun die Treibhausgasemissionen ermittelt, die beim Transport der Dübel und Anker, Nachbehandlungsmittel und Fugenfüllmaterialien von deren Produktionsstätten zum Einbauort entstehen.

4.7.1 Datenerhebung

Bei den Daten, die für die Berechnung der THG-Emissionen pro m³ Beton erforderlich sind, handelt es sich um:

- die beim LKW-Transport entstehenden THG-Emissionen pro Tonnenkilometer,
- die Transportdistanz von den jeweiligen Produktionsstätten zum Einbauort und
- die eingesetzten Massen dieser Materialien und Baustoffe pro m³ eingebautem Beton

All diese Daten wurden bereits in den vorherigen Kapiteln erhoben. Während die beim LKW-Transport entstehenden THG-Emissionen pro Tonnenkilometer in Kapitel 4.3.1 angeführt sind und durchschnittlich bei 0,13 kg CO₂-Äq. / tkm liegen, wurden die Transportdistanzen bereits in Kapitel 3.6 festgelegt und betragen jeweils 50 km. Weiteres sind die Massen der Dübel, Anker, Nachbehandlungsmittel und Fugenfüllmaterialien pro m³ Beton in Kapitel 4.6.1 enthalten und werden daraus entnommen.

4.7.2 Berechnung der Treibhausgasemissionen pro m³ Beton

Aus diesen Daten können schließlich die beim Transport der weiteren Materialien und Baustoffe entstehenden THG-Emissionen pro m³ Beton berechnet werden. Diese ergeben sich durch Multiplikation der erhobenen THG-Emissionen pro Tonnenkilometer mit den Transportdistanzen und den jeweiligen Massen pro m³ Beton zu:

- Transport Dübel und Anker:

$$0,13 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{tkm}} \cdot 50 \text{ km} \cdot \left(6,17 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \text{ Beton}} + 0,34 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \text{ Beton}} \right) = \mathbf{0,041} \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{m}^3 \text{ Beton}}$$

- Transport Nachbehandlungsmittel:

$$0,13 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{tkm}} \cdot 50 \text{ km} \cdot 1,60 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \text{ Beton}} = \mathbf{0,010} \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{m}^3 \text{ Beton}}$$

- Transport Fugenfüllmaterialien:

$$0,13 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{tkm}} \cdot 50 \text{ km} \cdot \left(0,17 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \text{ Beton}} + 0,20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \text{ Beton}} \right) = \mathbf{0,002} \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{m}^3 \text{ Beton}}$$

In Summe betragen die Treibhausgasemissionen, die beim Transport der weiteren betrachteten Materialien und Baustoffe von deren Produktionsstätten zum Einbauort entstehen, 0,05 kg CO₂-Äq. / m³ Beton. Wie bereits in Kapitel 4.6.2 erwähnt, sind die THG-Emissionen dieser Materialien und Baustoffe deshalb so gering, weil die im Betonstraßenbau eingesetzten Massen an Dübeln und Ankern, Nachbehandlungsmitteln und Fugenfüllmaterialien pro m³ Beton so gering sind.

Treibhausgasemissionen –

Transport der weiteren Baustoffe zum Einbauort:

0,05 kg CO₂-Äq. / m³ Beton

4.8 Betondeckenherstellung

In diesem Kapitel werden die Treibhausgasemissionen ermittelt, die bei der Betondeckenherstellung entstehen. Zur Betondeckenherstellung gehören neben dem Einbau des Betons samt Dübeln und Ankern auch die anschließende Oberflächenbehandlung sowie das Herstellen und Verfüllen von Quer- und Längsfugen.

4.8.1 Datenerhebung

In die Berechnung der THG-Emissionen pro m³ Beton fließen nun die Kraftstoffverbräuche der Geräte ein, die bei der Betondeckenherstellung eingesetzt werden. Nicht berücksichtigt werden hingegen die Schmiermittelverbräuche dieser Geräte und die THG-Emissionen, die bei der Geräteherstellung selbst entstehen.

Bei den zu erhebenden Daten, die für die Berechnung der THG-Emissionen pro m³ Beton erforderlich sind, handelt es sich daher um:

- die THG-Emissionen, die bei der Herstellung und Verbrennung von Diesel entstehen,
- den Dieserverbrauch der eingesetzten Geräte pro Zeiteinheit,
- die Menge an eingebautem Beton pro Zeiteinheit und
- die mit Längs- und Querfugen versehene Straßenlänge pro Zeiteinheit

Erstere wurden bereits in Kapitel 4.4.1 erhoben und betragen 3,14 kg CO₂-Äq. / l Diesel. Für alle weiteren Daten wurden Erfahrungswerte aus der Praxis zur Verfügung gestellt [28]. Die mittleren Dieserverbräuche der verwendeten Geräte sind in Tabelle 4.12 angeführt. Diese betragen für den Betondeckeneinbau und die anschließende Oberflächenbehandlung in Summe 85 Liter pro Stunde und für die Herstellung und Verfüllung der Fugen in Summe 21 Liter pro Stunde.

Tabelle 4.12: Kraftstoffverbräuche der Geräte für die Betondeckenherstellung [28]

Eingesetzte Geräte	Kraftstoffverbrauch [l Diesel / h]
Betondeckeneinbau und Oberflächenbehandlung:	
1. Fertiger (Einbau Unterbeton)	35
2. Fertiger (Einbau Oberbeton)	20
Bagger	15
Nachbehandlungswagen	5
Auskehrgerät	10
→ Summe:	85
Herstellung und Verfüllung der Fugen:	
Fugenschneider 1	8
Fugenschneider 2	8
Vergusskessel + Brenner	5
→ Summe:	21

Weiters wurde die Menge an eingebautem und nachbehandeltem Beton mit rund 180 Kubikmetern pro Stunde abgeschätzt und die mit Längs- und Quertugfen versehene Straßenlänge mit etwa 500 Laufmetern pro Tag angegeben. Aus dieser Straßenlänge lässt sich die Betonmenge rückrechnen, die in diesem Straßenabschnitt eingebaut wurde. Bei einer Straßenbreite von 12 m, einer Betondeckendicke von 25 cm und einer Arbeitszeit von 10 Stunden pro Tag ergeben sich daraus 150 Kubikmeter Beton pro Stunde.

4.8.2 Berechnung der Treibhausgasemissionen pro m³ Beton

Aus den erhobenen Daten können schließlich die Treibhausgasemissionen pro m³ Beton berechnet werden, die bei der Betondeckenherstellung entstehen. Dazu werden die erhobenen THG-Emissionen pro Liter Diesel mit den Dieserverbräuchen der eingesetzten Geräte multipliziert und schließlich noch durch die jeweilige Betonmenge pro Stunde dividiert.

- Betondeckeneinbau und Nachbehandlung:

$$3,14 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{l}} \cdot 85 \frac{\text{l}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{180 \text{ m}^3} = \mathbf{1,48} \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{m}^3\text{Beton}}$$

- Fugenherstellung und -verfüllung:

$$3,14 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{l}} \cdot 21 \frac{\text{l}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{150 \text{ m}^3} = \mathbf{0,44} \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{m}^3\text{Beton}}$$

Die Treibhausgasemissionen, die bei der Betondeckenherstellung entstehen, betragen somit in Summe 1,92 kg CO₂-Äq. / m³ Beton.

Treibhausgasemissionen – Betondeckenherstellung:	1,92 kg CO ₂ -Äq. / m ³ Beton
--	--

4.9 Betondeckenabtrag

In diesem Kapitel werden nun die Treibhausgasemissionen ermittelt, die beim Abtrag der Betondecke entstehen.

4.9.1 Datenerhebung

Die Vorgehensweise ist wiederum die gleiche wie jene in Kapitel 4.8. Bei den zu erhebenden Daten handelt es sich daher um:

- die THG-Emissionen, die bei der Herstellung und Verbrennung von Diesel entstehen,
- den Dieserverbrauch der eingesetzten Geräte pro Zeiteinheit und
- die Menge an abgetragenem Beton pro Zeiteinheit.

Erstere werden wieder aus Kapitel 4.4.1 entnommen und betragen 3,14 kg CO₂-Äq. / l Diesel. Für alle weiteren Daten wurden abermals Erfahrungswerte aus der Praxis zur Verfügung

gestellt [28]. Die mittleren Dieserverbräuche der eingesetzten Geräte sind in Tabelle 4.13 angeführt und betragen in Summe 57 Liter Diesel pro Stunde. Die Menge an abgetragenen Beton wurde mit 80 Kubikmetern pro Stunde abgeschätzt.

Tabelle 4.13: Kraftstoffverbräuche der Geräte für den Betondeckenabtrag [28]

Eingesetzte Geräte	Kraftstoffverbrauch [l Diesel / h]
Fallbeil	11
Bagger (Zerkleinerung Betondecke)	23
Bagger (Befüllung LKW)	23
→ Summe:	57

4.9.2 Berechnung der Treibhausgasemissionen pro m³ Beton

Aus den erhobenen Daten lassen sich schließlich die Treibhausgasemissionen pro m³ Beton berechnen, die beim Betondeckenabtrag entstehen. Dazu werden die erhobenen THG-Emissionen pro Liter Diesel mit den Dieserverbräuchen der Geräte multipliziert und schließlich noch durch die Menge an abgetragenen Beton pro Stunde dividiert.

- Betondeckenabtrag:

$$3,14 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{l}} \cdot 57 \frac{\text{l}}{\text{h}} \cdot \frac{1}{80} \frac{\text{h}}{\text{m}^3} = 2,24 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{m}^3 \text{Beton}}$$

Die Treibhausgasemissionen, die beim Betondeckenabtrag entstehen, betragen somit 2,24 kg CO₂-Äq. / m³ Beton.

Treibhausgasemissionen – Betondeckenabtrag:	2,24 kg CO ₂ -Äq. / m ³ Beton
---	--

4.10 Transport der abgetragenen Betondecke zur Recyclinganlage

In diesem Kapitel werden schließlich noch die Treibhausgasemissionen ermittelt, die beim Transport der abgetragenen Betondecke vom Ausbauort zur mobilen Recyclinganlage entstehen. Dabei wird angenommen, dass sämtliche Materialien der alten Betondecke zur Recyclinganlage transportiert und dort aufbereitet werden. Eine Deponierung des Materials wird hingegen nicht vorgehen.

4.10.1 Datenerhebung

Bei den Daten, die für die Berechnung der THG-Emissionen pro m³ Beton erforderlich sind, handelt es sich um:

- die beim LKW-Transport entstehenden THG-Emissionen pro Tonnenkilometer,
- die Transportdistanz vom Ausbauort zur mobilen Aufbereitungsanlage und
- die Dichte des gebrochenen Betons

Wie bereits in den vorigen Kapiteln angeführt, betragen die beim LKW-Transport entstehenden THG-Emissionen pro Tonnenkilometer durchschnittlich 0,13 kg CO₂-Äq. / tkm. Auch die Transportdistanz vom Ausbauort zur mobilen Recyclinganlage wurde bereits festgelegt und beträgt 10 km (siehe Kapitel 3.6). Weiters wird noch die Dichte des gebrochenen Betons benötigt, für welche die Betondichte von rund 2,4 Tonnen pro Kubikmeter aus den Betonrezepten in Kapitel 4.2.1 verwendet wird. Diese ist zwar etwas zu hoch, da das gebrochene Material deutlich mehr Hohlräume besitzt, wird jedoch näherungsweise für die Berechnung der THG-Emissionen herangezogen.

4.10.2 Berechnung der Treibhausgasemissionen pro m³ Beton

Aus den erhobenen Daten können schließlich wieder die Treibhausgasemissionen pro m³ Beton berechnet werden. Dazu werden die beim LKW-Transport entstehenden THG-Emissionen pro Tonnenkilometer mit der Transportdistanz und mit der Dichte von Beton multipliziert.

- Transport des abgetragenen Betons:

$$0,13 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{tkm}} \cdot 10 \text{ km} \cdot 2,4 \frac{\text{t}}{\text{m}^3 \text{ Beton}} = 3,06 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{m}^3 \text{ Beton}}$$

Die Treibhausgasemissionen, die beim Transport der abgetragenen Betondecke vom Ausbauort zur mobilen Aufbereitungsanlage entstehen, betragen somit 3,06 kg CO₂-Äq. / m³ Beton.

Treibhausgasemissionen –

Transport der abgetragenen Betondecke zur Recyclinganlage: **3,06** kg CO₂-Äq. / m³ Beton

4.11 Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks

Nachdem nun die Treibhausgasemissionen für alle betrachteten Lebenswegabschnitte in den Kapiteln 4.2 bis 4.10 berechnet wurden, wird daraus in weiterer Folge der CO₂-Fußabdruck ermittelt. Dieser ergibt sich aus der Summe aller berechneten THG-Emissionen pro m³ Beton und wird sowohl für Variante A als auch für Variante B ermittelt.

In Tabelle 4.14 sind die mittleren THG-Emissionen der betrachteten Lebenswegabschnitte nochmals zusammengefasst und mit den sich daraus ergebenden CO₂-Fußabdrücken angeführt. Der mittlere CO₂-Fußabdruck einer Betondecke bei Verwendung von rein natürlichen Gesteinskörnungen beträgt demnach rund 254 kg CO₂-Äq. / m³ Beton und jener bei Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen rund 258 kg CO₂-Äq. / m³ Beton.

Eine genaue Analyse der Ergebnisse, ein Vergleich der beiden Varianten A und B und die Berechnung der Anteile der THG-Emissionen der einzelnen Lebenswegabschnitte am CO₂-Fußabdruck folgen schließlich in Kapitel 5.

Tabelle 4.14: Mittlere THG-Emissionen und CO₂-Fußabdrücke der beiden Varianten A und B

Lebenswegabschnitte	Treibhausgasemissionen [kg CO ₂ -Äq. / m ³ Beton]	
	Variante A	Variante B
1. Herstellung der Betonausgangsstoffe	227,12	235,00
2. Transport der Betonausgangsstoffe zur Mischanlage	12,97	8,84
3. Betonmischanlage	1,39	1,39
4. Transport des Betons zum Einbauort	1,53	1,53
5. Herstellung weiterer Baustoffe für die Betondecke	4,03	4,03
6. Transport der weiteren Baustoffe zum Einbauort	0,05	0,05
7. Betondeckenherstellung	1,92	1,92
8. Betondeckenabtrag	2,24	2,24
9. Transport der abgetragenen Betondecke zur Recyclinganlage	3,06	3,06
Summe (= CO₂-Fußabdruck):	254,31	258,05

Tabelle 4.15: Erhobene Treibhausgasemissionen – Kiesherstellung

Nr.	Bezeichnung – geographischer Bezug – Jahr	Treibhausgasemissionen [kg CO ₂ -Äquiv. / t Kies]	Datenbank / Herausgeber
K_1	Kies (Korngröße 2/32) – DE – 2021	2,48	ÖKOBAUDAT
K_2	Baukies – DE – 2001	1,67	ProBas, ifeu
K_3	Natürliche GK 4/x mm, rund – CH – 2018	1,60	EPD des SÜGB
K_4	Natürliche GK 4/x mm, gebrochen – CH – 2018	2,38	EPD des SÜGB
K_5	Gravel – IT – 2019	2,67	EPDItaly
K_6	Aggregates (8/11, 11/16, 8/16) – SE - 2017	2,26	The International EPD System
K_7	Aggregates (2/4, 4/8, 8/11, 11/16, 16/22) – NO – 2018	3,13	The Norwegian EPD Foundation
K_8	Natural Aggregates – RO – 2013	3,10	The International EPD System
K_9	Gravel production, crushed – CH – 2013	3,51	ecoinvent 3.7

Tabelle 4.16: Erhobene Treibhausgasemissionen – Sandherstellung

Nr.	Bezeichnung – geographischer Bezug – Jahr	Treibhausgasemissionen [kg CO ₂ -Äquiv. / t Sand]	Datenbank / Herausgeber
S_1	Sand 0/2 – DE – 2021	2,48	ÖKOBAUDAT
S_2	Bausand – DE – 2001	1,61	ProBas, ifeu
S_3	Natürliche GK 0/4 mm, rund – CH – 2018	1,71	EPD des SÜGB
S_4	Natürliche GK 0/4 mm, gebrochen – CH – 2018	1,81	EPD des SÜGB
S_5	Wet sand – IT – 2019	2,67	EPDItaly
S_6	Aggregates (0/2, 2/5, ...) – SE - 2017	2,27	The International EPD System
S_7	Manufactured Sand (0/2) – NO – 2018	3,13	The Norwegian EPD Foundation
S_8	Natural Aggregates – RO – 2013	3,10	The International EPD System

Tabelle 4.17: Erhobene Treibhausgasemissionen – Herstellung von rezyklierten Gesteinskörnungen

Nr.	Bezeichnung	Treibhausgasemissionen [kg CO ₂ -Äquiv. / t rez. GK]	Datenbank / Herausgeber / Paper
RC_1	Rezyklierte GK 0/x mm – CH – 2018	2,20	EPD des SÜGB [8]
RC_2	RC-Anlage B	3,07	Beton mit rezykliertem Gesteinskörnung – eine
RC_3	RC-Anlage D	3,71	Ökobilanz [9]
RC_4	Datensatz Uni. Stuttgart	3,38	
RC_5	Rezyklierte Gesteinskörnung (ecoinvent)	1,49	Ökobilanzen rezyklierter Gesteinskörnung für
RC_6	Rezyklierte Gesteinskörnung – mobile Anlage	2,56	Beton [34]
RC_7	Recycled building aggregates	3,10	Sustainability evaluation of natural and recycled aggregates through life cycle assessment [35]

Tabelle 4.18: Erhobene Treibhausgasemissionen – Zementherstellung

Nr.	Bezeichnung – geographischer Bezug – Jahr	Treibhausgasemissionen [kg CO ₂ -Äquiv. / t Zement]	Datenbank / Herausgeber
Z_1	Durchschnittlicher Zement D – DE – 2017	587,0	ÖKOBAUDAT, IBU (EPD)
Z_2	Zement (CEM II 32,5) – DE – 2018	782,7	ÖKOBAUDAT
Z_3	Zement (CEM II 42,5) – DE – 2018	795,2	ÖKOBAUDAT
Z_4	Zement (CEM II/A) – DE – 2018	875,5	ÖKOBAUDAT
Z_5	Zement (CEM II/B) – DE – 2018	719,8	ÖKOBAUDAT
Z_6	Durchschnittlicher Zement Ö – AT – 2020	493,0	IBU (EPD)
Z_7	Portland Fly Ash Cement CEM II/A-V 42.5 N – SE – 2016	678,0	IBU (EPD)
Z_8	UK Average Portland Cement – UK – 2017	830,0	IBU (EPD)
Z_9	Portland Limestone Cement CEM II/A-LL 42.5 R – SE – 2019	759,0	IBU (EPD)
Z_10	Portland Composite Cement CEM II/A-M (T-L) 42.5 R – EE – 2020	728,0	IBU (EPD)
Z_11	Zement – DE – 2000	752,0	ProBas, ifeu
Z_12	Durchschnittszement Schweiz – CH – 2016	573,0	cemsuisse
Z_13	Schweizer Zement CEM II/A – CH – 2016	589,0	cemsuisse
Z_14	Schweizer Zement CEM II/B – CH – 2016	557,0	cemsuisse

Tabelle 4.19: Erhobene Treibhausgasemissionen – Herstellung von Trinkwasser

Nr.	Bezeichnung – geographischer Bezug – Jahr	Treibhausgasemissionen [kg CO ₂ -Äquiv. / t Kies]	Datenbank / Herausgeber
W_1	Trinkwasser – DE – 2021	0,13	ÖKOBAUDAT
W_2	Tap water production, underground water without treatment – Europe without Switzerland – 2012	0,17	ecoinvent 3.7
W_3	Tap water production, underground water without treatment – CH – 2012	0,04	ecoinvent 3.7
W_4	Tap water production, conventional treatment – Europe without Switzerland – 2012	0,27	ecoinvent 3.7
W_5	Tap water production, conventional treatment – CH – 2012	0,12	ecoinvent 3.7

Tabelle 4.20: Erhobene Treibhausgasemissionen – Herstellung von Betonzusatzmitteln

Nr.	Bezeichnung – geographischer Bezug – Jahr	Treibhausgasemissionen [kg CO ₂ -Äquiv. / t Kies]	Datenbank / Herausgeber
ZM_1	Air entrainers – Europe – 2021	439,0	IBU (EPD)
ZM_2	Plasticizers and Superplasticizers – Europe – 2021	1530,0	IBU (EPD)

Tabelle 4.21: Erhobene Treibhausgasemissionen – LKW-Transport

Nr.	Bezeichnung – geographischer Bezug – Jahr	Treibhausgasemissionen [kg CO ₂ -Äquiv. / tkm]	Datenbank / Herausgeber
T_1	LKW SNF (>18 t) – AT – 2021	0,15	Umweltbundesamt Österreich
T_2	Durchschnitt LKW SNF (≥3,5 t – 40 t) – AT – 2021	0,09	Umweltbundesamt Österreich
T_3	LKW – DE – 2019	0,11	Umweltbundesamt Deutschland
T_4	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 – Europe – 2009	0,16	ecoinvent 3.7

Tabelle 4.22: Erhobene Treibhausgasemissionen – Herstellung von Bewehrungsstahl

Nr.	Bezeichnung – geographischer Bezug – Jahr	Treibhausgasemissionen [kg CO ₂ -Äquiv. / t Bewehrungsstahl]	Datenbank / Herausgeber
D+A_1	Betonstahl – AT – 2020	442	Bau EPD GmbH
D+A_2	Betonstahl – DE – 2018	240	EPD ift Rosenheim GmbH
D+A_3	Cold rolled rebars – CH – 2017	395	The International EPD System
D+A_4	Reinforcing steel production – AT – 2017	464	ecoinvent 3.7
D+A_5	Bewehrungsstahl – DE – 2021	635	ÖKOBAUDAT

Tabelle 4.23: Erhobene Treibhausgasemissionen – Paraffinherstellung

Nr.	Bezeichnung – geographischer Bezug – Jahr	Treibhausgasemissionen [kg CO ₂ -Äquiv. / t Paraffin]	Datenbank / Herausgeber
VS_1	Paraffin production – Europe – 1995	654	ecoinvent 3.7

Tabelle 4.24: Erhobene Treibhausgasemissionen – Bitumenherstellung

Nr.	Bezeichnung	Treibhausgasemissionen [kg CO ₂ -Äquiv. / t Bitumen]	Datenbank / Herausgeber
B_1	Liquid Binder in Refinery	390	Life cycle assessment of asphalt mixtures in support of an environmental product declaration [36]
B_2	Bitumen	720	Life cycle inventories of oil refinery processing and products [37]
B_3	Paving grade bitumen	208	The Eurobitume Life-Cycle Inventory for Bitumen [38]
B_4	Binder	324	Environmental impacts of producing asphalt mixtures with varying degrees of recycled asphalt materials [39]
B_5	Bitumen	173	Life Cycle Assessment of Asphalt Roads: Decision Support at the Project Level [40]
B_6	Bitumen	407	Life Cycle Perspective on Concrete and Asphalt Roadways: Embodied Primary Energy and Global Warming Potential [41]
B_7	Asphalt Binder	637	Life cycle assessment of asphalt binder [42]

5 Gegenüberstellung und Analyse der Ergebnisse

Nachdem die Treibhausgasemissionen der einzelnen Lebenswegabschnitte in Kapitel 4 berechnet und daraus die CO₂-Fußabdrücke der beiden Varianten A (Verwendung von rein natürlichen Gesteinskörnungen) und B (Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen) ermittelt wurden, werden diese im vorliegenden Kapitel genauer betrachtet und analysiert.

In Kapitel 5.1 werden zu Beginn – zusätzlich zu den bereits ermittelten durchschnittlichen CO₂-Fußabdrücken – die minimalen und die maximalen CO₂-Fußabdrücke berechnet, um aufzuzeigen, wie stark der CO₂-Fußabdruck in Abhängigkeit von den erhobenen THG-Emissionen schwanken kann. Im Anschluss daran wird in Kapitel 5.2 auf die Unterschiede zwischen den beiden Varianten A und B hinsichtlich der entstehenden THG-Emissionen und auf deren Ursachen eingegangen. In Kapitel 5.3 werden schließlich noch die Anteile der einzelnen Lebenswegabschnitte am CO₂-Fußabdruck ermittelt und jener Lebenswegabschnitt mit dem größten Anteil näher untersucht. Die Hintergründe werden dabei stets erläutert sowie ein Fazit über die gewonnenen Erkenntnisse gezogen.

5.1 Gegenüberstellung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen CO₂-Fußabdrücke

In diesem Kapitel werden zusätzlich zu den in Kapitel 4.11 ermittelten durchschnittlichen CO₂-Fußabdrücken auch die minimalen und die maximalen CO₂-Fußabdrücke ermittelt und einander gegenübergestellt. Dies erfolgt sowohl für Variante A als auch für Variante B.

Der Hintergrund für diese unterschiedlichen CO₂-Fußabdrücke ist jener, dass bei der Erhebung der THG-Emissionen in Kapitel 4 festgestellt wurde, dass die THG-Emissionen bei der *Herstellung der Betonausgangsstoffe* – und hier insbesondere bei der Zementherstellung – so stark schwanken, dass es sinnvoll ist, nicht nur die mittleren THG-Emissionen für die Berechnung der CO₂-Fußabdrücke heranzuziehen, sondern auch die minimalen und die maximalen THG-Emissionen. Durch den Vergleich der sich daraus ergebenden CO₂-Fußabdrücke kann schließlich festgestellt werden, inwieweit sich die Fußabdrücke voneinander unterscheiden und ob die Unterschiede signifikant sind oder nicht.

Das Heranziehen der minimalen, durchschnittlichen und maximalen THG-Emissionen für die Ermittlung der CO₂-Fußabdrücke bezieht sich dabei lediglich auf den ersten Lebenswegabschnitt *Herstellung der Betonausgangsstoffe*. Für alle weiteren Lebenswegabschnitte werden stets – auch bei der Ermittlung der minimalen und maximalen CO₂-Fußabdrücke – die Mittelwerte der erhobenen THG-Emissionen herangezogen, da die THG-Emissionen dieser Lebenswegabschnitte nicht so stark schwanken, als dass eine zusätzliche Betrachtung der minimalen und maximalen Werte erforderlich bzw. sinnvoll wäre.

Die so berechneten CO₂-Fußabdrücke sind in Tabelle 5.1 angeführt. Daraus ist ersichtlich, dass die CO₂-Fußabdrücke im Fall von Variante A zwischen 211 und 355 kg CO₂-Äq. / m³ Beton liegen und im Fall von Variante B zwischen 213 und 362 kg CO₂-Äq. / m³ Beton. Dies sind in beiden Fällen ziemlich große Spannweiten.

Tabelle 5.1: Minimale, durchschnittliche und maximale CO₂-Fußabdrücke der Varianten A und B

Lebenswegabschnitte	Treibhausgasemissionen [kg CO ₂ -Äq. / m ³ Beton]					
	Variante A			Variante B		
	Minimum	Ø	Maximum	Minimum	Ø	Maximum
1. Herstellung der Betonausgangsstoffe	184,15	227,12	327,45	190,25	235,00	338,67
2. Transport der Betonausgangsstoffe zur Mischanlage	12,97	12,97	12,97	8,84	8,84	8,84
3. Betonmischanlage	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39
4. Transport des Betons zum Einbauort	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53
5. Herstellung weiterer Baustoffe für die Betondecke	4,03	4,03	4,03	4,03	4,03	4,03
6. Transport der weiteren Baustoffe zum Einbauort	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
7. Betondeckenherstellung	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92
8. Betondeckenabtrag	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24
9. Transport der abgetragenen Betondecke zur Recyclinganlage	3,06	3,06	3,06	3,06	3,06	3,06
Summe (= CO₂-Fußabdruck):	211,33	254,31	354,63	213,31	258,05	361,73

Bezogen auf den durchschnittlichen CO₂-Fußabdruck (100 %) handelt es sich bei den berechneten minimalen und maximalen CO₂-Fußabdrücken um Abweichungen von -17 % bis +39 % (Variante A) bzw. von -17 % bis +40 % (Variante B). Diese sind auch in Abbildung 5.1 dargestellt.

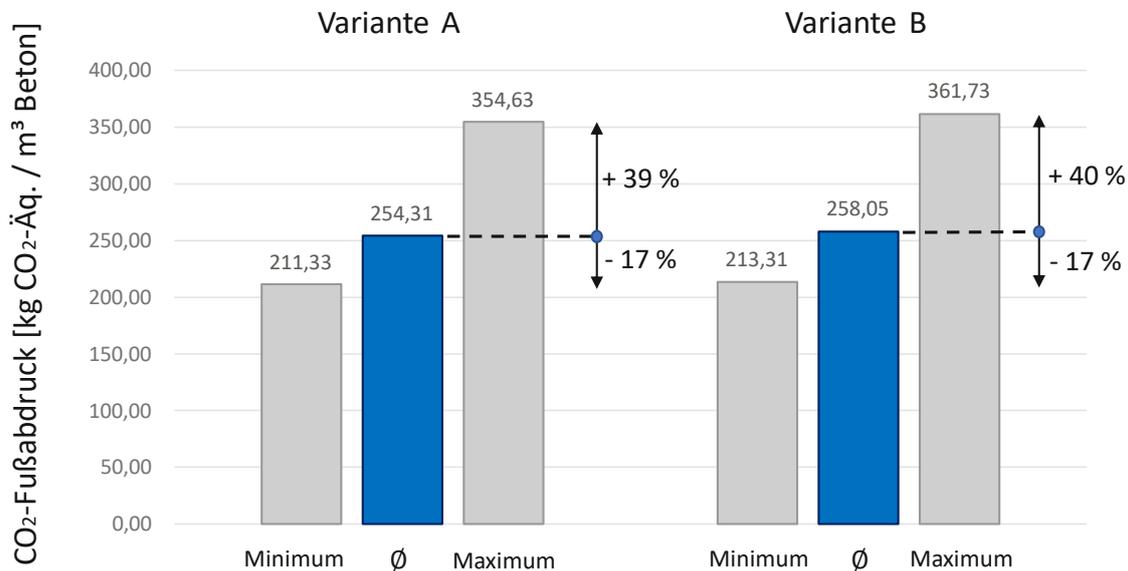


Abbildung 5.1: Darstellung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen CO₂-Fußabdrücke und deren Abweichungen vom durchschnittlichen CO₂-Fußabdruck

Die Abweichungen der minimalen und der maximalen CO₂-Fußabdrücke von den durchschnittlichen CO₂-Fußabdrücken sind somit relativ groß. Wie aus Tabelle und Abbildung 5.1 ersichtlich, sind diese Abweichungen – die sich in erster Linie aus den sich stark voneinander unterscheidenden THG-Emissionen der Zementherstellung ergeben – wesentlich größer als die Unterschiede zwischen den beiden Varianten A und B. Auf Letztere wird im anschließenden Kapitel 5.2 noch genauer eingegangen.

Für die Untersuchungen in den Kapiteln 5.2 und 5.3 werden in weiterer Folge nur noch die durchschnittlichen CO₂-Fußabdrücke herangezogen. Die in den dortigen Kapiteln gewonnenen Erkenntnisse gelten jedoch gleichermaßen auch für die minimalen und die maximalen CO₂-Fußabdrücke.

5.2 Vergleich der Varianten A und B

In diesem Kapitel werden nun die Varianten A und B hinsichtlich ihrer (durchschnittlichen) CO₂-Fußabdrücke miteinander verglichen. Wie in Tabelle 4.14 bzw. in Tabelle 5.1 angeführt, beträgt der mittlere CO₂-Fußabdruck von Variante A rund 254 kg CO₂-Äq. / m³ Beton und jener von Variante B rund 258 kg CO₂-Äq. / m³ Beton. Bei Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen entstehen somit etwas höhere THG-Emissionen als bei Verwendung von rein natürlichen Gesteinskörnungen. Der Unterschied ist jedoch sehr gering und macht nur rund 4 kg CO₂-Äq. / m³ Beton aus. Dennoch wird im Folgenden auf die Ursachen dieses Unterschiedes eingegangen, da der Vergleich der beiden Varianten A und B ein zentrales Thema der vorliegenden Arbeit darstellt.

Bei Betrachtung der Werte in den Tabellen 4.14 und 5.1 wird ersichtlich, dass sich der Unterschied von $4 \text{ kg CO}_2\text{-Äq. / m}^3$ Beton aus den ersten beiden Lebenswegabschnitten *Herstellung der Betonausgangsstoffe* und *Transport der Betonausgangsstoffe zur Mischanlage* ergibt. Die THG-Emissionen aller weiteren Lebenswegabschnitte sind für beide Varianten dieselben, weshalb im Folgenden lediglich auf die ersten beiden Lebenswegabschnitte näher eingegangen wird.

5.2.1 Lebenswegabschnitt 1 – Herstellung der Betonausgangsstoffe

Die THG-Emissionen, die bei der Herstellung der Betonausgangsstoffe entstehen, sind je nach Variante etwas unterschiedlich. Während sie im Fall von Variante A rund $227 \text{ kg CO}_2\text{-Äq. / m}^3$ Beton betragen, liegen sie im Fall von Variante B bei $235 \text{ kg CO}_2\text{-Äq. / m}^3$ Beton. Wird also nur der erste Lebenswegabschnitt betrachtet, entstehen bei Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen rund $8 \text{ kg CO}_2\text{-Äq. / m}^3$ Beton mehr als bei Verwendung von rein natürlichen Gesteinskörnungen.

Um zu untersuchen, was die Ursache für diesen Unterschied ist, werden die in Kapitel 4.2 berechneten THG-Emissionen der einzelnen Betonausgangsstoffe in Tabelle 5.2 nochmals zusammengefasst angeführt. Daraus ist ersichtlich, dass sich die beiden Varianten A und B einerseits hinsichtlich der entstehenden THG-Emissionen bei der Herstellung der Gesteinskörnungen $\geq 4 \text{ mm}$ und andererseits hinsichtlich der entstehenden THG-Emissionen bei der Zementherstellung voneinander unterscheiden.

Der Unterschied, der sich aus der Herstellung der Gesteinskörnungen $\geq 4 \text{ mm}$ ergibt, ist sehr gering und macht lediglich $0,24 \text{ kg CO}_2\text{-Äq. / m}^3$ Beton aus. Der Hintergrund für diese leicht unterschiedlichen Werte ist jener, dass im Fall von Variante A ausschließlich natürliche Gesteinskörnungen verwendet werden, während im Fall von Variante B neben natürlichen Gesteinskörnungen $\geq 4 \text{ mm}$ (für den Oberbeton) auch rezyklierte Gesteinskörnungen $\geq 4 \text{ mm}$ (für den Unterbeton) eingesetzt werden. Und da die Erhebung der THG-Emissionen getrennt für rezyklierte und natürliche Gesteinskörnungen erfolgte, sind auch die THG-Emissionen der Gesteinskörnungen $\geq 4 \text{ mm}$ leicht unterschiedlich.

Der wesentlich größere Unterschied ergibt sich jedoch aus der Zementherstellung und beträgt knapp $8 \text{ kg CO}_2\text{-Äq. / m}^3$ Beton. Grund dafür ist jener, dass dem Beton bei der Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen mehr Zement zugegeben werden muss als bei Verwendung von rein natürlichen Gesteinskörnungen (Kies). Dabei handelt es sich um zusätzliche $15 \text{ kg Zement / m}^3$ Beton, die sich aufgrund der hohen Treibhausgasemissionen von Zement (siehe hierzu auch Kapitel 5.3) auf den CO_2 -Fußabdruck von Variante B auswirken.

Wird also lediglich der erste Lebenswegabschnitt betrachtet, ergibt sich der Unterschied von rund $8 \text{ kg CO}_2\text{-Äq. / m}^3$ Beton in erster Linie aus der höheren Zementmenge bei Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen.

An dieser Stelle ist jedoch zu erwähnen, dass bei den herangezogenen Betonrezepturen in Kapitel 4.2 davon ausgegangen wurde, dass Kies als natürliche Gesteinskörnung verwendet wird. Würde stattdessen Splitt verwendet werden, so wären auch im Fall von Variante A erhöhte Zementmengen erforderlich, was sich wiederum auf den CO_2 -Fußabdruck von Betondecken mit rein natürlichen Gesteinskörnungen auswirken würde.

Weiters kommen in der Praxis verschiedenste Betonrezepturen zum Einsatz. Teilweise werden hierbei höhere Zementmengen vorgesehen, um gewisse Betoneigenschaften sicherzustellen. Auch dies hat einen Einfluss auf die entstehenden THG-Emissionen des ersten Lebenswegabschnitts *Herstellung der Betonausgangsstoffe* und damit auf den CO_2 -Fußabdruck von Betondecken.

Tabelle 5.2: THG-Emissionen der Betonausgangsstoffe für die beiden Varianten A und B

Herstellung der Betonausgangsstoffe	Treibhausgasemissionen [kg CO ₂ -Äq. / m ³ Beton]		
	Variante A	Variante B	Differenz B-A
Natürliche Gesteinskörnung ≥ 4 mm	2,89	-	-2,89
Nat. + Rez. Gesteinskörnung ≥ 4 mm	-	3,13	+3,13
Natürliche Gesteinskörnung < 4 mm	1,69	1,69	0,00
Zement	221,80	229,44	+7,64
Wasser	0,02	0,02	0,00
Luftporenbildner	0,28	0,28	0,00
Fließmittel	0,44	0,44	0,00
Summe:	227,12	235,00	+7,88

5.2.2 Lebenswegabschnitt 2 – Transport der Betonausgangsstoffe zur Mischanlage

Auch die THG-Emissionen, die beim LKW-Transport der Betonausgangsstoffe von deren Produktionsstätten zur Mischanlage entstehen, unterscheiden sich je nach Variante voneinander. Während sie im Fall von Variante A rund 13 kg CO₂-Äq. / m³ Beton betragen, liegen sie im Fall von Variante B bei knapp 9 kg CO₂-Äq. / m³ Beton (siehe Tabelle 4.14 bzw. 5.1). Im Gegensatz zum ersten Lebenswegabschnitt sind die THG-Emissionen bei Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen nun also etwas geringer als jene bei Verwendung von rein natürlichen Gesteinskörnungen. Der Unterschied beträgt rund 4 kg CO₂-Äq. / m³ Beton.

Um wiederum der Ursache für diesen Unterschied auf den Grund zu gehen, sind die in Kapitel 4.3 berechneten THG-Emissionen der einzelnen, transportierten Betonausgangsstoffe in Tabelle 5.3 zusammengefasst angeführt. Daraus ist ersichtlich, dass sich die beiden Varianten A und B einerseits hinsichtlich der THG-Emissionen beim Transport der Gesteinskörnungen ≥ 4 mm voneinander unterscheiden und andererseits hinsichtlich der THG-Emissionen beim Transport des Zements.

Während der Unterschied zufolge des Zementtransports mit 0,12 kg CO₂-Äq. / m³ Beton sehr gering ist und sich daraus ergibt, dass im Fall von Variante B eine etwas größere Zementmenge (+15 kg Zement) pro m³ Beton erforderlich ist, die schließlich auch transportiert werden muss, ist der Unterschied zufolge des Transports der Gesteinskörnungen ≥ 4 mm wesentlich größer. Dieser beträgt rund 4 kg CO₂-Äq. / m³ Beton und ergibt sich daraus, dass die Transportdistanz der natürlichen Gesteinskörnungen von deren Gewinnungsstätte bis zur mobilen Mischanlage wesentlich länger ist als die Transportdistanz der aufbereiteten Gesteinskörnungen von der mobilen Recyclinganlage bis zur mobilen Mischanlage. Die Transportdistanz der natürlichen Gesteinskörnungen wurde dabei in der vorliegenden Arbeit mit 40 Kilometern angenommen, während jene der rezyklierten Gesteinskörnungen lediglich 5 Kilometer beträgt, da sowohl die mobile Recyclinganlage als auch die mobile Mischanlage in unmittelbarer Nähe zur Straßenbaustelle aufgestellt wurden. Aus diesen unterschiedlichen Transportdistanzen ergeben sich somit auch unterschiedliche Dieserverbräuche und daraus unterschiedliche Treibhausgasemissionen.

Wird also lediglich der zweite Lebenswegabschnitt betrachtet, ergibt sich der Unterschied zwischen Variante A und Variante B in erster Linie aus der längeren Transportdistanz der natürlichen Gesteinskörnungen ≥ 4 mm. Es ist jedoch auch anzumerken, dass es sich bei den in dieser Arbeit gewählten Transportdistanzen lediglich um Beispielwerte handelt, die zwar realistisch sind, sich aber in Abhängigkeit vom Bauvorhaben und den lokalen Gegebenheiten stark voneinander unterscheiden können, sodass sie stets neu zu eruieren sind.

Tabelle 5.3: THG-Emissionen des Transports der Betonausgangsstoffe zur Mischanlage für die beiden Varianten A und B

Transport der Betonausgangsstoffe zur Mischanlage	Treibhausgasemissionen [kg CO ₂ -Äq. / m ³ Beton]		
	Variante A	Variante B	Differenz B-A
Natürliche Gesteinskörnung ≥ 4 mm	5,80	-	-5,80
Nat. + Rez. Gesteinskörnung ≥ 4 mm	-	1,55	+1,55
Natürliche Gesteinskörnung < 4 mm	3,66	3,66	0,00
Zement	3,49	3,61	+0,12
Wasser	0,00	0,00	0,00
Luftporenbildner	0,00	0,00	0,00
Fließmittel	0,00	0,00	0,00
Summe:	12,97	8,84	-4,13

5.2.3 Fazit

Der Unterschied zwischen den CO₂-Fußabdrücken der beiden Varianten A und B beträgt rund 4 kg CO₂-Äq. / m³ Beton und ergibt sich aus den Lebenswegabschnitten *Herstellung der Betonausgangsstoffe* und *Transport der Betonausgangsstoffe zur Mischanlage*.

Die *Herstellung der Betonausgangsstoffe* führt dabei zu einem Plus von rund 8 kg CO₂-Äq. bei Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen (Variante B) im Vergleich zur Verwendung von rein natürlichen Gesteinskörnungen (Variante A). Dies ist in erster Linie auf den höheren Zementgehalt im Recyclingbeton zurückzuführen. Beim *Transport der Betonausgangsstoffe zur Mischanlage* ist es hingegen umgekehrt. Hier entstehen in etwa 4 kg CO₂-Äq. mehr bei Verwendung von rein natürlichen Gesteinskörnungen (Variante A), was mit den längeren Transportdistanzen der natürlichen Gesteinskörnungen zusammenhängt.

In Summe ergibt sich daraus ein Plus von rund 4 kg CO₂-Äq. / m³ Beton bei Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen im Vergleich zur Verwendung von rein natürlichen Gesteinskörnungen im Straßenbeton. Dieser Unterschied ist sehr gering und beträgt bezogen auf den gesamten CO₂-Fußabdruck lediglich rund 1,5 %.

Die Schwankungen zwischen den minimalen, durchschnittlichen und maximalen CO₂-Fußabdrücken, die in Kapitel 5.1 untersucht wurden, sind somit weitaus größer als der Unterschied zwischen den beiden Varianten A und B.

5.3 Anteile der betrachteten Lebenswegabschnitte am CO₂-Fußabdruck

In diesem Kapitel werden nun die Anteile der betrachteten Lebenswegabschnitte am (durchschnittlichen) CO₂-Fußabdruck der Varianten A und B ermittelt. Für deren Berechnung wurden wiederum die in den Tabellen 4.14 bzw. 5.1 enthaltenen (durchschnittlichen) THG-Emissionen der einzelnen Lebenswegabschnitte herangezogen. Die sich daraus ergebenden prozentuellen Anteile sind zusammen mit den absoluten Größen in Abbildung 5.2 für Variante A bzw. in Abbildung 5.3 für Variante B dargestellt.

Daraus lässt sich erkennen, dass der Lebenswegabschnitt *Herstellung der Betonausgangsstoffe* für den Großteil der entstehenden THG-Emissionen verantwortlich ist. Er macht – unabhängig von der gewählten Variante – rund 90 % des CO₂-Fußabdrucks der Betondecke aus. Die Lebenswegabschnitte zwei bis neun sind lediglich für die restlichen ca. 10 % verantwortlich. Diese setzen sich aus den THG-Emissionen der LKW-Transporte (ca. 5 - 7 %) sowie aus den THG-Emissionen der Betonmischung, der Herstellung der weiteren Baustoffe, der Betondeckenherstellung und des Betondeckenabtrags (in Summe ca. 4 %) zusammen.

Der CO₂-Fußabdruck einer Betondecke wird somit vorwiegend durch die THG-Emissionen des ersten Lebenswegabschnittes *Herstellung der Betonausgangsstoffe* bestimmt. Dieser Lebenswegabschnitt wird daher im Folgenden näher untersucht, um den Grund für den so hohen Anteil am CO₂-Fußabdruck zu identifizieren.

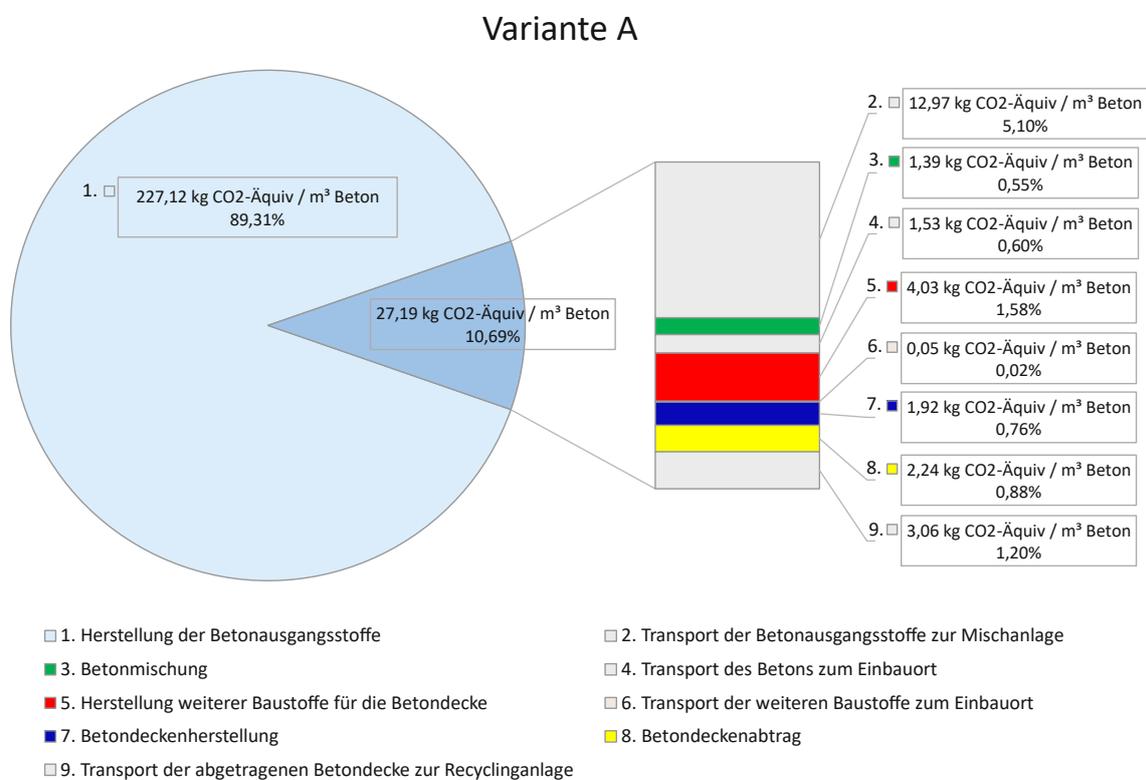


Abbildung 5.2: Variante A – Anteile der betrachteten Lebenswegabschnitte am CO₂-Fußabdruck

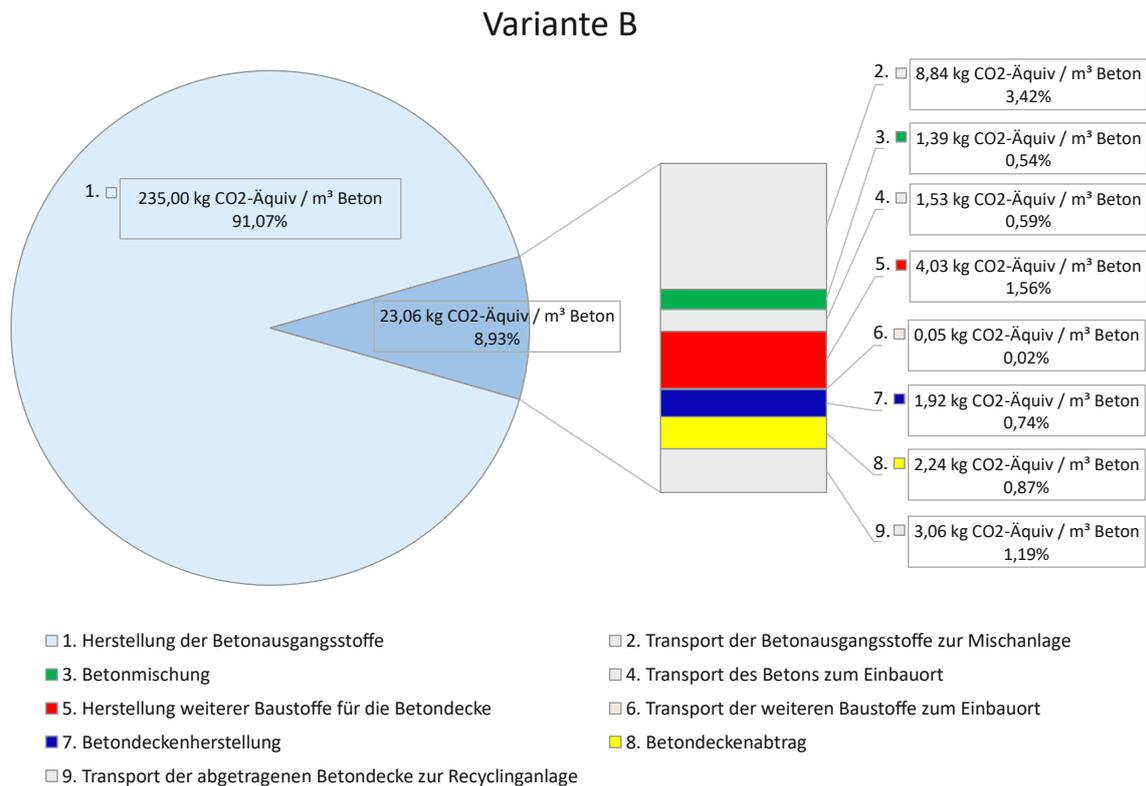


Abbildung 5.3: Variante B – Anteile der betrachteten Lebenswegabschnitte am CO₂-Fußabdruck

5.3.1 Lebenswegabschnitt 1 – Herstellung der Betonausgangsstoffe

Wie bereits beschrieben, macht der Lebenswegabschnitt *Herstellung der Betonausgangsstoffe* den weitaus größten Anteil am CO₂-Fußabdruck einer Betondecke aus. Dieser Anteil liegt bei rund 89 % im Fall von Variante A bzw. bei rund 91 % im Fall von Variante B und ist somit weitgehend unabhängig von der Verwendung natürlicher oder rezyklierter Gesteinskörnungen. Aufgrund des so hohen Anteils dieses ersten Lebenswegabschnittes am CO₂-Fußabdruck wird nun im Folgenden untersucht, wie sich die THG-Emissionen dieses Lebenswegabschnittes zusammensetzen bzw. welche(r) Betonausgangsstoff(e) primär für diese hohen THG-Emissionen verantwortlich ist (sind).

Die THG-Emissionen der einzelnen Betonausgangsstoffe wurden bereits in Kapitel 5.2.1 für die beiden Varianten A und B angeführt. Daraus ist ersichtlich, dass die THG-Emissionen, die bei der Zementherstellung entstehen, um ein Vielfaches größer sind als jene aller anderen Betonausgangsstoffe zusammen. Darüber hinaus wurden wiederum die Anteile der einzelnen Betonausgangsstoffe an den gesamten THG-Emissionen dieses ersten Lebenswegabschnittes berechnet und in Abbildung 5.4 für Variante A bzw. in Abbildung 5.5 für Variante B dargestellt. Daraus kann entnommen werden, dass die Herstellung des Zements für knapp 98 % der entstehenden THG-Emissionen verantwortlich ist, während die Herstellung der Gesteinskörnungen lediglich rund 2 % und die Herstellung der Betonzusatzmittel sowie des Anmachwassers in Summe lediglich rund 0,3 % ausmacht. Das bedeutet also, dass es sich bei dem Betonausgangsstoff, der für die so hohen THG-Emissionen dieses betrachteten Lebenswegabschnittes verantwortlich ist, um den Baustoff Zement handelt. Die THG-Emissionen aller weiteren Betonausgangsstoffe sind im Vergleich dazu vernachlässigbar klein.

Variante A

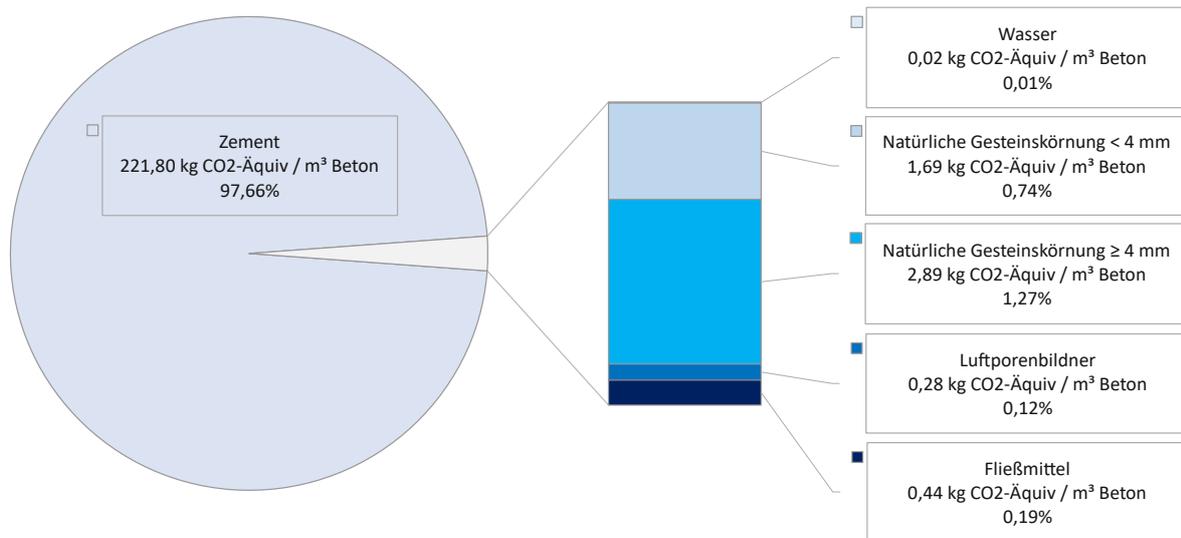


Abbildung 5.4: Variante A – Anteile der einzelnen Betonausgangsstoffe an den gesamten THG-Emissionen des ersten Lebenswegabschnittes

Variante B

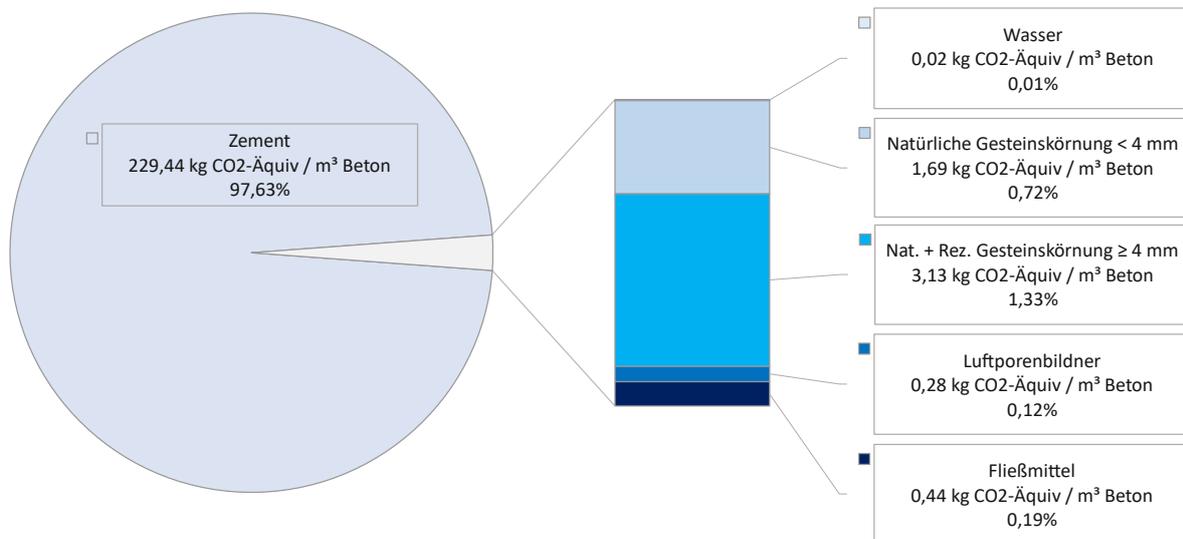


Abbildung 5.5: Variante B – Anteile der einzelnen Betonausgangsstoffe an den gesamten THG-Emissionen des ersten Lebenswegabschnittes

Die Zementherstellung dominiert jedoch nicht nur die THG-Emissionen dieses ersten Lebenswegabschnittes, sondern in weiterer Folge auch den gesamten CO₂-Fußabdruck einer Betondecke. Der Anteil der THG-Emissionen der Zementherstellung am CO₂-Fußabdruck beträgt dabei:

- Variante A: $97,66 \% \cdot 89,31 \% = 87,22 \%$
- Variante B: $97,63 \% \cdot 91,07 \% = 88,91 \%$

Die Zementherstellung ist somit für rund 87 – 89 % aller entstehenden THG-Emissionen verantwortlich.

5.3.2 Fazit

Die Ermittlung der Anteile der einzelnen, betrachteten Lebenswegabschnitte am CO₂-Fußabdruck hat ergeben, dass der Lebenswegabschnitt *Herstellung der Betonausgangsstoffe* – unabhängig von der gewählten Variante – knapp 90 % der gesamten THG-Emissionen ausmacht. Zurückzuführen ist dieser hohe Anteil auf die Zementherstellung, welche für insgesamt rund 98 % der THG-Emissionen des ersten Lebenswegabschnitts bzw. für rund 87 – 89 % der THG-Emissionen aller betrachteten Lebenswegabschnitte (= CO₂-Fußabdruck) verantwortlich ist.

Die THG-Emissionen der anderen Betonausgangsstoffe und Lebenswegabschnitte erscheinen daher mit einem Anteil von insgesamt rund 11 – 13 % nicht nur sehr gering, sondern auch nebensächlich zu sein, was eine mögliche Reduzierung des CO₂-Fußabdrucks betrifft. Zwar können beispielsweise durch kürzere Transportdistanzen wichtige THG-Emissionen eingespart werden, eine deutliche Reduzierung des CO₂-Fußabdrucks wird jedoch lediglich durch Maßnahmen bei der Zementherstellung selbst bzw. durch geringere Zementzugaben möglich sein.

Weiters wird nochmals darauf hingewiesen, dass in der vorliegenden Arbeit nicht alle Lebenswegabschnitte betrachtet wurden – darunter die Erhaltungsmaßnahmen während der Nutzungsphase sowie die Nutzung der Straße selbst. Diese sind daher nicht in ermittelten CO₂-Fußabdrücken enthalten.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde der CO₂-Fußabdruck einer Betondecke bei Betrachtung ausgewählter Lebenswegabschnitte ermittelt, wobei die beiden Varianten A *Verwendung von rein natürlichen Gesteinskörnungen* und B *Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen* unterschieden wurden. Während im Fall von Variante A ausschließlich natürliche Gesteinskörnungen für die Herstellung des Deckenbetons verwendet wurden, konnten im Fall von Variante B rezyklierte Gesteinskörnungen nur dort eingesetzt werden, wo es die RVS 08.17.02 [12] auch vorsieht. Dies betrifft die Gesteinskörnungen ≥ 4 mm im Unterbeton. Für die Gesteinskörnungen im Oberbeton und die Gesteinskörnungen < 4 mm im Unterbeton wurden daher auch im Fall von Variante B natürliche Gesteinskörnungen eingesetzt. Weiters wurde berücksichtigt, dass bei Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen – im Vergleich zur Verwendung von Kies als natürliche Gesteinskörnung – ein erhöhter Zementgehalt von + 15 kg Zement / m³ Beton erforderlich ist. Dieser erhöhte Bedarf hängt mit der größeren Oberfläche von gebrochenen Gesteinskörnungen im Vergleich zu jener von runden Gesteinskörnungen zusammen [2].

Als Vergleichseinheit für den CO₂-Fußabdruck wurde 1 m³ Beton gewählt. Dieser setzt sich aus 0,16 m³ Oberbeton und 0,84 m³ Unterbeton zusammen. Für den Ober- und Unterbeton wurden unterschiedliche Betonrezepturen herangezogen. Die Betondeckendicke von 25 cm (bestehend aus 4 cm Oberbeton und 21 cm Unterbeton) ergibt sich aus der gewählten Lastklasse LK40 und der Bautype BE2, welche als repräsentativ für den betrachteten Autobahnabschnitt mit einer Breite von insgesamt 12 m erachtet wurden.

Für die betrachteten Lebenswegabschnitte wurden die Treibhausgasemissionen erhoben und auf einen m³ Beton bezogen. Bei den betrachteten Lebenswegabschnitten handelt es sich um die Herstellung der einzelnen Betonausgangsstoffe, die Betonmischung, den Betondeckeneinbau samt Nachbehandlung und Fugenherstellung, die Herstellung weiterer Materialien und Baustoffe wie z.B. Dübel und Anker, den Betondeckenausbau sowie um sämtliche LKW-Transporte. Für den Einbau der Betondecke wurden Gleitschalungsfertiger eingesetzt, welche die Betondecke über die gesamte Breite von 12 m in einem Durchgang einbauen. Auf den händischen Einbau wurde hingegen nicht eingegangen. Weiters wurden nur die THG-Emissionen von mobilen Betonmisch- und Recyclinganlagen erhoben, nicht jedoch jene von stationären Anlagen. Auch die Betrachtung der THG-Emissionen, die bei der Erhaltung und der Nutzung der Straße entstehen, war nicht Teil dieser Arbeit.

Die CO₂-Fußabdrücke der beiden Varianten A und B wurden schließlich berechnet und miteinander verglichen. Beim Vergleich der beiden CO₂-Fußabdrücke konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Während der CO₂-Fußabdruck bei Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen (Variante B) bei 258,05 kg CO₂-Äq / m³ Beton liegt, beträgt jener bei Verwendung von rein natürlichen Gesteinskörnungen (Variante A) 254,31 kg CO₂-Äq. / m³ Beton. Dieser geringe Unterschied von knapp 4 kg CO₂-Äq / m³ Beton resultiert aus den Lebenswegabschnitten *Herstellung der Betonausgangsstoffe* und *Transport der Betonausgangsstoffe zur Mischanlage*. Während die Herstellung der Betonausgangsstoffe bei Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen zu etwas höheren Treibhausgasemissionen führt als bei Verwendung von rein natürlichen Gesteinskörnungen (was auf den höheren Zementgehalt im Recyclingbeton zurückzuführen ist), kann beim Transport der rezyklierten Gesteinskörnungen zur Mischanlage wiederum ein Teil der THG-Emissionen eingespart werden (was auf die kürzeren Transportdistanzen

von rezyklierten Gesteinskörnungen zurückzuführen ist). Für alle weiteren betrachteten Lebenswegabschnitte ist es nicht relevant, ob natürliche Gesteinskörnungen oder rezyklierte Gesteinskörnungen im Deckenbeton verwendet werden – die Treibhausgasemissionen bleiben dieselben.

Die gewonnene Erkenntnis, dass der CO₂-Fußabdruck einer Betondecke bei Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen geringfügig größer ist als jener bei Verwendung von rein natürlichen Gesteinskörnungen, gilt speziell für die in dieser Arbeit getroffenen Annahmen. So können beispielsweise Betonrezepturen mit abweichenden Zementgehalten oder kürzere bzw. längere Transportdistanzen zu (geringfügig) anderen Ergebnissen führen. Auch die Verwendung von gebrochenem Splitt anstelle von rundem Kies in Variante A würde einen etwas höheren Zementgehalt im Beton erfordern und sich entsprechend auf den CO₂-Fußabdruck auswirken. Es kommt also auf den individuellen Fall an, wie groß der CO₂-Fußabdruck einer Betondecke ist.

Dass Recyclingbeton im Vergleich zu Beton mit Kies als natürliche Gesteinskörnung ein höheres Treibhausgaspotenzial aufweist, wurde auch in der Ökobilanz in [9] festgestellt. Als Grund wird ebenfalls der erhöhte Zementgehalt bei Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen angegeben. Was im Gegensatz zur vorliegenden Arbeit jedoch nicht berücksichtigt wurde, sind die unterschiedlichen Transportdistanzen bei Verwendung von rezyklierten bzw. natürlichen Gesteinskörnungen.

Neben dem Vergleich der CO₂-Fußabdrücke der beiden Varianten A und B wurden in der vorliegenden Arbeit auch die Anteile der einzelnen, betrachteten Lebenswegabschnitte am CO₂-Fußabdruck der Betondecke ermittelt. Dabei wurde festgestellt, dass die *Herstellung der Betonausgangsstoffe* mit insgesamt 227,12 kg CO₂-Äq. / m³ Beton (= 89 %) im Fall von Variante A bzw. mit 235,00 kg CO₂-Äq. / m³ Beton (= 91 %) im Fall von Variante B den weitaus größten Anteil am CO₂-Fußabdruck ausmacht. Weitere 5 % (Variante A) bzw. 7 % (Variante B) des CO₂-Fußabdrucks lassen sich auf die *Transporte* zurückführen und die restlichen rund 4 % auf die *Betonmischung*, die *Herstellung weiterer Baustoffe für die Betondecke*, die *Betondeckenherstellung* und den *Betondeckenabtrag*. Die Erhaltung der Straße sowie die Nutzungsphase wurden hierbei aufgrund mangelnder Daten nicht berücksichtigt.

Hauptverantwortlich für die entstehenden THG-Emissionen der betrachteten Lebenswegabschnitte ist somit die Herstellung der Betonausgangsstoffe und hierbei speziell die Zementherstellung. Diese allein verursacht 87 % (Variante A) bzw. 89 % (Variante B) aller THG-Emissionen. Daher sollte der Zementgehalt im Beton so gering wie möglich gehalten werden; auch durch den Einsatz von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen können die THG-Emissionen reduziert werden [10]. Darüber hinaus ist darauf zu achten, dass die Transportwege möglichst kurz gehalten werden, da auch hier ein gewisses Einsparungspotenzial vorhanden ist. Eine Optimierung aller anderen betrachteten Lebenswegabschnitte und Betonausgangsstoffe führt hingegen nur zu einer unwesentlichen Reduktion des CO₂-Fußabdrucks – vor allem so lange die bei der Zementherstellung entstehenden THG-Emissionen einen so großen Anteil an den Gesamtemissionen ausmachen.

Wird nun noch einen Schritt weitergegangen – wie es in [10] bzw. [32] getan wurde, jedoch nicht in der vorliegenden Arbeit – und werden auch jene THG-Emissionen ermittelt, die durch die Verkehrsbelastung der hergestellten Straße über einen Zeitraum von 30 Jahren entstehen, so stellt sich heraus, dass diese um den Faktor 100 höher sind als die THG-Emissionen aus der Herstellung und der Erhaltung der Straße zusammen. Zu dieser Erkenntnis kamen Milachowski et al. an der TU München, die sich mit den ökologischen Auswirkungen der Herstellung und Nutzung eines 1 km langen Autobahnabschnitts beschäftigt haben. Demzufolge liegt das größte Einsparpotenzial nicht in der Optimierung der Betondeckenherstellung selbst, sondern vielmehr in der

Reduzierung des Treibstoffverbrauchs der Fahrzeuge durch eine treibstoffsparende Bauweise. Eine Reduzierung des Treibstoffverbrauchs um lediglich 2 % würde bereits zu einer Reduktion der THG-Emissionen führen, die größer ist als die bei der Straßenherstellung und -erhaltung entstehenden THG-Emissionen in Summe [32].

Das soll selbstverständlich nicht heißen, dass die bei der Zementherstellung entstehenden THG-Emissionen nicht relevant sind. Vielmehr soll jedoch durch diesen Vergleich mit den weitaus höheren THG-Emissionen aus der Verkehrsbelastung verdeutlicht werden, dass stets das große Ganze im Auge behalten werden muss und bei jenen Prozessen angesetzt werden sollte, bei denen durch vergleichsweise einfache Maßnahmen die größten Wirkungen erzielt werden können.

Literaturverzeichnis

- [1] J. Steigenberger, H. Eisner und S. Marchtrenker, „Recycling von Beton im Strassenbau“, *update*, Nr. 1/11, 2011. https://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Service/Update/update2011_1.pdf (Zugriff am 23.07.2022).
- [2] R. Blab, *Betonstraßen - das Handbuch: Leitfaden für die Praxis*. Zement + Beton, Handels- u. Werbeges.m.b.H., Wien, Österreich, 2012.
- [3] H. Sommer, „Entwicklung und Innovation im österreichischen Betonstraßenbau - Rückblick und Erwartungen“, in *Innovation & Nachhaltigkeit im Betonstraßenbau, Publikation anlässlich der Festveranstaltung zum 75. Geburtstag von BR h. c. Prof. DI Dr. techn. Hermann Sommer*, S. 6–7, 2011. https://www.zement.at/downloads/betonstrassenbau_2011.pdf (Zugriff am 23.07.2022).
- [4] G. Breyer, J. Litzka und J. Steigenberger, „Die Betonstrasse - eine nachhaltige Bauweise mit Zukunft“, *update*, Nr. 3/09, 2009. https://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Service/Update/update_3_09.pdf (Zugriff am 23.07.2022).
- [5] Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien, ABl. L 312 vom 22.11.2008, S.3, zuletzt geändert durch die Richtlinie (EU) 2018/851 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018, ABl. L 150/109.
- [6] H. Sommer, „Wiederverwendung von Altbeton für neue Betonfahrbahndecken“, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Schriftenreihe *Straßenforschung*, Heft 403, S. 55–77, 1992.
- [7] H. Krenn, „Recyclingfähigkeit von Beton - der Schritt zur Nachhaltigkeit“, Zement und Beton, Sonderheft, Internationale Fachtagung 2005 *Betondecken aus volkswirtschaftlicher Sicht*, S. 36–38, 2005.
- [8] SÜGB - Schweizerischer Überwachungsverband für Gesteinsbaustoffe, *Durchschnitts-EPD für Gesteinskörnungen*, Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804, Bern, Schweiz, 2018. https://www.fskb.ch/wp-content/uploads/2018/11/CLEAR_2018-09-04_EP-Dokument-Gesteinskoernung_unterschrieben.pdf (Zugriff am 23.09.2021).
- [9] U. Jeske, J. Buchgeister, L. Schebek und M. Weil, „Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung - eine Ökobilanz“, in *Nachrichten - Forschungszentrum Karlsruhe*, Bd. 36, S. 219–224, 2004. <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/120059892> (Zugriff am 23.09.2021).
- [10] C. Milachowski, T. Stengel und C. Gehlen, „Ökobilanz für die Herstellung und Nutzung eines Autobahnabschnitts“, *update*, Nr. 2/10, 2010. https://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Service/Update/update_2010_2.pdf (Zugriff am 25.07.2022).
- [11] FSV - Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr, *RVS 03.08.63: Oberbaubemessung*, 1. Juni 2016, herangezogene Fassung: 2. Abänderung vom 1. März 2021, Wien, Österreich, 2016.
- [12] FSV - Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr, *RVS 08.17.02: Deckenherstellung*, 1. April 2011, herangezogene Fassung: 1. Abänderung 13. Juli 2011, Wien, Österreich, 2011.
- [13] BRV - Österreichischer Baustoff-Recycling Verband, Österreichischer Güteschutzverband Recycling-Baustoffe, *Richtlinie Recycling-Baustoffe*, Auflage 10, 2017.

- [14] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN ISO 14067: Treibhausgase - Carbon Footprint von Produkten - Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung (ISO 14067:2018)*, Berlin, Deutschland, 2019.
- [15] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020)*, Berlin, Deutschland, 2021.
- [16] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN ISO 14044: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020)*, Berlin, Deutschland, 2021.
- [17] ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH. *Wirkungsabschätzung*. [Online]. <https://www.ifeu.de/methoden-tools/wirkungsabschaetzung/> (Zugriff am 16.08.2022).
- [18] FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, zitiert nach Wikipedia. *Richtlinien für die Anlage von Autobahnen*. Ausgabe 2008. [Online]. https://de.wikipedia.org/wiki/Richtlinien_f%C3%BCr_die_Anlage_von_Autobahnen (Zugriff am 18.08.2022).
- [19] Wirtgen Group. *Gleitschalungsfertiger*. [Online]. <https://www.wirtgen-group.com/ocs/de-de/wirtgen/gleitschalungsfertiger-73-c/> (Zugriff am 20.07.2022).
- [20] Nils Gruschka. *Regelquerschnitt RQ 31*. 2009. [Online]. <https://de.wikipedia.org/w/index.php?curid=4886867> (Zugriff am 18.08.2022).
- [21] O. Cencic und H. Rechberger. STAN - Software for Substance Flow Analysis. Version 2.6.801. Technische Universität Wien. [Online]. <https://stan2web.net/>
- [22] ecoinvent. Version ecoinvent 3.7. Zürich, Schweiz. [Online]. <https://ecoinvent.org/>
- [23] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. *ÖKOBAUDAT Informationsportal nachhaltiges Bauen*. Berlin, Deutschland. [Online]. <https://www.oeko-baudat.de/> (Zugriff am 20.09.2021)
- [24] Umweltbundesamt. *ProBas - Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme*. Dessau-Roßlau, Deutschland. [Online]. <https://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php> (Zugriff am 20.09.2021)
- [25] IBU - Institut Bauen und Umwelt e.V. Berlin, Deutschland. [Online]. <https://ibu-epd.com/> (Zugriff am 20.09.2021)
- [26] Umweltbundesamt GmbH. Wien, Österreich. [Online]. <https://www.umweltbundesamt.at/> (Zugriff am 15.10.2021).
- [27] Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau, Deutschland. [Online]. <https://www.umweltbundesamt.de/> (Zugriff am 15.10.2021).
- [28] Bauunternehmen (anonymisiert). *Erhebung von Daten zu Geräten, Dieselverbräuchen und Betonrezepten*. [Interview]. Geführt am 28. September 2021.
- [29] Umweltbundesamt GmbH. *Berechnung von Treibhausgas (THG)-Emissionen verschiedener Energieträger*. Österreich. [Online]. <https://secure.umweltbundesamt.at/co2mon/co2mon.html> (Zugriff am 20.11.2021).
- [30] Sika Schweiz AG. *Sika® Antisol® E-20 Nachbehandlungsmittel*. [Online]. <https://che.sika.com/de/construction/beton-und-moertelherstellung/hilfs-und-nebenprodukte/nachbehandlungsmittelzischennachbehandlungsmittel/sika-antisol-e-20.html> (Zugriff am 26.06.2022).
- [31] M. Gruber, B. Hofko und H. Rechberger, *Qualitätskriterium Recyclingasphalt*, Endbericht Nr. 19413, Technische Universität Wien, Wien, Österreich, 2020.

- [32] C. Milachowski, T. Stengel und C. Gehlen, *Life cycle assessment for road construction and use*, Technische Universität München, EUPAVE European Concrete Paving Association, 2011. https://www.eupave.eu/wp-content/uploads/eupave_life_cycle_assessment.pdf (Zugriff am 25.07.2022).
- [33] U. Schneider und H. Knoblauch, *Bauchemie*, 6., neu bearb. u. erw. Aufl. Neuwied: Werner, 2006.
- [34] Holcim (Schweiz) AG, *Ökobilanz rezyklierter Gesteinskörnungen für Beton*, Forschungsbericht, Zürich, Schweiz, 2010. https://www.iip.kit.edu/downloads/Holcim_Forschungsbericht_dt_2011.pdf (Zugriff am 23.09.2021).
- [35] G. A. Blengini, E. Garbarino und K. Zavaglia, „Sustainability evaluation of natural and recycled aggregates through life cycle assessment“, *Proc. Conf. SB07 International Conference on Sustainable Building in South Europe*, S. 299–306, Turin, Italien, 2007.
- [36] A. Mukherjee, *Life Cycle Assessment of Asphalt Mixtures in Support of an Environmental Product Declaration*, National Asphalt Pavement Association, MD, USA, 2016. https://www.asphalt pavement.org/uploads/documents/EPD_Program/LCA_final.pdf (Zugriff am 20.09.2022).
- [37] N. Jungbluth, C. Meili und P. Wenzel, *Life cycle inventories of oil refinery processing and products*, ESU-services Ltd., Schaffhausen, Schweiz, 2018. https://www.researchgate.net/publication/328901333_Life_cycle_inventories_of_oil_refinery_processing_and_products_Final_report (Zugriff am 20.09.2022).
- [38] Eurobitume, *The Eurobitume Life-Cycle Inventory for Bitumen*, Version 3.1, European Bitumen Association, Brüssel, Belgien, 2020. https://www.eurobitume.eu/fileadmin/Feature/LCI/EUB2975.001_LCI_Update_2020_01_LR_pages.pdf (Zugriff am 20.09.2022).
- [39] R. Yang, H. Ozer, S. Kang und I.L. Al-Qadi, „Environmental Impacts of Producing Asphalt Mixtures with Varying Degrees of Recycled Asphalt Materials“, in *International Symposium on Pavement LCA 2014*, IL, USA, 2014. http://www.ucprc.ucdavis.edu/p-lca2014/media/pdf/Papers/UC_Davis_Workshop_Paper_Revision2_10082014%20b.pdf (Zugriff am 20.09.2022).
- [40] A.A. Butt, *Life Cycle Assessment of Asphalt Roads - Decision Support at the Project Level*, Doctoral Thesis in Highway and Railway Engineering, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Schweden, 2014. https://www.researchgate.net/publication/281112091_Life_Cycle_Assessment_of_Asphalt_Roads (Zugriff am 20.09.2022).
- [41] Athena Sustainable Materials Institute, *A Life Cycle Perspective on Concrete and Asphalt Roadways: Embodied Primary Energy and Global Warming Potential*. Cement Association of Canada, Ottawa, Kanada, 2006.
- [42] M. Wildnauer, E. Mulholland und J. Liddie, *Life Cycle Assessment of Asphalt Binder*, Version 2.1, Asphalt Institute, KY, USA, 2019. <https://www.asphaltinstitute.org/engineering/sustainability/life-cycle-assessment-of-asphalt-binder/> (Zugriff am 20.09.2022).

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Wichtige Normen, Richtlinien und Verordnungen	20
Tabelle 4.1:	Erhobene THG-Emissionen der Betonausgangsstoffe pro Tonne Ausgangsstoff.....	36
Tabelle 4.2:	Betonrezepte für den Oberbeton (mit natürlicher GK), den Unterbeton mit natürlicher GK und den Unterbeton mit rezyklierter GK.....	37
Tabelle 4.3:	THG-Emissionen der Betonausgangsstoffe pro m ³ Oberbeton – Variante A und Variante B.....	38
Tabelle 4.4:	THG-Emissionen der Betonausgangsstoffe pro m ³ Unterbeton – Variante A.....	39
Tabelle 4.5:	THG-Emissionen der Betonausgangsstoffe pro m ³ Beton – Variante A.....	39
Tabelle 4.6:	THG-Emissionen der Betonausgangsstoffe pro m ³ Unterbeton – Variante B.....	40
Tabelle 4.7:	THG-Emissionen der Betonausgangsstoffe pro m ³ Beton – Variante B.....	40
Tabelle 4.8:	Transportdistanzen der Betonausgangsstoffe zur Mischanlage	42
Tabelle 4.9:	THG-Emissionen der LKW-Transporte pro m ³ Oberbeton (Variante A+B), pro m ³ Unterbeton (Variante A) und pro m ³ Unterbeton (Variante B)	43
Tabelle 4.10:	THG-Emissionen der LKW-Transporte pro m ³ Beton für Variante A und Variante B.....	44
Tabelle 4.11:	THG-Emissionen von Diesel [29]	45
Tabelle 4.12:	Kraftstoffverbräuche der Geräte für die Betondeckenherstellung [28]	50
Tabelle 4.13:	Kraftstoffverbräuche der Geräte für den Betondeckenabtrag [28]	52
Tabelle 4.14:	Mittlere THG-Emissionen und CO ₂ -Fußabdrücke der beiden Varianten A und B	54
Tabelle 4.15:	Erhobene Treibhausgasemissionen – Kiesherstellung	55
Tabelle 4.16:	Erhobene Treibhausgasemissionen – Sandherstellung.....	55
Tabelle 4.17:	Erhobene Treibhausgasemissionen – Herstellung von rezyklierten Gesteinskörnungen	56
Tabelle 4.18:	Erhobene Treibhausgasemissionen – Zementherstellung	56
Tabelle 4.19:	Erhobene Treibhausgasemissionen – Herstellung von Trinkwasser.....	57
Tabelle 4.20:	Erhobene Treibhausgasemissionen – Herstellung von Betonzusatzmitteln	57
Tabelle 4.21:	Erhobene Treibhausgasemissionen – LKW-Transport.....	58
Tabelle 4.22:	Erhobene Treibhausgasemissionen – Herstellung von Bewehrungsstahl.....	58
Tabelle 4.23:	Erhobene Treibhausgasemissionen – Paraffinherstellung.....	58
Tabelle 4.24:	Erhobene Treibhausgasemissionen – Bitumenherstellung	59

Tabelle 5.1: Minimale, durchschnittliche und maximale CO ₂ -Fußabdrücke der Varianten A und B.....	61
Tabelle 5.2: THG-Emissionen der Betonausgangsstoffe für die beiden Varianten A und B.....	64
Tabelle 5.3: THG-Emissionen des Transports der Betonausgangsstoffe zur Mischanlage für die beiden Varianten A und B	65

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Aufbau des Straßenkörpers mit Betondecke, entnommen mit Genehmigung aus [2]	4
Abbildung 2.2:	Unbewehrte Betondecke mit Längs- und Quertugen (schematische Darstellung) [2]	6
Abbildung 2.3:	Schlaff bewehrte Betondecke mit Fugen (schematische Darstellung) [2]	6
Abbildung 2.4:	Durchgehend schlaff bewehrte Betondecke (schematische Darstellung) [2]	7
Abbildung 2.5:	Mobile Mischanlage (schematische Darstellung) [2]	10
Abbildung 2.6:	Zweischichtiger Betondeckeneinbau mittels Gleitschalungsfertiger (Wirtgen) [2]	12
Abbildung 2.7:	Scheinfuge mit Fugenspalt und Aufweitung [2]	14
Abbildung 2.8:	Fugenverschluss einer (Längs) Scheinfuge mittels Vergussmasse, Maße in mm [2]	15
Abbildung 2.9:	Fugenverschluss einer (Quer) Scheinfuge mittels Fugenprofil, Maße in mm [2]	15
Abbildung 2.10:	Betonrecyclinganlage (schematische Darstellung) [2]	17
Abbildung 2.11:	Bewährtes Recyclingkonzept im Betonstraßenbau [2]	19
Abbildung 2.12:	Österreichische Standardbauweise (Grafik VÖZfi) [2]	19
Abbildung 3.1:	Regelquerschnitt RQ 31, gemeinfrei von [20]	23
Abbildung 3.2:	Dicke der Betondecke und der darunterliegenden Tragschichten gemäß [11]	23
Abbildung 3.3:	Abmessungen des Straßenquerschnitts samt Fugenanordnung	24
Abbildung 3.4:	Zusammensetzung eines Kubikmeters Beton in der eingebauten Betondecke	27
Abbildung 3.5:	Verwendete Gesteinskörnungen im Fall von Variante A und Variante B	28
Abbildung 3.6:	Gewählte Transportdistanzen für die Materialtransporte	29
Abbildung 3.7:	Prozesse und Lebenswegabschnitte (Variante A)	30
Abbildung 3.8:	Prozesse und Lebenswegabschnitte (Variante B)	31
Abbildung 4.1:	Mittelwerte der erhobenen THG-Emissionen der Betonausgangsstoffe pro Tonne Ausgangsstoff	36
Abbildung 5.1:	Darstellung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen CO ₂ -Fußabdrücke und deren Abweichungen vom durchschnittlichen CO ₂ -Fußabdruck	62

Abbildung 5.2:	Variante A – Anteile der betrachteten Lebenswegabschnitte am CO ₂ -Fußabdruck.....	66
Abbildung 5.3:	Variante B – Anteile der betrachteten Lebenswegabschnitte am CO ₂ -Fußabdruck.....	67
Abbildung 5.4:	Variante A – Anteile der einzelnen Betonausgangsstoffe an den gesamten THG-Emissionen des ersten Lebenswegabschnittes	68
Abbildung 5.5:	Variante B – Anteile der einzelnen Betonausgangsstoffe an den gesamten THG-Emissionen des ersten Lebenswegabschnittes	68
Abbildung A.1:	Abmessungen des Straßenquerschnitts samt Fugenanordnung	80
Abbildung A.2:	Abmessungen einer Scheinfuge mit Stufenschnitt und Fugenverschluss mittels Vergussmasse, Maße in mm [2]	83

Anhang A

In diesem Kapitel werden die Massen der Dübel, Anker und Fugenfüllmaterialien pro m^3 Beton berechnet, welche für die Ermittlung der THG-Emissionen in Kapitel 4.6 erforderlich sind. Dazu werden die Massen dieser Baustoffe und Materialien in einem ersten Schritt für eine Straßenlänge von 100 m berechnet und anschließend auf das in diesem Straßenabschnitt eingebaute Betonvolumen bezogen. Daraus ergeben sich schließlich die Massen der Dübel, Anker und Fugenfüllmaterialien pro m^3 Beton.

Der für die Berechnung ebenfalls notwendige Straßenquerschnitt wurde bereits in Kapitel 3.2 festgelegt und ist nochmals in Abbildung A.1 dargestellt. Er weist eine Breite von 12 m und eine Betondeckendicke von 25 cm auf. Auch die Anordnung der Fugen kann aus dieser Abbildung entnommen werden. Die Querscheinfugen sind dabei in regelmäßigen Abständen von je 5 m angeordnet, während die Längsscheinfugen zwischen dem 1. und dem 2. Fahrstreifen bzw. zwischen dem 2. Fahrstreifen und dem Abstellstreifen angeordnet sind. In Summe ergeben sich somit für die betrachtete Straßenlänge von 100 m 20 Quersfugen mit einer Länge von je 12 m sowie zwei Längsfugen mit einer Länge von je 100 m.

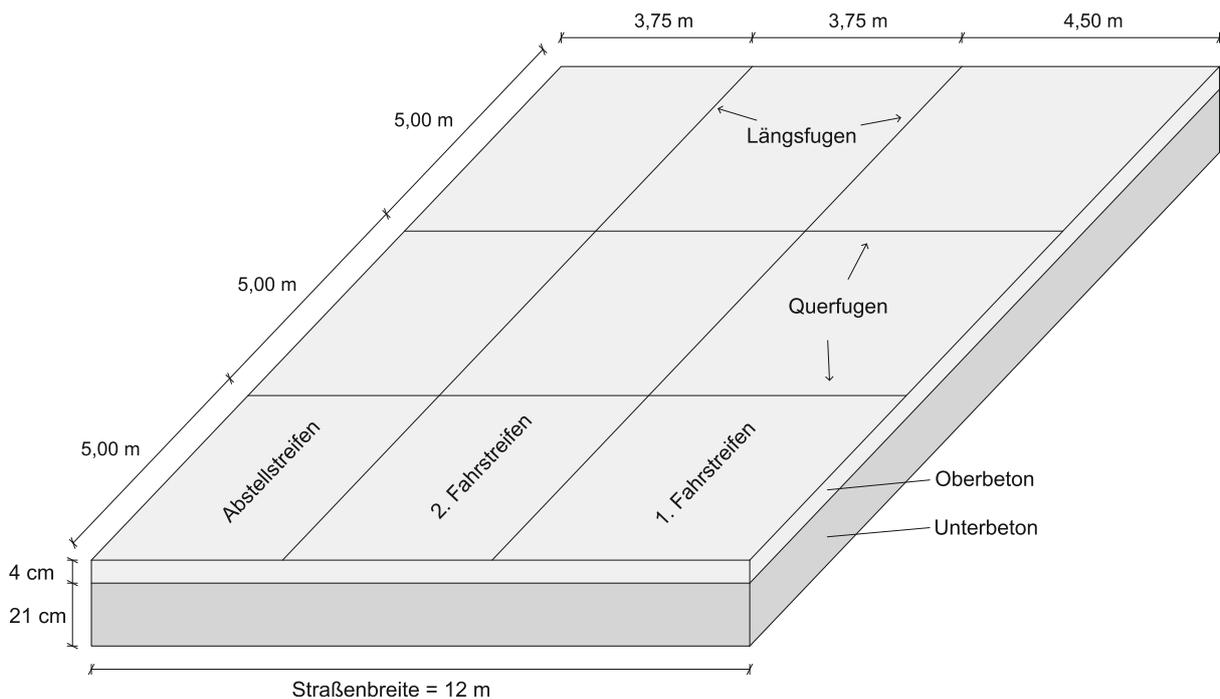


Abbildung A.1: Abmessungen des Straßenquerschnitts samt Fugenanordnung

A.1 Dübel und Anker

Um die Massen der Dübel und Anker pro m^3 Beton ermitteln zu können, wird in einem ersten Schritt auf die erforderliche Dübel- und Ankerausteilung eingegangen und daraus die Anzahl der Dübel und Anker pro 100 m Straßenlänge berechnet. Im Anschluss daran werden die Abmessungen der Dübel und Anker angeführt und deren Volumina berechnet. Zusammen mit der Dichte

lässt sich daraus schließlich die Masse pro Dübel und Anker, pro 100 m Straßenlänge bzw. pro m^3 Beton ermitteln.

Dübel- und Ankerabteilung

Gemäß RVS 08.17.02 [12] sind Querfugen bei Betondecken höherer Lastklasse mit Dübeln zu versehen und diese in Abständen von 25 cm anzuordnen. Längsfugen erfordern hingegen den Einbau von Ankern, wobei drei Anker je Feldlänge benötigt werden. Einer davon in Feldmitte und die beiden anderen Anker links und rechts vom Mittelanker im Abstand von maximal 1,5 m.

Aus diesen Vorgaben kann die Anzahl der Dübel und Anker pro 100 m Straßenlänge berechnet werden. Diese ergibt sich zu:

- Anzahl Dübel: $\frac{12 \text{ m}}{0,25 \text{ m}} = 48$ Dübel pro Querfuge $\rightarrow 48 \cdot 20 = 960$ Dübel pro 100 m
- Anzahl Anker: $3 \cdot 20 \cdot 2 = 120$ Anker pro 100 m

Bei einer Straßenbreite von 12 m sind somit 48 Dübel pro Querfuge erforderlich. Hochgerechnet auf 20 Querfugen sind dies insgesamt 960 Dübel. Die Anzahl der Anker ergibt sich hingegen zu 60 Stück pro Längsfuge und damit zu insgesamt 120 Ankern bei zwei Längsfugen.

Dübel- und Ankerabmessungen

Für die Ermittlung der Masse der Dübel und Anker werden zudem deren Volumina benötigt. Diese lassen sich aus den in der RVS 08.17.02 [12] angegebenen Dübel- und Ankerabmessungen berechnen. Für Dübel ist demnach ein (glatter) Rundstahl mit einem Durchmesser von 25 mm und einer Länge von 50 cm zu verwenden, während für Anker entweder ein glatter Rundstahl mit einem Durchmesser von 20 mm und einer Länge von 100 cm oder ein Betonstabstahl mit einem Durchmesser von 14 mm und einer Länge von 70 cm vorzusehen ist. Für die Berechnung des Ankervolumens werden in weiterer Folge die Abmessungen des Betonstabstahls herangezogen. Die Volumina der Dübel und Anker ergeben sich somit näherungsweise zu:

- Volumen Dübel: $V = r^2 \cdot \pi \cdot l = \left(\frac{0,025 \text{ m}}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot 0,5 \text{ m} = 2,45 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$ pro Dübel
- Volumen Anker: $V = r^2 \cdot \pi \cdot l = \left(\frac{0,014 \text{ m}}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot 0,7 \text{ m} = 1,08 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$ pro Anker

Massen der Dübel und Anker

Aus den berechneten Volumina werden schließlich die Massen der Dübel und Anker ermittelt. Hierfür ist zudem die Dichte erforderlich, für welche näherungsweise die Rohdichte von Betonstahl herangezogen wird. Diese beträgt gemäß der in Kapitel 4.6 verwendeten EPDs $7,85 \text{ kg} / \text{dm}^3$. Daraus ergibt sich die Masse pro Dübel bzw. pro Anker zu:

- Masse Dübel: $m = V \cdot \rho = 2,45 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1,93 \text{ kg}$ pro Dübel
- Masse Anker: $m = V \cdot \rho = 1,08 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,85 \text{ kg}$ pro Anker

Um nun die Masse aller Dübel und Anker auf dem 100 m langen Straßenabschnitt zu berechnen, wird die Masse pro Dübel noch mit der Stückzahl von 960 multipliziert und die Masse pro Anker mit der Stückzahl von 120. Daraus ergibt die Masse der Dübel und Anker pro 100 m Straßenlänge zu:

- Masse Dübel: $1,93 \text{ kg} \cdot 960 \text{ Stück} = 1849,61 \text{ kg}$ pro 100 m Straßenlänge
- Masse Anker: $0,85 \text{ kg} \cdot 120 \text{ Stück} = 101,51 \text{ kg}$ pro 100 m Straßenlänge

In einem letzten Schritt wird nun die Masse der Dübel und Anker pro 100 m Straßenlänge noch auf das Betonvolumen bezogen, welches in diesem Straßenabschnitt eingebaut wurde. Bei einer Straßenlänge von 100 m, einer Straßenbreite von 12 m und einer Betondeckendicke von 0,25 m sind dies 300 m^3 Beton. Durch Division der Massen der Dübel und Anker durch diese Betonmenge ergeben sich schließlich die in Kapitel 4.6 verwendeten Massen pro m^3 Beton zu:

- Masse Dübel: $\frac{1849,61 \text{ kg}}{300 \text{ m}^3 \text{ Beton}} = \mathbf{6,17} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \text{ Beton}}$
- Masse Anker: $\frac{101,51 \text{ kg}}{300 \text{ m}^3 \text{ Beton}} = \mathbf{0,34} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \text{ Beton}}$

A.2 Fugenfüllmaterialien

Nachdem nun die Masse der Dübel und Anker pro m^3 Beton berechnet wurde, wird in diesem Abschnitt auf die Masse der Fugenfüllmaterialien pro m^3 Beton eingegangen. Dazu wird in einem ersten Schritt das Volumen der zu verfüllenden Fugen ermittelt und über die Dichte wiederum die Masse der Fugenfüllmaterialien pro 100 m Straßenlänge bzw. pro m^3 Beton berechnet. Wie in Kapitel 4.6 beschrieben, wird dabei angenommen, dass sowohl die Längs- als auch die Quertugen mittels Bitumenvergussmasse verschlossen werden, da lediglich für Bitumen THG-Emissionen erhoben werden konnten.

Zu verfüllendes Fugenvolumen

Um das zu verfüllende Fugenvolumen berechnen zu können, werden sowohl die Abmessungen der Fugenkammer als auch die Fugenlängen aller Quer- und Längsfugen des betrachteten Straßenabschnitts benötigt.

Die Abmessungen der Fugenkammer wurden bereits in Kapitel 2.3 genannt und sind zudem nochmals in Abbildung A.2 dargestellt. Für die weitere Berechnung wird vereinfacht eine zu verfüllende Fugenkammertiefe von 30 mm und eine Fugenkammerbreite von 8 mm angenommen. Weiters ergibt sich die Gesamtlänge der Quertugen bzw. die Gesamtlänge der Längsfugen, welche ebenfalls für die Ermittlung des Fugenvolumens benötigt wird, zu:

- Gesamtlänge Quertugen: $L = 20 \cdot 12 \text{ m} = 240 \text{ m}$
- Gesamtlänge Längsfugen: $L = 2 \cdot 100 \text{ m} = 200 \text{ m}$

Daraus kann schließlich das zu verfüllende Fugenvolumen pro 100 m Straßenlänge berechnet werden. Dieses ergibt sich zu:

- Fugenvolumen Quertugen: $V = 0,03 \text{ m} \cdot 0,008 \text{ m} \cdot 240 \text{ m} = 0,058 \text{ m}^3$
- Fugenvolumen Längsfugen: $V = 0,03 \text{ m} \cdot 0,008 \text{ m} \cdot 200 \text{ m} = 0,048 \text{ m}^3$

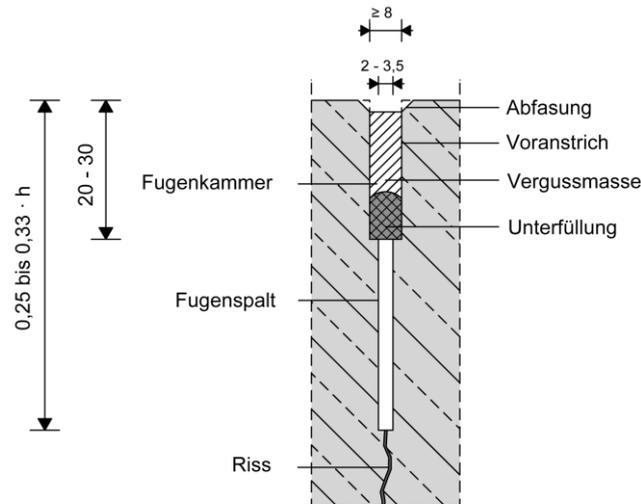


Abbildung A.2: Abmessungen einer Scheinfuge mit Stufenschnitt und Fugenverschluss mittels Vergussmasse, Maße in mm [2]

Masse der Fugenfüllmaterialien

Aus den berechneten Fugenvolumina kann schließlich die Masse der Fugenfüllmaterialien pro 100 m Straßenlänge ermittelt werden. Hierfür wird wiederum die Dichte benötigt, für welche näherungsweise die Dichte von Bitumen herangezogen wird. Diese beträgt $1,01 \div 1,07 \text{ kg} / \text{dm}^3$ [33]. Die Masse der Fugenfüllmaterialien pro 100 m Straßenlänge ergibt sich daraus zu:

- Masse Fugenfüllmaterialien Querfugen: $m = V \cdot \rho = 0,058 \text{ m}^3 \cdot 1050 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 60,48 \text{ kg pro 100 m Straßenlänge}$
- Masse Fugenfüllmaterialien Längsfugen: $m = V \cdot \rho = 0,048 \text{ m}^3 \cdot 1050 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 50,40 \text{ kg pro 100 m Straßenlänge}$

Die berechneten Massen pro 100 m Straßenlänge werden in einem letzten Schritt noch auf das Betonvolumen bezogen, welches in diesem Straßenabschnitt eingebaut wurde. Wie bereits in Kapitel A.1 angeführt, handelt es sich dabei um 300 m^3 Beton. Durch Division der Massen der Fugenfüllmaterialien durch das Betonvolumen von 300 m^3 ergeben sich schließlich die in Kapitel 4.6 herangezogenen Massen pro m^3 Beton zu:

- Masse Fugenfüllmaterialien Querfugen: $\frac{60,48 \text{ kg}}{300 \text{ m}^3 \text{ Beton}} = 0,20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \text{ Beton}}$
- Masse Fugenfüllmaterialien Längsfugen: $\frac{50,40 \text{ kg}}{300 \text{ m}^3 \text{ Beton}} = 0,17 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \text{ Beton}}$