

Reduktion des Treibhauspotentials und Ressourcenverbrauchs von Hochbauprojekten durch den Einsatz von CO₂-effizienten und R-Betonen in Bayern

Verfügbarkeit, Einsparpotential, Auswirkungen auf Bauablauf und -kosten

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades

M.Sc.

an der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München.

Betreut von Prof. Dr.-Ing. Werner Lang, M.Sc. Leander Präger
Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen
Dr.-Ing. Jutta Gehrman (Ed. Züblin AG – Direktion Bayern)

Eingereicht von Chiara Diana Hauschulz
Wilderich-Lang-Str. 13
80634 München
+4915253855508

Eingereicht am München, den 08.02.2024

Vereinbarung

zwischen

der Technischen Universität München, vertreten durch ihren Präsidenten,
Arcisstraße 21, 80290 München

hier handelnd der Lehrstuhl für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen
(Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Lang), Arcisstr. 21, 80333 München

– nachfolgend TUM –

und

Frau Chiara Diana Hauschulz.....

(Wilderich-Lang-Str. 13, 80634 München)

– nachfolgend Autorin/Autor –

Die Autorin / der Autor wünscht, dass die von ihr/ihm an der TUM erstellte Masterarbeit mit dem Titel Reduktion des Treibhauspotentials und Ressourcenverbrauchs von Hochbauprojekten durch den Einsatz von CO₂ effizienten und R-Betonen in Bayern

auf mediaTUM und der Webseite des Lehrstuhls für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen mit dem Namen der Verfasserin / des Verfassers, dem Titel der Arbeit, den Betreuer:innen und dem Erscheinungsjahr genannt werden darf.

in Bibliotheken der TUM, einschließlich mediaTUM und die Präsenzbibliothek des Lehrstuhls für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen, Studierenden und Besucher:innen zugänglich gemacht und veröffentlicht werden darf. Dies schließt auch Inhalte von Abschlusspräsentationen ein.

mit einem Sperrvermerk versehen und nicht an Dritte weitergegeben wird.

(Zutreffendes bitte ankreuzen)

Zu diesem Zweck überträgt die Autorin / der Autor der TUM zeitlich und örtlich unbeschränkt das nichtausschließliche Nutzungs- und Veröffentlichungsrecht an der Masterarbeit.

Die Autorin / der Autor versichert, dass sie/er alleinige(r) Inhaber(in) aller Rechte an der Masterarbeit ist und der weltweiten Veröffentlichung keine Rechte Dritter entgegenstehen, bspw. an Abbildungen, beschränkende Absprachen mit Verlagen, Arbeitgebern oder Unterstützern der Masterarbeit. Die Autorin / der Autor stellt die TUM und deren Beschäftigte insofern von Ansprüchen und Forderungen Dritter sowie den damit verbundenen Kosten frei.

Eine elektronische Fassung der Masterarbeit als pdf-Datei hat die Autorin / der Autor dieser Vereinbarung beigelegt. Die TUM ist berechtigt, ggf. notwendig werdende Konvertierungen der Datei in andere Formate vorzunehmen.

Vergütungen werden nicht gewährt.

Eine Verpflichtung der TUM zur Veröffentlichung für eine bestimmte Dauer besteht nicht.

Die Autorin / der Autor hat jederzeit das Recht, die mit dieser Vereinbarung eingeräumten Rechte schriftlich zu widerrufen. Die TUM wird die Veröffentlichung nach dem Widerruf in einer angemessenen Frist und auf etwaige Kosten der Autorin / des Autors rückgängig machen, soweit rechtlich und tatsächlich möglich und zumutbar.

Die TUM haftet nur für vorsätzlich oder grob fahrlässig verursachte Schäden. Im Falle grober Fahrlässigkeit ist die Haftung auf den vorhersehbaren Schaden begrenzt; für mittelbare Schäden, Folgeschäden sowie unbefugte nachträgliche Veränderungen der veröffentlichten Masterarbeit ist die Haftung bei grober Fahrlässigkeit ausgeschlossen.

Die vorstehenden Haftungsbeschränkungen gelten nicht für Verletzungen des Lebens, des Körpers oder der Gesundheit.

Meinungsverschiedenheiten im Zusammenhang mit dieser Vereinbarung bemühen sich die TUM und die Autorin / der Autor einvernehmlich zu klären. Auf diese Vereinbarung findet deutsches Recht unter Ausschluss kollisionsrechtlicher Regelungen Anwendung. Ausschließlicher Gerichtsstand ist München.

München, den

München, den 08.02.24

.....

..... C. Hausel

(TUM)

(Autor:in)

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die von mir eingereichte Abschlussarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

München, 08.02.24, C. Hausz

Ort, Datum, Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Vereinbarung	I
Erklärung	III
Inhaltsverzeichnis	1
Kurzfassung.....	5
Abstract	7
Abkürzungsverzeichnis	9
Glossar	13
1. Einleitung.....	17
2. Methodik.....	19
2.1. Grenzen der Masterarbeit.....	19
2.2. Ermittlung der Verfügbarkeit	21
2.2.1. Identifikation von Herstellern ökologisch-nachhaltigen Betons und entsprechender Produkte.....	21
2.2.2. Aufbau des Fragebogens zu umweltrelevanten Daten und alternativen Sorten von Transportbeton und Durchführung der Umfrage	23
2.3. Variantenvergleich am Beispiel des Tragwerks des DonauTowers.....	26
2.4. Vergleich der Treibhauspotentiale und des Betoneinsatzes beim Rohbau verschiedener Hochbauprojekte.....	31
3. Theoretische Grundlagen	33
3.1. THG-Emissionen, Ressourcenverbrauch und Vorteile des Baustoffs Beton	33
3.2. Daten zur Umweltwirkung von Transportbeton	38
3.2.1. Verfügbarkeit von verifizierten Umweltproduktdeklarationen für Transportbeton	38
3.2.2. Zertifizierungssystem und Branchenreferenzwerte des Concrete Sustainability Council.....	40
3.2.3. Zulässige THG-Emissionen eines Tragwerks gemäß Entwurf der DAfStb- Richtlinie „Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton“	43
3.3. Maßnahmen zur Reduktion des Treibhauspotentials bzw. Ressourcenverbrauchs bei der Herstellung von Beton und normative Situation	44
3.3.1. Einordnung von CO ₂ -effizientem und R-Beton in die normative Situation 45	
3.3.2. Maßnahmen während der Zementproduktion	46
3.3.3. Senken des Zementgehalts	47
3.3.4. Einsatz klinkereffizienter Zemente	47
3.3.5. Einsatz alternativer Bindemittel.....	50

3.3.6.	Verlängerung des Nachweisalters von Beton.....	50
3.3.7.	Ersatz von primärer Gesteinskörnung durch rezykliertes Material.....	50
4.	Einfluss der Ed. Züblin AG – Direktion Bayern als ausführende Firma.....	55
5.	Verfügbarkeit von CO ₂ -effizientem und R-Beton in Bayern	59
5.1.	Auswertung, Optimierung und Empfehlung zur zukünftigen Nutzung des Fragebogens	59
5.1.1.	Auswertung des Fragebogens zu umweltrelevanten Daten und alternativen Sorten von Transportbeton	59
5.1.2.	Optimierung des Fragebogens zu umweltrelevanten Daten und alternativen Sorten von Transportbeton	63
5.1.3.	Empfehlung der projektspezifischen Ermittlung der Verfügbarkeit.....	64
5.2.	Verfügbarkeit von CO ₂ -effizientem Beton.....	66
5.2.1.	Hersteller, Produkte, Anwendungsbereiche und Betoneigenschaften ...	66
5.2.2.	Treibhausgas-Einsparpotentiale	71
5.3.	Verfügbarkeit von R-Beton.....	74
5.3.1.	Hersteller, Produkte, Anwendungsbereiche und Betoneigenschaften ...	74
5.3.2.	Gegenüberstellung der Treibhauspotentiale und des Ressourceneinsparpotentials von R-Beton	77
5.4.	Preise für CO ₂ -effizienten und R-Beton.....	81
5.4.1.	Nettopreise für ökologisch-nachhaltigen Transportbeton im Vergleich zu Standardbeton und Einsparpotentialen	82
5.4.2.	Aufpreise für CO ₂ -effizienten Beton im Vergleich zu Klimakosten und CO ₂ -Zertifikaten	84
6.	Beispielprojekt: Substitution des konventionellen Betons im Tragwerk des DonauTowers	89
6.1.	Grundlegende Daten des DonauTowers	89
6.1.1.	Auswahl und Beschreibung des Projekts „DonauTower“	89
6.1.2.	Treibhauspotential der projektspezifischen Betonsorten	90
6.1.3.	Ausgeführter Zustand bis einschließlich 13.12.23	92
6.2.	Variantenvergleich hinsichtlich Treibhauspotential und Ressourcenverbrauch des Tragwerks.....	93
6.2.1.	Treibhausgas-Einsparpotential	93
6.2.2.	Ressourceneinsparpotential.....	96
6.2.3.	Vergleich der Ressourceneinsparung und des Treibhauspotentials	98
6.2.4.	Gegenüberstellung des THG-Einsparpotentials und THG-Emissionen des Baustellenverkehrs.....	99
7.	Auswirkungen des CO ₂ -effizienten Betons auf Bauablauf und Bauzeit.....	101
7.1.	Kalkulation, Ausschreibung und Vergabe.....	101
7.2.	Erweitertes Sortenverzeichnis, Vorbereiten der Betonage und Verarbeitbarkeit des Frischbetons	103

7.3.	Auswirkungen der langsamen Festigkeitsentwicklung	105
7.3.1.	Abweichendes Prüfalter	106
7.3.2.	Verlängerte Ausrüst- und Ausschallfristen	108
7.3.3.	Besonderheiten bei der Nachbehandlung	110
7.3.4.	Maßnahmen zur Vermeidung von Mehraufwand und Bauzeitverlängerungen aufgrund langsam erhärtenden Betons.....	113
7.4.	Eignung für Bauteile mit besonderen Anforderungen.....	115
8.	Auswirkungen des CO ₂ -effizienten Betons auf die Baukosten	117
8.1.	Direkte Mehrkosten für den Transportbeton.....	117
8.2.	Indirekte Mehrkosten für Lohn und Material	118
9.	Diskussion der Ergebnisse	121
9.1.	Wechselwirkungen	121
9.1.1.	Reduktion des Treibhauspotentials und Ressourcenschonung.....	121
9.1.2.	Reduktion des Treibhauspotentials und Dauerhaftigkeit	124
9.2.	Entwicklung der Verfügbarkeit von Zementklinkerersatzstoffen und daraus resultierende Auswirkungen auf die Bauausführung.....	125
9.2.1.	Zukünftige Verfügbarkeit von Ersatzstoffen für Zementklinker	125
9.2.2.	Auswirkungen auf die Bauausführung und fehlende Baustellenerfahrungen.....	126
9.3.	Übertragung der Ergebnisse auf die Gebäudeebene	128
9.4.	Anreize zum Einsatz von CO ₂ -effizientem und R-Beton.....	129
9.4.1.	Gebäudezertifizierung z.B. durch die DGNB.....	129
9.4.2.	Grenzwerte für THG-Emissionen des Tragwerks.....	131
10.	Fazit und Ausblick	135
	Literaturverzeichnis.....	139
	Abbildungsverzeichnis	145
	Tabellenverzeichnis	147
	Anhang.....	151

Kurzfassung

Das Ziel dieser Masterarbeit ist es, den Einsatz von CO₂-effizientem und R-Beton in zukünftigen Hochbauprojekten der Ed. Züblin AG zu fördern. Die zugrundeliegenden Fragestellungen sind, wie groß die Einsparpotentiale von in Bayern erhältlichen CO₂-effizienten und R-Betonen für den Hochbau auf Produkt- und Tragwerksebene sind und welche Besonderheiten sich im Vergleich zu konventionellem Beton für die Bauausführung ergeben. Zur Beantwortung werden umfassende Literatur- und Internetrecherchen, eine an Transportbetonhersteller adressierte Umfrage und ein Variantenvergleich hinsichtlich Ressourcenverbrauch und Treibhauspotential des Betons bzw. Tragwerks des DonauTowers durchgeführt. Eine Methode zur Ermittlung der aktuellen, regionalen Verfügbarkeit wird erarbeitet. Die Auswirkungen des CO₂-effizienten Betons auf die Ausführung des DonauTowers werden anhand projektspezifischer Unterlagen und einem Interview mit der Bauleitung erarbeitet, um normative und baupraktische Besonderheiten gemeinsam darzustellen.

Derzeit bieten über 40 Hersteller CO₂-effizienten und R-Beton aus mehr als 160 Werken in Bayern an. Die Produkte bieten relevante THG-Einsparpotentiale (meist CO₂-Klasse Level 1 und 2) bzw. Ressourceneinsparpotentiale (meist 20 bis 25 Volumen-Prozent der Gesteinskörnung). Der Einsatz von R-Beton und der zulässige Anteil der rezyklierten Gesteinskörnung werden durch die Umweltbedingungen begrenzt. Beispielweise könnten ca. 20 Volumen-Prozent der primären Gesteinskörnung im Tragwerk des DonauTowers durch Sekundärmaterial ersetzt werden. Auf Tragwerksebene ermöglichen die verfügbaren CO₂-effizienten Transportbetone eine Reduktion des Treibhauspotentials um ein Drittel. Dadurch kann das GWP des gesamten Gebäudes und seiner Nutzung um ca. 9 Prozent verringert werden. Die Preise für die ökologisch-nachhaltigen Betone liegen 2 bis 20 Prozent über denen für äquivalenten konventionellen Transportbeton. Der größere Anteil der Mehrkosten resultiert jedoch aus den Auswirkungen auf den Bauablauf. Eine langsamere Festigkeitsentwicklung ist typisch für CO₂-effizienten Beton und verursacht die Verlängerung der Nachbehandlungsdauer, Ausschal- und Ausrüstfristen. Bei R-Beton ist mit weniger robusten Frischbetoneigenschaften und einer intensiveren Nachbehandlung zu rechnen. Deswegen sollten die Betonzusammensetzung und der Bauablauf gemeinsam optimiert werden. Dabei müssen auch mögliche Wechselwirkungen zwischen der Reduktion des Treibhauspo-

tentials und der Ressourcenschonung berücksichtigt werden. Die Dauerhaftigkeit als entscheidender Vorteil des Baustoffs darf nicht gefährdet werden.

Aufgrund der ständigen Weiterentwicklung des Angebots der Transportbetonhersteller, der variierenden Verfügbarkeit von rezyklierter Gesteinskörnung und der zu erwartenden Veränderung des Markts von Zementklinkerersatzstoffen wird empfohlen, die regionale, aktuelle Verfügbarkeit projektspezifisch zu ermitteln. Dazu sind der im Rahmen dieser Arbeit erstellte Fragebogen und die Nutzung der Einkaufsplattform der STRABAG SE gut geeignet.

Die Treibhausgas-Minderungsklassen des Entwurfs der DAfStb-Richtlinie „Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton“ dienen als Anreiz zur THG-Emissionsminderung. Kurzfristig können diese allein durch die Verwendung der in Bayern verfügbaren CO₂-effizienten Transportbetone eingehalten werden. Um die Umweltwirkung des Betonbaus zu verringern, müssen die hier betrachteten Maßnahmen mit weiteren kombiniert werden. Einige liegen zumeist außerhalb des Einflussbereichs einer bauausführenden Firma wie der Ed. Züblin AG. Dazu gehören beispielweise Tragwerksoptimierungen hinsichtlich des Materialeinsatzes und CCUS-Verfahren in der Zementherstellung.

Abstract

This master thesis aims at promoting the use of reduced carbon and recycled concrete in future building construction projects of the Ed. Züblin AG. The first underlying question is how great the savings of reduced carbon and recycled concretes available in Bavaria, are at the product and structural level. The second one is to identify special features of these products in comparison to conventional concrete that need to be handled during the construction work. Comprehensive internet and literature research as well as a survey addressed to manufacturers of ready-mix concrete and a comparison of variants regarding the GWP and resource consumption of the structure of the DonauTower are conducted to answer these questions. An approach to determine recent regional availability is developed. The effects of reduced carbon concrete on the execution of the DonauTower are determined by analyzing project-specific documents and an interview with the construction management. Thereby, specialties of the normative situation and construction features are presented together.

In Bavaria over 40 manufacturers currently offer reduced carbon and recycled concrete from more than 160 plants. The available products have relevant potentials for saving GHG (mostly CO₂ classes level 1 and level 2) or resources (mostly 20 to 25 percent by volume of the aggregate). Environmental conditions limit the use of recycled concrete and the proportion of recycled aggregate. For example, in the structure of the DonauTower 20 percent by volume of the primary aggregate could be replaced by secondary material. At the structural level available reduced carbon ready-mixed concretes allow a reduction of the GWP by a third. Looking at the entire building and its use the reduction accounts for around 9 percent. The prices for reduced carbon or recycled concretes are 2 to 20 percent higher than those for equivalent conventional ready-mix concrete. The greater proportion of additional costs results from the effects that those concretes have on the construction process. Typically, reduced carbon concrete develops its strength slower and causes an increase in curing time and time it needs to be supported by framework. With recycled concrete, less robust fresh concrete properties and intensive curing are to be expected. Therefore, the composition of concrete and the construction process should be optimized together. Interactions between the reduction of GWP and the conservation of resources are possible and need to be considered. As it is a decisive advantage of the building material, the durability must not be compromised by the optimization measures.

It is recommended that the regional, current availability is determined for every specific project due to constant developments of the ready-mixed concrete manufacturers, the varying availability of secondary aggregates and the expected change in the market of cement clinker substitutes. The questionnaire created for this thesis and the use of the purchasing platform of the STRABAG SE are well suited for this purpose.

The draft DAfStb guideline “Greenhouse gas-reduced load-bearing structures made of concrete, reinforced concrete or prestressed concrete” provides GHG reduction classes that serve as an incentive to reduce emissions. These can be met by simply using the available reduced carbon ready-mix concretes in the short term. The measures considered in this thesis must be combined with others to reduce the environmental impact of concrete construction. Some are usually beyond the control of a construction company such as Ed. Züblin AG. These include, for example, optimizing the load-bearing structure regarding material use and CCUS processes in cement production.

Abkürzungsverzeichnis

abZ	allgemeine bauaufsichtliche Zulassung
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BBQ	Betonbauqualität
BGF	Brutto-Grundfläche
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMI	Bundesministerium des Innern
BRI	Brutto-Rauminhalt
BTB	Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie
BREEAM	Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Utilization
CCUS	Carbon Capture Use and Storage
CO ₂ -Äq.	CO ₂ -Äquivalent
CO ₂ e	CO ₂ -Äquivalent
CSC	Concrete Sustainability Council
DAfStb	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton
DAfStb-RiLi	Richtlinie des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton
DBV	Deutscher Beton- und Bautechnik Verein e.V.
DIN	Deutsches Institut für Normung

SPEC	englisch: specification, deutsch: Vorschrift
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
EC	Eurocode
EN	Europäische Norm
EPD	Environmental Product Declaration, deutsch: Umweltproduktdeklaration
EU-ETS	European Union Emissions Trading System
GK	Gesteinskörnung
GOK	Geländeoberkante
ISO	International Organization for Standardization
k.A.	keine Angabe
LKW	Lastkraftwagen
LV	Leistungsverzeichnis
Nr.	Nummer
OBD	ÖKOBAUDAT
OBD 2023-I	ÖKOBAUDAT (Version 2023-I vom 15.06.2023)
QNG	Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude
R-Beton	Ressourcenschonender Beton
RC	Recycling
RC-Beton	Recycling-Beton
SPS-Portal	STRABAG Portal for Suppliers
THG	Treibhausgas

UBA	Umweltbundesamt
VDZ	Verein Deutscher Zementwerke e.V.
ZiE	Zustimmung im Einzelfall
ZTV-ING	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten

Glossar

Beton: „Baustoff, der durch Mischen von Zement, grober und feiner Gesteinskörnung und Wasser, [...], hergestellt wird und seine Eigenschaften durch Hydratation des Zements erhält“ (DIN 1045-2:2023-08 3.1.1.1). Im Folgenden ist mit dem Begriff Transportbeton gemeint. Betonwaren und Betonfertigteile liegen außerhalb der Grenzen dieser Masterarbeit.

Betonsorte: Eine Betonsorte ist Beton mit einer bestimmten Zusammensetzung. Sie wird zum Beispiel durch das Größtkorn der Zuschläge oder die verwendete Zementart und -menge definiert.

Bluten: ist eine „nachteilige Veränderung des Frischbetons“ (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2011), bei der Frischbeton Wasser absondert, das sich auf dessen Oberfläche sammelt.

CO₂-effizienter Beton: wird im Bewertungssystem des CSC als **CO₂-optimierter Beton** wie folgt definiert: „Betone, die durch gezielte Maßnahmen zur Begrenzung der Treibhausgasemissionen optimiert sind.“ (Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2021, S. 4). In dieser Arbeit werden die Begriffe CO₂-effizienter und **CO₂-reduzierter Beton** synonym verwendet. Diese haben sich in Fachkreisen (z.B. VDZ, DBV: CO₂-effizient, DAfStb: CO₂-reduziert) bzw. bei Transportbetonherstellern (CO₂-reduziert) etabliert. Weitere Treibhausgase neben Kohlenstoffdioxid sind mitgemeint.

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb): „ist ein national und international anerkanntes und angesehenes Fachgremium zur Förderung des Betonbaus, u.a. durch die Unterstützung von Forschungsaktivitäten und die Erstellung von Richtlinien“ (Glock, et al., 2023).

Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V. (DBV): „ist ein technisch-wissenschaftlicher Verein der Bauwirtschaft, der sich mit dem Betonbau, der Bautechnik und deren Weiterentwicklung beschäftigt“ (Glock, et al., 2023).

Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen – DGNB e.V.: Die DGNB ist einer der größten Vereine Deutschlands, der sich für eine klimafreundliche und nachhaltige Gestaltung der gebauten Umwelt einsetzt (Glock, et al., 2023).

Klimaneutralität: beschreibt einen Zustand, bei dem das menschliche Handeln keine Nettoauswirkung auf das Klimasystem hat. Der Unterbegriff **Treibhausgasneutralität** bedeutet, dass ein Gleichgewicht zwischen der Emission und Aufnahme von Treibhausgasen herrscht.

ÖKOBAUDAT: ist eine Plattform, die durch das Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) als Informationsportal für nachhaltiges Bauen zur Verfügung gestellt wird. Sie beinhaltet eine Online-Datenbank mit Ökobilanzdaten z.B. zu Baumaterialien aus verifizierten Umwelterklärungen. (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen).

Ökologisch-nachhaltiger Beton: bezeichnet in dieser Arbeit Betonsorten, die hinsichtlich ihrer Umweltwirkung (Ressourcenverbrauch, Treibhauspotential) verbessert sind und wird als Überbegriff für CO₂-effizienten Beton, R-Beton und Mischformen wie Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung und klinkereffizienten Zementen genutzt.

Primäre Gesteinskörnung: „Gesteinskörnung, die aus der Natur gewonnen wird, wie naturrunder Kies aus Flüssen und Baggerseen oder gebrochener Splitt aus Steinbrüchen. Im Unterschied dazu wird rezyklierte Gesteinskörnung auch Sekundärmaterial genannt.“ (Biscopig, Bosold, & Brunner, 2021).

R-Beton: „Abkürzung für Recycling-Beton, also Beton mit Anteilen von rezyklierter Gesteinskörnung. Das „R“ wird auf für den Begriff „Ressourcenschonend“ benutzt, da Primärmaterial eingespart werden kann.“ (Biscopig, Bosold, & Brunner, 2021). Die Nutzung des Begriffs ist nicht an einen Mindestanteil rezyklierter Gesteinskörnung gekoppelt.

Ressourceneinsparpotential: beschreibt in dieser Masterarbeit das Vermögen eines R-Betons im Vergleich zu einer (oder durch seinen Einsatz anstelle einer) konventionellen Betonsorte mit äquivalenten Festbetoneigenschaften weniger primäre Rohstoffe, insbesondere Gesteinskörnung, zu verbrauchen.

Rezyklierte Gesteinskörnung: „Gesteinskörnung, die durch Aufbereitung von vorher beim Bauen verwendeten anorganischen Stoffen gewonnen wird.“ (DIN EN 206:2021-06 3.1.2.16).

Sekundärmaterial: „Werkstoff, der aus einer früheren Nutzung oder aus Abfall rückgewonnen wird und einen Primärstoff ersetzt“ (DIN EN 15978:2012-10).

Standardbeton: bezeichnet in dieser Arbeit Transportbeton, der weder hinsichtlich des Ressourcenverbrauchs noch des Treibhauspotentials verbessert wurde. Der Begriff wird synonym zu „herkömmlichen“ oder „konventionellem“ Beton verwendet.

Transportbeton: „Beton, der in frischem Zustand durch eine Person oder Stelle geliefert wird, die nicht der Verwender ist“, auch „vom Verwender außerhalb der Baustelle hergestellter Beton“ (DIN 1045-2:2023-08 3.1.1.13).

Treibhausgas-Einsparpotential: beschreibt in dieser Masterarbeit das Vermögen eines (CO₂-effizienten) Transportbetons im Vergleich zu einer (oder durch seinen Einsatz anstelle einer) konventionellen Betonsorte mit äquivalenten Festbetoneigenschaften weniger THG-Emissionen zu verursachen.

Treibhausgas-Minderungsklasse: „Klassifizierung von Treibhausgas-Reduktionszeilen in Abhängigkeit vom Kalenderjahr“ (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb), 2023).

Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ): ist eine „technisch-wissenschaftliche und wirtschaftspolitische Vereinigung der deutschen Zementindustrie“ (Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ)).

1. Einleitung

Der Bausektor hat einen erheblichen Anteil am Ressourcenaufwand in Deutschland. Während ca. 90 Prozent der mineralischen Rohstoffe in der Herstellung von Baustoffen eingesetzt werden, stammen mehr als die Hälfte des Abfallaufkommens in Deutschland aus dem Bausektor (BMUB, 2020). Dies verdeutlicht nicht nur die Notwendigkeit von Veränderungen, sondern auch den großen Einfluss des Sektors. In Anbetracht des begrenzten Rohstoffaufkommens und Deponieraums (DAfStb, 2021) sowie des Klimawandels und seiner Auswirkungen, beschäftigen sich Unternehmen der Baubranche zunehmend mit dem Thema Nachhaltigkeit.

Das Ziel der STRABAG SE ist klar formuliert: „Wir werden klimaneutral bis 2040“ (STRABAG SE, 2023b). Dabei stehen Dekarbonisierung und Kreislaufwirtschaft im Fokus. Das Unternehmen möchte Verantwortung übernehmen und sich von anderen Bautechnologiekonzernen abheben (STRABAG SE, 2023d).

Allein die direkten Emissionen der Zementindustrie hatten 2018 einen Anteil von fünf Prozent an den Gesamtemissionen aller im Emissionshandel erfassten Anlagen (Umweltbundesamt, 2020). Da Zement einer der Hauptbestandteile von Beton ist, ist die nachhaltige Gestaltung des Betonbaus von besonderer Bedeutung.

Beton gehört mengenmäßig zu den fünf größten Materialströmen der STRABAG SE, die zur Herstellung ihrer Produkte und Bereitstellung der Dienstleistungen verwendet werden. Im Jahr 2022 produzierte und / oder verbaute der Konzern 5,15 Millionen Kubikmeter Beton (STRABAG SE, 2023a). Das Treibhauspotential von Transportbeton ist abhängig von der Festigkeitsklasse. Nimmt man den Orientierungswert (A1-A3) des häufig eingesetzten C30/37 von 219 Kilogramm CO₂-Äquivalenten je Kubikmeter an (DAfStb, 2021), so ergeben sich durch die Betonherstellung schätzungsweise Treibhausgasemissionen von 1,13 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten für das Jahr 2022. Gemäß der Empfehlung des Umweltbundesamts (Wilke, 2023) ergeben sich daraus Klimakosten von ca. 268 Millionen Euro.

Da Beton sowohl in großen Mengen verbaut wird als auch besonders ressourcen- und emissionsintensiv ist, ist die nachhaltige Gestaltung des Betonbaus ein wichtiger Schritt auf dem Weg zur Klimaneutralität der STRABAG SE.

Zur Verringerung des Treibhauspotentials im Betonbau gilt es neben angepassten Rezepturen, die weniger Zement, emissionsärmere Zementsorten oder alternative Bindemittel verwenden, auch die Transportwege möglichst gering zu halten (DAfStb, 2021). Durch Verfahren zur CO₂-Abscheidung können in der Herstellung von Zement direkte Emissionen vermieden werden (Umweltbundesamt, 2020). Außerdem reduzieren eine geschickte Wahl des Tragsystems und Bauteiloptimierungen den Materialeinsatz und somit nicht nur das Treibhauspotential, sondern auch den Ressourcenverbrauch (DAfStb, 2021).

In der Rolle als Ausführende kann die Ed. Züblin AG als Teil der STRABAG AG durch gezielte Nachfrage indirekt Betonrezepturen und direkt die Transportentfernung vom Werk zum Einbauort beeinflussen. Auch der Einsatz von Sekundärbaustoffen ist Teil der Nachhaltigkeitsstrategie des Konzerns (STRABAG SE, 2023d). Dabei ist R-Beton ein Schlüssel zum kreisgerechten Bauen und zur Ressourcenschonung (STRABAG SE, 2023c). Bis zu 45 Prozent der groben natürlichen Gesteinskörnung dürfen normativ bereits durch rezyklierte Gesteinskörnung ersetzt werden (BMI, 2019).

Im Rahmen der Masterarbeit werden nicht nur der Einfluss einer bauausführenden Firma und verschiedene Technologien zur Reduktion des Treibhauspotentials und Ressourcenverbrauchs von Beton dargestellt, sondern auch Lieferanten identifiziert und die aktuelle Verfügbarkeit in Bayern abgebildet. Neben dem Ressourcen- und Treibhausgas-Einsparpotential auf Produkt- und Tragwerksebene werden auch Transportwege, Auswirkungen auf den Bauablauf, die Bauzeit und -kosten allgemein und am Beispiel des DonauTowers untersucht. Schließlich wird eine Methode zur projektspezifischen Ermittlung der Verfügbarkeit empfohlen, Wechselwirkungen dargestellt und die Ergebnisse in den Kontext des gesamten Gebäudes eingeordnet.

Die zugrundeliegenden Fragestellungen sind, wie groß die Einsparpotentiale von in Bayern verfügbaren CO₂-effizienten und R-Betonen auf Produkt- und Tragwerksebene sind und welche Besonderheiten sich im Vergleich zu konventionellem Beton für die Bauausführung ergeben.

Das Ziel der Masterarbeit in Kooperation mit der Ed. Züblin AG ist es, die Treibhausgas- bzw. Ressourceneinsparpotentiale von in Bayern verfügbaren CO₂-effizienten und R-Betonen gemeinsam mit den bei der Bauausführung zu beachtenden Besonderheiten zu untersuchen und darzustellen. Die Ergebnisse sollen den Einsatz von CO₂-effizientem und R-Beton in zukünftigen Hochbauprojekten fördern.

2. Methodik

Die Fragestellungen dieser Arbeit werden mithilfe umfassender Literatur- und Internetrecherchen (siehe Kapitel 2.2.1), einer an Transportbetonhersteller adressierten Umfrage (siehe Kapitel 2.2.2) und einem Variantenvergleich hinsichtlich Treibhauspotential und Ressourcenverbrauch der Gesteinskörnung des Betons bzw. Tragwerks des DonauTowers (siehe Kapitel 2.3) beantwortet. Nach der Auswertung und Durchführung der Umfrage wird eine Methode zur Ermittlung der Verfügbarkeit von CO₂-effizientem und R-Beton erarbeitet. Anhand eines Vergleichs der Treibhauspotentiale und des Betoneinsatzes beim Rohbau verschiedener Hochbauprojekte der Ed. Züblin AG wird ihr Einfluss als bauausführende Firma betrachtet (siehe Kapitel 2.4). Die Erfahrungen der bisherigen Ausführung des DonauTowers werden anhand projektspezifischer Unterlagen - wie Takt- und Terminplänen, Betoniertagebuch oder der Arbeitskalkulation - und einem Interview mit der Bauleitung zusammengetragen. Anschließend werden sie mit den Ergebnissen der Literaturrecherche abgeglichen, um normative und baupraktische Besonderheiten gemeinsam darzustellen.

2.1. Grenzen der Masterarbeit

Diese Arbeit entsteht in Kooperation mit der Ed. Züblin AG. Deswegen liegt der Fokus auf dem Einflussbereich eines bauausführenden Unternehmens. Betrachtet wird die Substitution von herkömmlichem Beton innerhalb des normativ vorgegebenen Rahmens.

Um nachhaltig mit Beton zu bauen, müssen Maßnahmen ergriffen werden, die über den Ersatz des Standardbetons durch emissionsarme und ressourcenschonende Alternativen hinausgehen. Zusätzlich zu den Zielen der Reduktion von THG-Emissionen und der Ressourcenschonung, müssen die Anpassung an das Klima (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), 2021) und die Dauerhaftigkeit eines Bauwerks berücksichtigt werden. Nachhaltiger Betonbau ist nur möglich, wenn alle Projektbeteiligten gemeinsam eine ganzheitliche Lösung erarbeiten (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), 2021; Bechmann & Weidner, 2023). Neben dem Material, insbesondere der Betonrezeptur, muss auch das Tragwerk optimiert werden (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), 2021). Das bietet großes Potential Emissionen und Material einzusparen, zum Beispiel durch eine präzisere Bemessung von Bautei-

len (Bechmann & Weidner, 2023). Anstelle von Massivdecken können weniger materialintensive Systeme wie Spannbetonhohlplatten verwendet werden (Urban & Lindorf, Beton und Spannstahl: Deckensysteme mit Spannbetonhohlplatten, 2022). Auch für Risskonzepte kann ein alternativer Ansatz z.B. Entwurfsgrundsatz EGS-c gewählt werden, um die nötige Bewehrungsmenge zu reduzieren (Kiltz & Fingerloos, 2022). Eine geschickte Umsetzung ist ebenso erforderlich (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), 2021). Dabei gilt es Abfall zu vermeiden. Außerdem können massige Bauteile zoniert geplant und ausgeführt werden, um die Materialeffizienz zu steigern (Schwabach & Filusch, 2022). Auf die vielfältigen Ansätze in der Zement- und Betonherstellung weniger THG-Emissionen zu emittieren und Ressourcen zu schonen, geht Kapitel 3.3 ein. Darauf kann durch gezielte Nachfrage und Abnahme von Produkten durch bauausführende Firmen indirekt Einfluss genommen werden (vgl. Bechmann & Weidner, 2023, S. 22).

Diese kurze Aufzählung von Optimierungsmöglichkeiten, zeigt nicht nur die Komplexität und Interdisziplinarität des nachhaltigen Betonbaus, sondern auch die Vielzahl bereits existierender Maßnahmen. Jedoch werden diese bisher selten angewendet (Glock, et al., 2023, S. 26). Die Begrenzung der Masterarbeit auf den Ersatz des Standardbetons ist aufgrund der Vielzahl von Strategien zur nachhaltigen Gestaltung des Betonbaus notwendig.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf Maßnahmen zur Reduktion des Treibhauspotentials und Ressourcenverbrauchs, die innerhalb der normativen Situation umsetzbar sind und keine Zustimmung im Einzelfall erfordern. Diese müssen wegen „des Zeitdrucks“ genutzt werden, „auch wenn sie aktuell noch Kostennachteile mit sich bringen sollten“ (Glock, et al., 2023, S. 35).

Es wird ausschließlich der Hochbau betrachtet. Betone für den Industrie-, Ingenieur- und Straßenbau, z.B. Transportbetone nach ZTV-ING oder Bohrpfahlbetone nach DIN SPEC 18140, bleiben unberücksichtigt. Gleiches gilt für Faserbeton und Spannbeton.

Im Folgenden ist mit dem Begriff „Beton“ immer Transportbeton gemeint. Betonwaren und Betonfertigteile werden nicht betrachtet. Grundsätzlich begünstigen die gut kontrollierbaren Herstellbedingungen im Werk den Einsatz von ökologisch-nachhaltigen Betonen. Jedoch ist die langsamere Festigkeitsentwicklung dort besonders problematisch (vgl. Breitenbücher, 2021).

Die Verfügbarkeit von CO₂-effizienten und R-Betonen wird ausschließlich für Transportbetonwerke innerhalb Bayerns untersucht.

2.2. Ermittlung der Verfügbarkeit

Im Folgenden wird beschrieben wie Hersteller und erhältliche Sorten von CO₂-reduziertem und R-Beton in Bayern identifiziert werden. Darüber hinaus wird der Fragebogen zu umweltrelevanten Daten von Transportbeton vorgestellt. Dieser richtet sich an Transportbetonhersteller, wird im Rahmen der Masterarbeit erstellt, genutzt und zur weiteren Verwendung optimiert.

2.2.1. Identifikation von Herstellern ökologisch-nachhaltigen Betons und entsprechender Produkte

Mithilfe einer Online-Recherche werden Betonwerke identifiziert, die entsprechende Betonsorten produzieren. Dabei werden die Webseiten, Preislisten und Produktverzeichnisse von bayerischen Betonherstellern berücksichtigt. Das Ergebnis ist eine tabellarische Übersicht (siehe Anhang 1.1) folgender Daten von verfügbaren CO₂-reduzierten und R-Betonen:

Hersteller: Firmenname

Die Firmen werden in dieser Übersicht benannt, weil ausschließlich öffentlich zugängliche Informationen aufgeführt werden.

Verfügbarkeit der Produkte: Werk (Postleitzahl, Ortsname), werksspezifische Verfügbarkeit (dauerhaft, auf Anfrage etc.)

Das Produktsortiment und die Produktverfügbarkeit variieren selbst innerhalb einer Firma von Werk zu Werk. Um die lokale Verfügbarkeit von ökologisch-nachhaltigen Produkten beurteilen zu können, werden die Transportbetonwerke in der Übersicht einzeln aufgeführt. Es wird unterschieden, ob Produkte dauerhaft oder nur auf Anfrage erhältlich sind.

CSC-Zertifikat

Mit einem CSC-Zertifikat wird die verantwortungsbewusste Herstellung von Frischbeton ausgezeichnet (Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2022b, S. 7) (siehe Kapitel 3.2.2).

Produkt: Name aus Preislisten und/oder Produktverzeichnissen, Art des Produkts (CO₂-reduziertes und/oder Recyclingprodukt), Ansatz zur Reduktion der Umweltwirkung

Diese Spalten dienen dazu, die alternativen Transportbetone zu charakterisieren. Dadurch können ähnliche Produkte gefunden und im nächsten Schritt verglichen werden.

Festbetoneigenschaften: Festigkeitsklasse, Expositionsklassen, Eignung als Sichtbeton bzw. für hohen Wassereindringwiderstand

Mithilfe dieser Eigenschaften werden Einsatzbereiche definiert, für die das Produkt geeignet ist.

Festigkeitsentwicklung

Diese Betoneigenschaft ist maßgeblich für den Bauablauf und muss schon in der Ausschreibung und Arbeitsvorbereitung, insbesondere bei der Terminplanung, berücksichtigt werden. Sie hängt vor allem von der verwendeten Zementsorte ab und bestimmt die Ausschallfrist von Betonbauteilen.

Frischbetoneigenschaften: Konsistenzklasse, Pumpfähigkeit

Die beiden genannten Frischbetoneigenschaften sind besonders relevant während der Bauausführung.

Nettopreis [Euro / m³]:

Sofern Angaben in den Preislisten der Hersteller vorhanden sind, werden diese übernommen. Zu beachten ist, dass sich Preise für Transportbeton üblicherweise wie folgt zusammensetzen: Der in der Preisliste genannte Nettopreis wird mit einem projekt- oder kundenspezifischen Rabattsatz (prozentualer oder absoluter Wert) verrechnet.

Für bestimmte Leistungen wie Konsistenzänderungen, den Einsatz von Zusatzmitteln etc. werden Aufpreise addiert. Dasselbe gilt für Mautzuschläge und CO₂-Abgaben.

Die Nettopreise aus den veröffentlichten Preislisten von Transportbetonwerken dienen der Vergleichbarkeit von Produkten und stellen nicht die tatsächlichen Preise für die Beschaffung dar. Auch diese werden werkspezifisch betrachtet.

Treibhausgas-Einsparpotential gemäß Hersteller:

Das Treibhausgas-Einsparpotential gemäß Hersteller wird ebenfalls aufgeführt. Jedoch ist dieses kritisch zu hinterfragen. Insbesondere ist zu klären, auf welchen Referenzwert der Hersteller seine Werte bezieht. Es wird in der Übersicht aufgeführt, um herstellereigene Aussagen zu beurteilen und zu vergleichen. In dieser Arbeit werden die CSC-Branchenreferenzwerte zur Ermittlung von THG-Einsparpotentialen verwendet (siehe Kapitel 3.2.2).

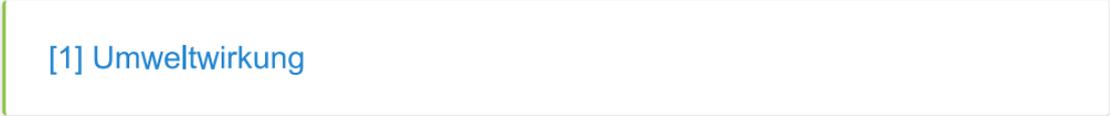
2.2.2. Aufbau des Fragebogens zu umweltrelevanten Daten und alternativen Sorten von Transportbeton und Durchführung der Umfrage

Die Emissionsfaktoren [kg CO₂-Äq. / m³] werden mithilfe eines Fragebogens eingeholt. Das Einsparpotential wird dann in Bezug auf die CSC-Branchenreferenzwerte (vgl. Kapitel 3.2.2) ermittelt.

Der „Fragebogen zu Transportbeton in Bayern – umweltrelevante Daten und alternative Sorten“ (Anhang 2.1) wurde im Rahmen der Masterarbeit entwickelt. Dieser ist an Transportbetonhersteller adressiert und in fünf Abschnitte eingeteilt.

Das Excel-Tool zur „Sustainability Qualification“ u.a. zur Ermittlung von THG-Emissionen von Beton wurde angepasst und die zugrundeliegenden Daten der ÖKOBAUDAT aktualisiert. Verwendet werden die Datensätze der ÖKOBAUDAT gemäß EN 15804+A2 Version 2023-I vom 15.06.2023.

Alle weiteren Teile des Fragebogens wurden im Rahmen der Masterarbeit neu erstellt.



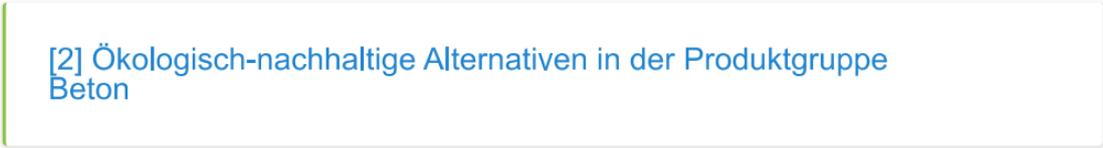
[1] Umweltwirkung

Abbildung 1 Überschrift des ersten Abschnitts, Anhang 2.1

Im ersten Abschnitt „Umweltwirkung“ (Anhang 2.1) werden THG-Emissionen von drei häufig verwendeten Standard-Produktsorten abgefragt.

Zur Angabe der Emissionsfaktoren hat der Empfänger des Fragebogens mehrere Möglichkeiten. Falls eine verifizierte Umwelt-Produktdeklaration oder eine Berechnung nach ISO 14025 und EN 15804 bzw. ISO 21930 vorliegt, können die Emissionsfaktoren für die Module A1 bis A3 in die Übersichtstabelle des Excel-Tools aus Frage [1.1] im Reiter „THG-Emissionen Beton“ (Anhang 2.2) eingetragen werden. Entsprechende Nachweise werden in Frage [1.2] zur Datengrundlagen hochgeladen. Liegen keine Daten zu THG-Emissionen der Produkte vor, kann der Reiter „Berechnung“ (Anhang 2.2) ausgefüllt werden. Falls keine spezifischen Angaben zu den THG-Emissionen der Ausgangsstoffe vorliegen, werden generische Datensätze der ÖKOBAUDAT Version 2023-I genutzt.

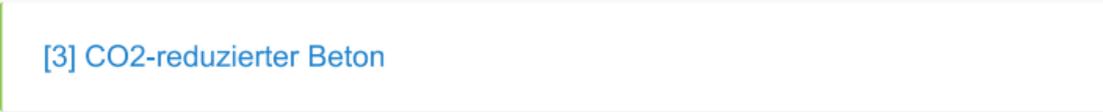
Weil der Fragebogen an Hersteller adressiert ist und die Daten im Einkauf genutzt werden, werden nur die Module der Produktionsphase A1 bis A3 abgefragt. In seiner Entscheidung kann der Einkauf dann mithilfe des Transportwegs vom Werk zur Baustelle die Phase A4 projektspezifisch berücksichtigen. Für eine vollständige Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040, DIN EN ISO 14044 und DIN EN 15978 und die Beurteilung der Nachhaltigkeit des Einsatzes eines Produkts reichen diese Daten nicht aus. Diese sind jedoch für die vorgesehene Verwendung im Einkauf von Beton ausreichend, um Hersteller und Produkte untereinander zu vergleichen.



[2] Ökologisch-nachhaltige Alternativen in der Produktgruppe Beton

Abbildung 2 Überschrift des zweiten Abschnitts, Anhang 2.1

Der zweite Abschnitt behandelt die Verfügbarkeit von ökologisch-nachhaltigen Alternativen in der Produktgruppe Beton sowie Maßnahmen zur THG-Emissionsreduktion. Gibt der Befragte an CO₂-reduzierte Produkte anzubieten (Frage [3.0]), so wird der dritte Abschnitt „CO₂-reduzierter Beton“ (Anhang 2.1) sichtbar.



[3] CO₂-reduzierter Beton

Abbildung 3 Überschrift des dritten Abschnitts, Anhang 2.1

Gleiches gilt für Recycling-Produkte (Frage [4.0]) und den vierten Abschnitt „R-Beton“ (Anhang 2.1).

[4] R-Beton

Abbildung 4 Überschrift des vierten Abschnitts, Anhang 2.1

Diese beiden Abschnitte fragen die Umweltwirkung der verfügbaren alternativen Betone analog zu den Standard-Produktsorten aus Abschnitt [1] ab. Außerdem werden Besonderheiten der bezüglich Frischbetoneigenschaften (Ausschalfrist, Verarbeitbarkeit) behandelt, weil sie für die Terminplanung und Bauausführung relevant sind. Die vor der Lieferung benötigte Vorlaufzeit und Angaben zu Preisschwankungen sind im Einkauf zu berücksichtigen und in den Abschnitten [3] und [4] anzugeben (vgl. Anhang 2.1). In weitere Tabellen sollen Produkteigenschaften, Verfügbarkeit und aktuelle Aufpreise CO₂-reduzierter (Anhang 2.5, Frage [3.6]) bzw. ressourcenschonender Produkte (Anhang 2.6, Frage [4.6]) eingetragen werden. Dabei werden Eigenschaften einer Produktgruppe und Emissionsfaktoren einzelner Sorten berücksichtigt. Neben den Daten, die auch in der Übersicht der Ergebnisse der Internetrecherche (Anhang 1.1) enthalten sind (siehe Aufzählung in Kapitel 2.2.1), werden Zementsorten, Zusatzstoffe, Feuchteklassen und Größtkorn erfragt. Für R-Betone können zusätzlich Angaben zu den ersetzten Korngruppen, dem Anteil und Typ der RC-Gesteinskörnung (siehe Kapitel 3.3.7) gemacht werden.

Eine Voraussetzung für den Einsatz von R-Beton im Sinne der Nachhaltigkeit ist die Verfügbarkeit von rezyklierter Gesteinskörnung in der Nähe des Einsatzorts (Kiltz & Voland, 2022). Deshalb wird die Herkunft des Sekundärmaterials abgefragt.

[5] CSC-Zertifizierung

Abbildung 5 Überschrift des letzten Abschnitts, Anhang 2.1

Im letzten Abschnitt „CSC-Zertifizierung“ (Anhang 2.1) werden Betonhersteller gebeten Zertifikate hochzuladen, falls eines oder mehrere Ihrer Werke durch das Concrete Sustainability Council zertifiziert wurden (vgl. Kapitel 3.2.2).

Um möglichst viele Antworten zu erhalten, wird der Fragebogen wie eine Angebotsanfrage über das Lieferantenportal der STRABAG SE und Ed. Züblin AG verteilt. Das **STRABAG Portal for Suppliers** (kurz: SPS-Portal) bildet den Einkaufsprozess digital ab und ist Lieferanten, die häufig mit der Ed. Züblin AG zusammenarbeiten, bekannt.

Alle Teile des Fragebogens werden in das SPS-Portal eingepflegt. Gemeinsam mit dem Anschreiben (Anhang 2.7) wird der Fragebogen analog zu einer Angebotsanfrage an 34 Transportbetonhersteller gesendet. Es werden Firmen kontaktiert, die bereits ökologisch-nachhaltige Alternativen zu Standardbeton anbieten. Sie wurden mittels Internetrecherche identifiziert (vgl. Kapitel 2.2.1).

Das Anschreiben erklärt den Empfängern die Relevanz ihrer Teilnahme an der Umfrage und die Vorteile, die sich für sie als Lieferanten daraus ergeben. Es soll in Kombination mit Anrufen, in denen die Empfänger an den Fragebogen erinnert werden, Fragen stellen und ihre Erfahrungen mitteilen können, zu einer hohen Partizipation beitragen.

Die Antwortdaten werden für diese Masterarbeit anonymisiert, z.B. Hersteller A. Zur internen Verwendung bei der Ed. Züblin AG liegt eine Zuordnungstabelle der Firmennamen zu den Buchstaben vor.

2.3. Variantenvergleich am Beispiel des Tragwerks des DonauTowers

Um die Treibhausgas-bzw. Ressourceneinsparpotentiale nicht nur auf Produkt-, sondern auch auf Tragwerksebene vergleichen zu können, wird ein Variantenvergleich am Beispiel des DonauTowers durchgeführt. Aufgrund begrenzter Einsatzbereiche von CO₂-effizienten bzw. R-Betonsorten wird erwartet, dass die Einsparpotentiale geringer als auf Baustoffebene ausfallen.

Das Treibhauspotential infolge der Errichtung und Entsorgung des Tragwerks wird im Rahmen einer Ökobilanz nach DIN EN 15978 ermittelt. Die Module A1 bis A4, C3 und C4 nach DIN EN 15804 werden bilanziert. Diese Vorgehensweise entspricht den Anforderungen des Gelbdrucks der DAfStb-Richtlinie „Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton“, weshalb die Varianten mit den zulässigen Emissionen des Tragwerks für Bürogebäude verglichen werden können (vgl. Kapitel

3.2.3). Als Betrachtungszeitraum ist gemäß DIN EN 15978:2012-10 die geforderte Nutzungsdauer anzusetzen. Im Falle des DonauTower beträgt diese nach Tabelle 2.1 der DIN EN 1990:2021-10 50 Jahre, weil es sich um ein Gebäude handelt. Gemäß BBSR sind die Nutzungsdauern von tragenden Betonbauteilen länger als 50 Jahre (BBSR, 2017). Wegen der Dauerhaftigkeit von Beton ist innerhalb des Betrachtungszeitraums kein Ersatz erforderlich (vgl. Kapitel 3.1).

Das Tragwerk des DonauTowers besteht fast ausschließlich aus Stahlbeton. Aufgrund der geringen Menge (insgesamt 6,7 Tonnen) wird Baustahl vernachlässigt. Die Betonstahlmenge beträgt knapp 2140 Tonnen. Weil eine DGNB Gold Zertifizierung des DonauTowers angestrebt wird, wurde durch den zuständigen Betontechnologen ein Variantenvergleich zwischen Standardbeton und CO₂-effizienten Sorten des Lieferanten angestellt (vgl. Kapitel 6.1.2). Die Betonmengen daraus werden verwendet, um alle Varianten mit der geplanten Variante vergleichen zu können und Treibhausgas-Einsparpotentiale zu ermitteln. Die bisher verbauten Mengen weichen davon ab und sind ausschließlich in Variante 6 „Ausgeführter Zustand“ die Grundlage der THG-Bilanz. Um die Betonvolumina zu ermitteln für die R-Beton gemäß der DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“ eingesetzt werden darf, werden die Betonanforderungen und -mengen aus Leistungsverzeichnis (siehe Anhang 4.1) verwendet.

Alle projektspezifischen Datensätze für Transportbeton stammen aus dem zuvor beschriebenen Variantenvergleich. In allen Varianten wird für den Betonstahl der gleiche generische Datensatz aus der OBD 2023-I verwendet, weil ausschließlich der Einfluss unterschiedlicher Betonsorten verglichen wird.

In einigen Varianten werden für Beton einer Festigkeitsklasse unabhängig von den Expositionsklassen die THG-Emissionen einer Sorte angesetzt. Diese Annahme ist möglich, weil die gewählte Sorte die Exposition des größten Teils des Betonvolumens abdeckt. Außerdem zeigt der Vergleich der Treibhauspotentiale der projektspezifischen Betonsorten, dass es zwar deutliche Unterschiede zwischen den Festigkeitsklassen, aber nicht zwischen den Expositionsklassen gibt (vgl. Tabelle 25).

Tabelle 1 Betonmengen und Datentypen der verglichenen Varianten 1 bis 10

Variante [Nr.]	Betonstahl [t]	Standard- Beton [m³]	CO ₂ -effizienter Beton [m³]	R-Beton [m³]	Beton gesamt [m³]	Datentyp (THG-Emissionen Beton)
1	2139	11931	0	0	11931	projektspezifisch
2	2139	3970	7961	0	11931	projektspezifisch
3	2139	0	11931	0	11931	projektspezifisch
4	2139	0	11931	0	11931	generisch
5	2139	0	0	11931	11931	generisch
6	1705	2916	6100	0	9016	projektspezifisch
7	2139	0	11931	0	11931	spezifisch
8	2139	4158	0	7773	11931	spezifisch
9	2139	0	11931	0	11931	spezifisch
10	2139	4158	0	7773	11931	spezifisch

Die folgenden Varianten werden hinsichtlich des Treibhauspotentials und Ressourcenverbrauchs der Gesteinskörnung verglichen:

Variante 1: Standardbeton – projektspezifisch

In dieser Variante werden alle Bauteile mit Standardsorten des Betonlieferanten des DonauTowers erstellt. Sie entspricht der ersten Variante des zuvor beschriebenen Vergleichs (vgl. Tabelle 24).

Variante 2: Teilweiser Einsatz von CO₂-effizienten Sorten – projektspezifisch

Der Standardbeton wird teilweise durch CO₂-effizienten Beton des Transportbetonlieferanten ersetzt. Beispielsweise wird für die Bodenplatte, die aufgrund der Stärke von bis zu 1,6 m fast ein Viertel des Betonvolumens des Tragwerks ausmacht, Hochofenzement (CEM III/ A 42,5 N) verwendet. Für weitere Bauteile – Decken, Wände und Stützen – ist der Einsatz von CO₂-effizienten Sorten geplant. Diese machen zwei Drittel des Betonvolumens des DonauTowers aus. Standardbetone desselben Transportbetonlieferanten stellen das restliche Volumen. Diese Variante entspricht der optimierten zweiten Variante des Vergleichs des Betontechnologen (vgl. Tabelle 25).

Variante 3: Ausschließlicher Einsatz von CO₂-effizienten Sorten – projektspezifisch

Diese Variante stellt eine weitere Optimierung der „Variante 2“ dar. Es werden ausschließlich CO₂-effiziente Betonsorten des Transportbetonlieferanten verwendet. Die Standardsorten werden durch CO₂-effiziente Sorten derselben Festigkeitsklasse, Expositionsclassen, Feuchteklasse und Konsistenz ersetzt. Die Festigkeitsentwicklung und das Prüfalalter des Betons können abweichen, was Einfluss auf Bauablauf und Baukosten hat (siehe Kapitel 7 und 8). Für Beton mit mechanischer Beanspruchung (XM1) gibt es keine projektspezifische optimierte Sorte. Deswegen werden die höchsten THG-Emissionen der CO₂-effizienten Sorten derselben Festigkeitsklasse angenommen. In der THG-Bilanz in Anhang 4.2 wird die Annahme detailliert beschreiben.

Variante 4: Transportbeton – generisch

Hier werden die generischen Datensätze für Transportbeton aus der OBD 2023-I verwendet. Für die Festigkeitsklasse C35/45 enthält die Datenbank keine Werte. Wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben, werden interpolierte Werte eingesetzt. Diese Variante dient dem Vergleich des Tragwerks mit einer in Deutschland üblichen Variante. Die verwendeten Datensätze stellen die „länderspezifische Situation in Deutschland“ dar (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023).

Variante 5: Recycling-Transportbeton – generisch

In Variante 5 werden alle Bauteile in R-Beton mit vollständiger Substitution der natürlichen durch rezyklierte Gesteinskörnung ausgeführt. Dadurch befindet sie sich deutlich außerhalb der Anwendungsgrenzen der DAfStb-Richtlinie zu Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung (siehe Kapitel 3.3.7).

Die generischen Datensätze der OBD 2023-I für „Recycling Transportbeton“ werden herangezogen. Zur Ermittlung wurden ein „repräsentativer Zementmix“ sowie der Einsatz von Hochofenschlacke und Flugasche angesetzt. Auch hier werden Werte für R-Beton der Festigkeitsklasse C35/45 interpoliert (vgl. Kapitel 3.2.1). Die Betonrezepturen sind nur in Expositionsklasse X0 einsetzbar. (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023).

Somit ist Variante 5 als Einzige nicht umsetzbar. Sie wurde hinsichtlich des Ressourcenverbrauchs der Gesteinskörnung optimiert. Ziel ist es die mögliche Wechselwirkung zwischen Ressourcenschonung und Treibhauspotential zu untersuchen.

Variante 6: Ausgeführter Zustand – projektspezifisch

Diese Variante zeigt den tatsächlich ausgeführten Zustand des DonauTowers bis zum 13.12.2023 (vgl. Kapitel 6.1.3). Die Betonmengen je Sorte stammen aus dem Betoniertagebuch und sind Tabelle 26 zu entnehmen. Es liegen nicht für alle projektspezifischen Betonsorten Angaben zu den THG-Emissionen vor. Daten ähnlicher Sorten, vor allem hinsichtlich Zementart und -menge, des Transportlieferanten werden angenommen. Die einzelnen Annahmen werden in der THG-Bilanz in Anhang 4.2 angegeben und detailliert begründet.

Variante 7: CO₂-effizienter Beton, ECOPact - spezifisch

Diese Variante basiert auf spezifischen Daten der Holcim (Deutschland) GmbH. Dieser Transportbetonhersteller ist der Einzige, der verifizierte Umweltproduktdeklarationen in der ÖKOBAUDAT zur Verfügung stellt (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023). In Bayern betreibt das Unternehmen kein Werk. Deswegen werden die Daten von Betonsorten des Standorts Frankfurt zum Vergleich mit regional verfügbaren CO₂-effizienten Produkten genutzt.

Variante 8: R-Beton, Hersteller F - spezifisch

Diese Variante basiert auf der Antwort des Herstellers F auf den Fragebogen (vgl. Kapitel 5). Die spezifischen THG-Emissionen von Standard- und R-Betonsorten des Herstellers werden angesetzt. Der R-Beton wird dabei für alle Bauteile angenommen, die innerhalb der DAfStb-Richtlinie zu Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung (siehe Kapitel 3.3.7) ausgeführt werden können. Der Ersatz von 20 Vol.% der gesamten Gesteinskörnung durch Sekundärmaterial des R-Betons liegt innerhalb der zulässigen Anteile gemäß DAfStb-Richtlinie (siehe Tabelle 8).

Variante 9: CO₂-effizienter Beton, Hersteller E - spezifisch

Ein Werk von Hersteller E befindet sich ca. 75 km vom DonauTower entfernt. In Variante 9 werden spezifische Daten aus Selbstdeklarationen des Herstellers E verwendet. Die Auswirkung der im Vergleich zum tatsächlichen Lieferanten längeren Transportstrecke zur Baustelle werden in Kapitel 6.2.4 betrachtet.

Variante 10: R-Beton, Hersteller E - spezifisch

Hersteller E bietet auch R-Beton an (vgl. Kapitel 5.3). Variante 10 ist eine Mischung aus Standardsorten und dem gemäß DAfStb-Richtlinie maximal möglich Einsatz von R-Betonsorten (siehe Tabelle 8). Wie in Variante 9 werden ausschließlich spezifische Herstellerangaben zu den THG-Emissionen verwendet. Von der Verwendung von CO₂-effizienten Sorten des Herstellers E wird abgesehen, weil die Varianten entweder hinsichtlich des GWP oder des Ressourcenverbrauchs durch die Gesteinskörnung optimiert werden. Das dient der Betrachtung von Wechselwirkungen.

2.4. Vergleich der Treibhauspotentiale und des Betoneinsatzes beim Rohbau verschiedener Hochbauprojekte

Zum Vergleich der Treibhauspotentiale werden Ökobilanzen für den Rohbau verschiedener Hochbauprojekte der Ed. Züblin AG erstellt. Dabei werden die folgenden Rohbau-Hauptmengen berücksichtigt: Beton, Betonstahl, Baustahl und Holz. Unberücksichtigt bleiben Einbauteile (z.B. Rückbiegeanschlüsse, Dübelleisten), weil sie üblicherweise einen sehr geringen Anteil am GWP eines Tragwerks haben. Fertigteiltreppen, Fertigteilbalkone und Sauberkeitsschichten bleiben unberücksichtigt, da sie zwar aus Beton, allerdings nicht tragend sind. Die Sachbilanzdaten stammen je nach Projekt aus Leistungsverzeichnissen, Kostenartenauswertungen oder Artikellisten. Es können Baustoffmengen nichttragender Bauteile enthalten sein. Jedoch bestehen diese selten aus den berücksichtigten Baustoffen. Deswegen entsprechen die betrachteten Rohbau-Hauptmengen ungefähr dem Tragwerk eines Gebäudes wie es im Entwurf der DAfStb-Richtlinie „Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton [...]“ (siehe Kapitel 3.2.3) definiert wird. Um die darin enthaltenen Referenzwerte nutzen zu können, werden wie im zuvor beschriebenen Variantenvergleich die Module A1-A3, C3 und C4 für eine Nutzungsdauer von 50 Jahren bilanziert. Es werden Datensätze der OBD 2023-I und EPDs für Beton der Druckfestigkeitsklassen C8/10 bis einschließlich C60/75 des InformationsZentrum Beton GmbH genutzt (vgl. Kapitel 3.2.1).

3. Theoretische Grundlagen

Zunächst werden die Ursachen des Ressourcenverbrauchs und Treibhauspotentials von Transportbeton beschrieben. Die Herkunft der verwendeten Daten hinsichtlich der Umweltwirkung wird erklärt. Außerdem werden Referenzwerte zum Vergleich auf Produkt- und Tragwerksebene festgelegt. Schließlich werden Maßnahmen zur Reduktion des Treibhauspotentials und Ressourcenverbrauchs bei der Betonherstellung beschrieben und in die normative Situation eingeordnet.

3.1. THG-Emissionen, Ressourcenverbrauch und Vorteile des Baustoffs Beton

Herstellung (A1-A3):

Die drei Hauptbestandteile von Beton sind Wasser, Gesteinskörnung und Zement.

Den größten Anteil der Betonmasse nimmt die Gesteinskörnung mit fast 80% ein (vgl. Abbildung 6). Ein Kubikmeter Transportbeton enthält ca. 1690 bis 1840 kg Gesteinskörnung (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023). Üblicherweise wird natürliche Gesteinskörnung, also ein Primärrohstoff, verwendet und dadurch Ressourcen verbraucht. Dieser kann jedoch durch Sekundärmaterial ersetzt werden (siehe Kapitel 3.3.7).

Ein Kubikmeter Beton enthält ca. 200 Liter Wasser. Der Nettoeinsatz von Süßwasserressourcen liegt in der Produktion (A1 bis A3) zwischen 400 und 500 Litern. (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023).

Mit zunehmender Festigkeitsklasse des Betons nimmt auch das durch die Herstellung verursachte Treibhauspotential zu (vgl. Tabelle 2). Die Hauptursache ist der steigende Zementgehalt.

Tabelle 2 Orientierungswerte für Treibhausgasemissionen von Beton, Ausschnitt der Tabelle E5 aus (Breitenbücher, 2021)

Durchschnitt Beton 2021	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C45/55	C50/60
Treibhausgasemissionen [kg CO ₂ -Äq. / m ³]; (A1-A3)	178	197	219	244	286	300

Auch wenn Zement den kleinsten Volumen- und Masseanteil einnimmt, verursacht dessen Herstellung bei Weitem den größten Anteil des Treibhauspotentials der Betonproduktion (vgl. Abbildung 6).

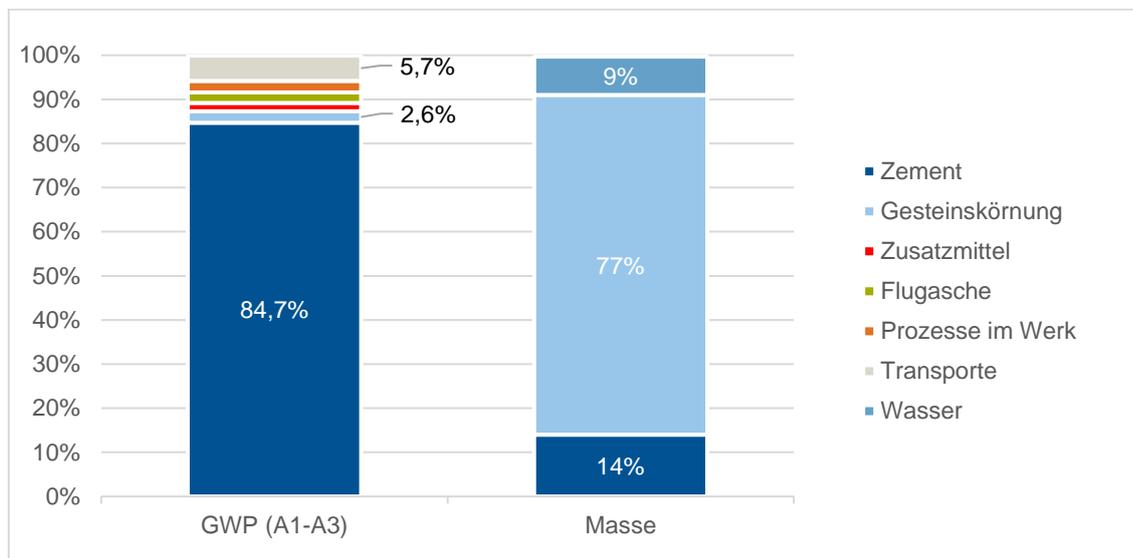


Abbildung 6 Anteile der Ausgangsstoffe am GWP der Betonproduktion und an der Masse eines für Deutschland typischen C30/37, erstellt nach (InformationsZentrum Beton GmbH, 2023)

Die Umweltwirkungen der Betonherstellung werden in allen Wirkungskategorien durch die Zementherstellung dominiert. Besonders betroffen ist neben dem Treibhauspotential auch das Ozonschichtabbaupotenzial. Beeinflusst werden die Umweltwirkungen durch die Betonrezeptur, vor allem die Menge und Art des eingesetzten Zements und die Form der Gesteinskörnung (gebrochen, ungebrochen). (InformationsZentrum Beton GmbH, 2023).

Um Zement herzustellen, wird zunächst das Rohmaterial (vor allem Kalkstein) gebrannt. Bei einer Temperatur von ca. 1450°C entsteht Portlandzementklinker. Dieser wird anschließend mit verschiedenen Ersatzstoffen oder Zuschlagstoffen gemahlen. (Umweltbundesamt, 2020).

Bei der Klinkerbrennung entstehen THG-Emissionen, wobei CO₂-Emissionen dominieren. Diese sind energie- und rohstoffbedingt. Die Ursache für die Energiebedingten sind das Verbrennen von Brennstoffen und die Nutzung von elektrischer Energie. (Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2023a, S. 25).

Bedenkt man, dass gemäß dem Pariser Klimaabkommen ab 2050 nur emissionsneutrale Energieträger verwendet werden sollen, so wächst der Anteil der prozessbedingten Emissionen (vgl. Bechmann & Weidner, 2023). Dieser beträgt heute bereits 60% der direkten THG-Emissionen der Zementherstellung und entsteht vor allem bei der Entsäuerung des Kalksteins (Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2023a, S. 25).

Entsäuerungsreaktion von Kalkstein: $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$

Im Jahr 2022 wurden fast 75 Prozent des Rohstoffeinsatzes der deutschen Zementindustrie mit den primären Rohstoffen Kalkstein, Mergel und Kreide gedeckt. Nur ca. 17 Prozent des Einsatzes waren alternative Rohstoffe. Alternative Brennstoffe machten im Jahr 2022 über 70% des Brennstoffeinsatzes der deutschen Zementindustrie aus. Die Transportbetonhersteller nahmen im selben Jahr mehr als die Hälfte des im Inland verkauften Zements der VDZ-Mitglieder ab. (Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2023, S. 10, 22).

Transport zur Baustelle (A4):

Der Transport des Betons vom Werk zur Baustelle verursacht abhängig von der Menge bzw. dem Gewicht des Betons sowie der zurückzulegenden Entfernung THG-Emissionen. Die Transporte während der Herstellung (Modul A2) werden gemäß DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO14044 in EPDs deklariert, aber für den Transport zur Baustelle (Modul A4) liegen meist keine Kenndaten vor (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023; Bechmann & Weidner, 2023). Diese sollten projektspezifisch ermittelt werden. Als Anhaltswert können für einen mit 32 Tonnen beladenen LKW (Betonmischer) und eine Entfernung von 11 Kilometern zwischen Werk und Baustelle 2 kg CO₂-Äq. / m³ verwendet werden (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023).

Errichtung (A5):

Auch beim Einbau des Betons werden Energie verbraucht und Treibhausgase emittiert. Zum Beispiel resultiert aus dem Pumpen eines Kubikmeters Beton ein Treibhauspotential von ca. 0,7 kg CO₂-Äq. (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023).

Karbonatisierung während der Nutzungsphase (B1):

In der Nutzungsphase kann durch die Karbonatisierung Kohlenstoffdioxid durch den Beton aufgenommen werden (Bechmann & Weidner, 2023).

Karbonatisierung: $Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$

Wie viel CO₂ gebunden werden kann hängt von der Betongüte, Bauteildicke, den Umweltbedingungen, der verwendeten Zementart und der belüfteten Oberfläche ab. Mehr als 40% der CO₂-Emissionen aus der Betonherstellung können für einen C20/25 mit CEM I innerhalb von 50 Jahren gebunden werden. Enthält der Zement einen hohen Anteil an Hüttensand, finden kaum Karbonatisierungsprozesse im Beton statt. (Bechmann & Weidner, 2023).

Die DIN EN 16757:2019-10 enthält Regeln zur Berücksichtigung der Karbonatisierung in Umweltproduktdeklarationen.

Für ein 20 Zentimeter dickes Bauteil aus dem zuvor betrachteten Beton der Festigkeitsklasse C30/37 kann ein negatives Treibhauspotenzial in Höhe von -14 kg CO₂-Äq./m³ angenommen werden (InformationsZentrum Beton GmbH, 2023).

Jedoch ist zu berücksichtigen, dass die Karbonatisierung eines Betonbauteils in bestimmten Umgebungsbedingungen der Dauerhaftigkeit entgegensteht, weil sie Korrosionsprozesse des Betonstahls begünstigt. Deswegen wird die Karbonatisierungsgeschwindigkeit üblicherweise durch einen Mindestzementgehalt, maximalen Wassermengewert und eine sorgfältige Nachbehandlung begrenzt (siehe Kapitel 9.1.2).

Instandhaltungs- und Reparaturmaßnahmen (B2-B7):

Aufgrund der langen Lebensdauer müssen innerhalb der im Hochbau üblichen Nutzungsdauer von 50 Jahren keine Betonbauteile instandgesetzt oder ausgetauscht werden. Somit werden in der Nutzungsphase keine Ressourcen verbraucht oder negative Umweltwirkungen verursacht (InformationsZentrum Beton GmbH, 2023).

Entsorgungsphase (C1-4):

Betonbauteile und -gebäude werden rückgebaut oder abgebrochen. Das Material wird meist nicht vor Ort aufbereitet, sondern zur Aufbereitung transportiert. Das Abbruchmaterial wird gebrochen und aufbereitet. Die genannten Schritte verursachen eben-

falls THG-Emissionen und verbrauchten Ressourcen, vorwiegend durch den Einsatz von elektrischer Energie und Treibstoff. Die Deponierung von Beton wird nicht betrachtet, weil in Deutschland nur geringe Mengen mineralischen Bauschutts deponiert werden. (InformationsZentrum Beton GmbH, 2023).

Gutschriften außerhalb der Systemgrenze (D):

Das gebrochene Sekundärmaterial ersetzt die primären Rohstoffe Sand, Kies, Splitt und Schotter, weshalb in Modul D Gutschriften berücksichtigt werden (InformationsZentrum Beton GmbH, 2023). Das Sekundärmaterial wird vorwiegend im Straßenbau eingesetzt und verringert dort den Einsatz von Primärrohstoffen (Biscopig, Bosold, & Brunner, 2021). Das rezyklierte Material kann auch als Gesteinskörnung in Beton wiederverwendet werden (vgl. Kapitel 3.3.7).

Durch das Brechen des Betons vergrößern sich dessen Oberfläche und Volumen deutlich, weshalb verstärkt Karbonatisierung stattfindet (Bechmann & Weidner, 2023). Die Langzeitaufnahme von CO₂ aus der Umgebungsluft ist deutlich größer als das Potenzial während der Nutzungsphase (vgl. Abbildung 7). Als Anhaltswert für die CO₂-Aufnahme von C30/37 können 63,2 kg / m³ verwendet werden (InformationsZentrum Beton GmbH, 2023).

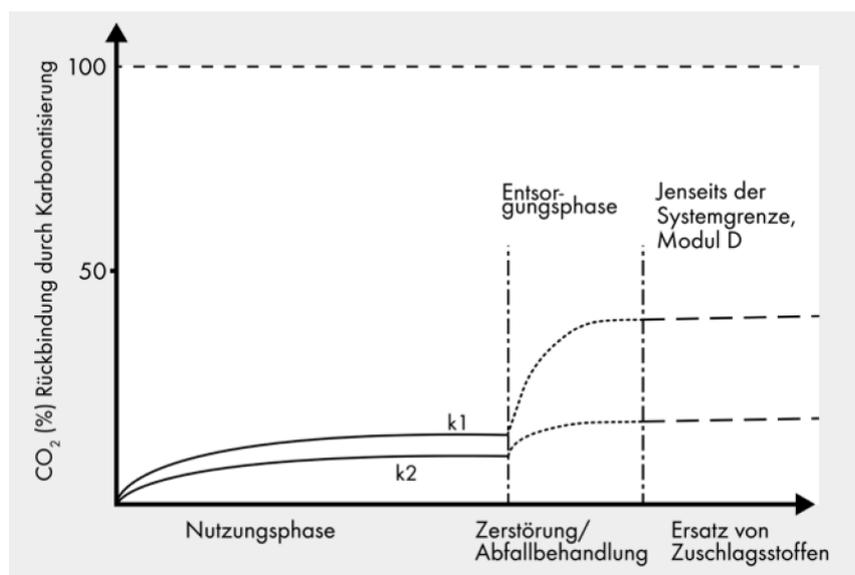


Abbildung 7 Karbonatisierung von Beton erstellt nach DIN EN 16757:2017-10; Bild 9 aus: (Bechmann & Weidner, 2023)

Vorteile des Baustoffs Beton:

Neben der der Dauerhaftigkeit und CO₂-Aufnahme bei der Karbonatisierung sind die Wirtschaftlichkeit, gute Verfügbarkeit der überwiegend regionalen Ausgangsstoffe, einfache Verarbeitbarkeit, gute Formbarkeit und Vielzahl von Anwendungsgebieten von Vorteil für das nachhaltige Bauen (Glock, et al., 2023, S. 27,31; Bechmann & Weidner, 2023, S. 31; Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), 2021). Deswegen wird Beton im Hochbau ein gefragter Baustoff bleiben. Es kommt hinzu, dass der hohe Bedarf in Deutschland nicht nachhaltig mit Holz gedeckt werden könnte (Bechmann & Weidner, 2023).

3.2. Daten zur Umweltwirkung von Transportbeton

Im Folgenden wird die Herkunft der verwendeten Daten und Referenzwerte gezeigt und deren Auswahl begründet.

3.2.1. Verfügbarkeit von verifizierten Umweltproduktdeklarationen für Transportbeton

Die Erstellung von Umweltproduktdeklarationen für Bauprodukte sind in DIN EN ISO 14025 und DIN EN 15804+A2 geregelt.

Es gibt wenige verifizierte Umweltproduktdeklarationen, die spezifische Daten für Transportbeton in Deutschland, enthalten (vgl. Lindorf, 2022). Die Firma Holcim (Deutschland) GmbH stellt für einige ihrer Werke und Sorten verifizierte EPDs zur Verfügung. (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023). Eine weitere spezifische, verifizierte EPD der Firma Sehring Beton GmbH & Co.KG wurde durch die Kiwa-Ecobility Experts herausgegeben (2022). Jedoch liegt keines der Werke in Bayern. In den Datenbanken der DGNB GmbH, EPD International AB und BRE Global stehen keine weiteren spezifischen Daten zu Transportbeton in Deutschland zur Verfügung (DGNB GmbH, kein Datum; BRE Global, 2022; EPD International AB, kein Datum). Für Zement sind mehr spezifische, verifizierte Umweltproduktdeklarationen verfügbar.

Generische Datensätze für Transportbeton der Festigkeitsklassen C20/25, C25/30, C30/37 und C50/60 sind in der ÖKOBAUDAT (Version 2023-I) vorhanden und bilden die länderspezifische Situation Deutschlands ab. Auch für Recycling-Transportbeton

mit vollständiger Substitution der primären durch sekundäre Gesteinskörnung derselben Festigkeitsklassen stehen in dieser Datenbank generische und für Situation in Deutschland typische Daten zur Verfügung. (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023).

Am 20. Oktober 2023 wurden EPDs für Beton der Druckfestigkeitsklassen C8/10 bis einschließlich C60/75 veröffentlicht (InformationsZentrum Beton GmbH). Für den Vergleich der Treibhauspotentiale des Rohbaus verschiedener Projekte (siehe Kapitel 2.4 und 4) werden diese EPDs genutzt, weil sie Transportbeton und Betonfertigteile sowie alle Festigkeitsklassen bis C60/75 abbilden.

Weil der Variantenvergleich des Tragwerks des DonauTowers (siehe Kapitel 2.3 und 6.2) zu diesem Zeitpunkt abgeschlossen war und die Vorgängerversionen dieser Umweltproduktdeklarationen nach DIN EN 15804+A1 erstellt wurden, werden die zuvor beschriebenen Daten für Transportbeton der OBD-2023-I verwendet. Die Wirkindikatoren der DIN EN 15804+A2 unterscheiden sich deutlich von denen der EN 15804+A1. Deswegen sind Datensätze, die mit der alten Norm konform sind, nicht gemeinsam nutzbar oder vergleichbar mit zur neuen Norm konformen Datensätzen. (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023).

Weil nicht für alle Festigkeitsklassen Datensätze für Transportbeton in der OBD 2023-I verfügbar sind, werden für den Variantenvergleich Werte für die Festigkeitsklassen C35/45 und C40/50 zwischen den vorhandenen für C30/37 und C50/60 über die Zylinderdruckfestigkeit interpoliert. Im Entwurf der DAfStb-Richtlinie zu treibhausgasreduzierten Tragwerken wird für die Festigkeitsklasse C25/30 der Mittelwert zwischen den Festigkeitsklassen C20/25 und C30/37 festgelegt (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb), 2023). Die Werte entsprechen einer linearen Interpolation über die Zylinderdruckfestigkeit. Auch der Vergleich mit Abbildung 8 zeigt, dass die Annahme sinnvoll ist.

Aufgrund der mangelnden Verfügbarkeit von spezifischen Daten zur Umweltwirkung von Transportbeton wird im Rahmen der Masterarbeit ein Fragebogen erarbeitet, verteilt und ausgewertet. Dieser fragt unter anderem das Treibhauspotential von herstellereinspezifischen Sorten ab (siehe Kapitel 2.2).

3.2.2. Zertifizierungssystem und Branchenreferenzwerte des Concrete Sustainability Council

Um das Treibhausgas-Einsparpotential auf Produktebene vergleichen zu können, werden in dieser Arbeit die Branchenreferenzwerte für Treibhausgasemissionen [netto kg CO₂-Äq. / m³] des Concrete Sustainability Council (CSC) von Beton in Deutschland herangezogen.

Das CSC wurde im November 2016 mit der Vision „Beton – Eine nachhaltige, sichere, dauerhaft und komfortable Zukunft bauen.“ (Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2022b, S. 4) gegründet. In Deutschland betreibt der Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. (BTB) das Produktzertifizierungssystem (Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2022b, S. 5). Es gibt „CSC Lieferanten-Zertifikate“ für Gesteinskörnungen und Zement. Hersteller von Frischbeton können durch ein „CSC-Zertifikat“ ausgezeichnet werden (Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2022b, S. 7).

Die folgende Tabelle stellt die Grundvoraussetzungen und Kriterien aus den vier Nachhaltigkeitskategorien des CSC-Zertifizierungssystems für verantwortungsbewusst hergestellten Beton dar.

Tabelle 3 Kategorien und zugehörige Kriterien des CSC-Zertifizierungssystems, (Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2022b, S. 12, 26)

Kategorie	Kriterien
Grundvoraussetzungen	Einhaltung geltender Gesetze, Menschenrechte, Rechte indigener Völker, Umwelt- und Sozialverträglichkeitsprüfung, nachvollziehbare Materialherkunft
Management	Nachhaltige Einkaufspolitik, Umweltmanagement, Qualitätsmanagement, Gesundheits- und Sicherheitsmanagement, Lieferkette, Benchmark
Soziales	Produktinformation, Lokales Gemeinwesen, Gesundheit und Sicherheit, Arbeitsbedingungen
Umwelt	Ökologische Produktinformation, Landnutzung, Energieverbrauch, Luftqualität, Wasserverbrauch, Biodiversität, Sekundäre Materialien, Transport, Sekundäre Brennstoffe
Ökonomie	Lokale Wirtschaft, Ethische Geschäftspraktiken, Innovation, Feedback Prozess

In dieser Arbeit stehen CO₂-effiziente und R-Betone im Fokus. Für diese Produktgruppe gibt es zusätzliche Module mit klar definierten Kriterien (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4 Ergänzende Module und zugehörige Kriterien des CSC-Zertifizierungssystems, (Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2022b, S. 8; Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2022a, S. 1)

Modul	Kriterien
R-Modul	Verantwortungsvolle Ressourcengewinnung, Nachvollziehbare R-Materialherkunft, Nutzung rezyklierter Gesteinskörnung, Qualitätsmanagement, Mindestgehalt an R-Material
CO ₂ -Modul	Verantwortungsvolle Ressourcengewinnung, Produktkette Zement, Monitoring von THG-Emissionen, Qualitätsmanagement, CO ₂ -Reduktion gegenüber Referenzwert

Das Kriterium „R5 Mindestgehalt an R-Material“ ist von besonderer Bedeutung, denn häufig werden Produkte mit geringem Gehalt an Rezyklat als „R-Beton“ bezeichnet. Die Nutzung des Begriffs ist nicht an einen Mindestgehalt von Sekundärmaterial gekoppelt.

Die bereits genannten Branchenreferenzwerte stammen aus dem CO₂-Modul. Dabei handelt es sich nicht um Durchschnittswerte für Beton, sondern um Referenzwerte, die international anwendbar sind (Bechmann & Weidner, 2023). Die Daten des Durchschnittszements aus verifizierten Branchenumweltproduktdeklarationen wurden bei der Ermittlung der Branchenreferenzwerte durch die eines Portlandzements (CEM I) ersetzt. (Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2021).

Im Regelfall wird kein Portlandzement für Betone im Hochbau verwendet. Außerdem weist dieser in der Produktion im Vergleich zu anderen Zementsorten das größte Treibhauspotential auf (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023; InformationsZentrum Beton GmbH). Deswegen liegen die Durchschnittswerte für THG-Emissionen bei der Betonherstellung in Deutschland bereits unter den Branchenreferenzwerten (siehe Abbildung 8).

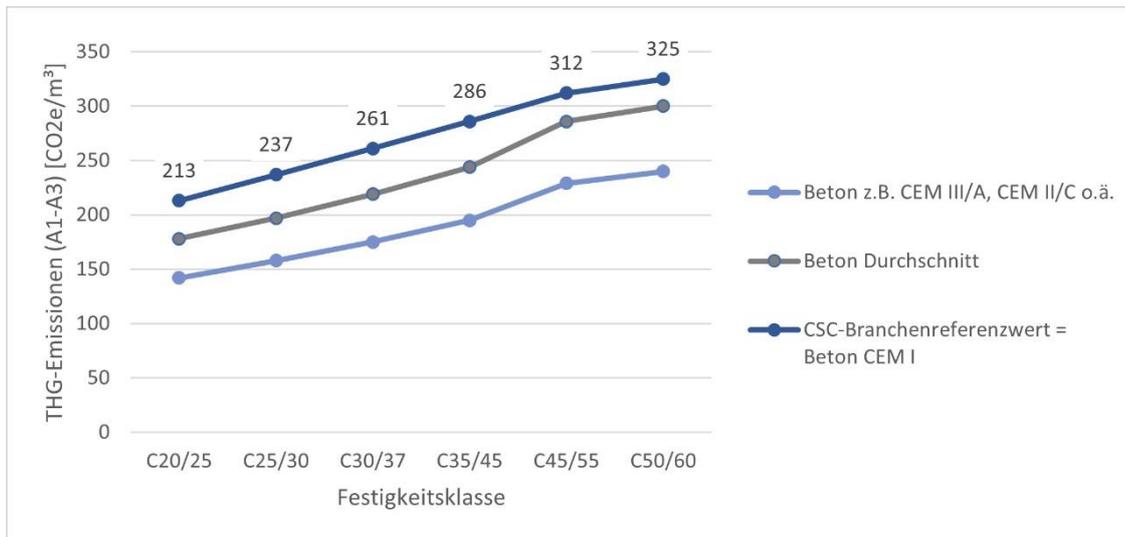


Abbildung 8 CSC-Branchenreferenzwerte und Orientierungswerte für THG-Emissionen bei der Betonherstellung, erstellt nach: (Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2022a, S. 14; Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), 2021)

Die Daten, die der DAfStb in der Planungshilfe „Nachhaltig bauen mit Beton“ als Orientierungshilfe angibt, stammen aus der ÖKOBAUDAT Version 2021-II vom 25.06.2021 (S.8) und sind konform zur DIN EN 15804+A1 (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, 2021). Sie entsprechen somit nicht der aktuell gültigen DIN EN 15804+A2 sind jedoch aufgrund der gemeinsamen Berechnungsgrundlage vergleichbar mit den CSC-Branchenreferenzwerten.

Nutzt man für die Ermittlung der Treibhausgas-Einsparpotentiale die durchschnittlichen Werte statt den Referenzwerten, sind diese geringer. Die Referenzwerte des CSC werden verwendet, um Ergebnisse dieser Arbeit direkt mit CSC-zertifizierten Produkten vergleichen zu können.

CSC-Zertifikate können in den Bewertungssystemen BREEAM und DGNB bereits anerkannt werden (vgl. Kapitel 9.4.1). Das zeigt, dass das CSC-Zertifizierungssystem bereits etabliert und glaubwürdig ist. (Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2022b, S. 37).

Im CO₂-Modul werden vier CO₂-Klassen unterschieden. CO₂-effiziente Betone werden abhängig von der Reduktion gegenüber den Referenzwerten in Level 1 bis 4 eingeteilt. Für Level 1 müssen um mind. 30 Prozent niedrigere THG-Emissionen nachgewiesen werden. Jedes weitere Level erfordert eine Emissionsreduktion um weitere 10 Prozent. (Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2022a, S. 14).

Die Einteilung in CO₂-Klassen vereinfacht die Ausschreibung und gewährleistet aufgrund einheitlicher Nachweise die Vergleichbarkeit zwischen Produkten. Wie die THG-Emissionen reduziert werden, ist dem Betonhersteller überlassen. Mögliche Maßnahmen werden in Kapitel 3.3 gezeigt.

3.2.3. Zulässige THG-Emissionen eines Tragwerks gemäß Entwurf der DAfStb-Richtlinie „Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton“

Die CSC-Branchenreferenzwerte werden auf Produktebene genutzt, während die zuvor beschriebenen generischen Datensätze der OBD 2023-I und Referenzwerte des Entwurfs der DAfStb-Richtlinie „Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton“ zur Ermittlung bzw. Einschätzung der Relevanz von THG-Einsparpotentialen auf Tragwerksebene verwendet werden.

Der Entwurf der DAfStb-Richtlinie stammt aus dem August 2023 und besteht aus „Teil 0: Grundlagen“ und „Teil 1: Deckenbauteile“. Bis zum 3. November desselben Jahres konnten Stellungnahmen abgegeben werden. Ziel der neuen Richtlinienreihe des DAfStb ist es „Anforderungen und Maßnahmen zu definieren, mittels derer die Einhaltung der international und national vorgegebenen Treibhausgasreduktionsziele bei der Errichtung von Tragwerken aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton“ sicher gestellt wird. Es werden zulässige THG-Emissionen für die Errichtung und Entsorgung von Tragwerken oder ihren Teilen definiert. Weil Deckenbauteile den größten Beitrag zum GWP eines Tragwerks leisten, stellt Teil 1 Anforderungen an Deckenbauteile. Weitere Richtlinienanteile für andere Tragwerkskomponenten sind geplant. (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb), 2023).

Die Nachweisführung erfolgt mithilfe des dimensionslosen Beiwertes $\alpha_{GWP,t}$:

Formel 1 Dimensionsloser Beiwert, entspricht Gl. 2 aus (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb), 2023)

$$\frac{\left(\frac{\Sigma \text{GWP}}{\text{funktionales Äq.}} \right)_{\text{Eco}}}{\left(\frac{\Sigma \text{GWP}}{\text{funktionales Äq.}} \right)_{\text{Ref}}} \leq \alpha_{\text{GWP},t}$$

Dieser setzt das entsprechend DIN EN 15804 zu ermittelnde GWP der Module A1 bis A3, C3 und C4 ins Verhältnis zu dem des Referenzjahrs 2020. Der zulässige Wert für

$\alpha_{GWP,t}$ sinkt entsprechend der Treibhausgasminderungsklasse jedes zweite Jahr, wodurch die notwendige Reduktion der THG-Emissionen steigt. Der Nachweis kann auf Tragwerks- oder Bauteilebene geführt werden. Alternativ kann nachgewiesen werden, dass die zulässigen Emissionen des Tragwerks der zum Zeitpunkt des Bauantrags gültigen Treibhausgasminderungsklasse aus der folgenden Tabelle eingehalten werden. (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb), 2023).

Tabelle 5 Zulässige Emissionen des Tragwerks nach Treibhausgas-Minderungsklasse, Tabelle A.1 aus (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb), 2023)

S	1	2	3	4	5
	Treibhausgas-Minderungsklasse TM_t	Gültigkeitszeitraum bis einschließlich zum Kalenderjahr	$\alpha_{GWP,t}$ [-]	Zulässige Emissionen des Tragwerks [kg CO _{2,e} / m ² _{BGF}]	
Wohngebäude				Nichtwohngebäude und Bürogebäude	
Z					
1	TM_{2020}	2020 ¹⁾	1	250	320
2	TM_{2024}	2024	0,75	188	240
3	TM_{2026}	2026	0,65	163	208
4	TM_{2028}	2028	0,56	140	179
5	TM_{2030}	2030	0,48	120	154
6	TM_{2032}	2032	0,42	105	134
7	TM_{2034}	2034	0,36	90	115
8	TM_{2036}	2036	0,31	78	99
9	TM_{2038}	2038	0,27	68	86
10	TM_{2040}	2040	0,23 ²⁾	58	74
11	TM_{2042}	2042	0,14 ²⁾	35	45
12	TM_{2044}	2044	0,05 ²⁾	13	16
13	TM_{2046}	2046	0 ²⁾	0	0

¹⁾ Referenzjahr
²⁾ ab 2040 linear abgemindert nach Vorgaben aus dem Klimaschutzgesetz (KSG). Zur Umsetzung des Reduktionspfades sind zusätzliche Maßnahmen erforderlich (z. B. CCS).

3.3. Maßnahmen zur Reduktion des Treibhauspotentials bzw. Ressourcenverbrauchs bei der Herstellung von Beton und normative Situation

Im Folgenden werden Maßnahmen zur Reduktion des Treibhauspotentials bzw. Ressourcenverbrauchs bei der Herstellung von Beton vorgestellt. Die normative Situation wird ebenfalls gezeigt. Um die THG-Emissionen zu senken, kann der Zementgehalt reduziert werden. Außerdem können klinkereffiziente Zemente oder alternative Bindemittel eingesetzt werden. Durch die Verlängerung des Nachweisalters kann das Nacherhärtungspotenzial von Beton zur indirekten Reduktion des Treibhauspotentials genutzt werden. Der Herstellungsprozess im Zementwerk kann optimiert werden, um die THG-Emissionen und den Ressourceneinsatz zu verringern. Primäre Gesteinskörnung kann durch rezykliertes Material ersetzt werden.

3.3.1. Einordnung von CO₂-effizientem und R-Beton in die normative Situation

Die üblichen Normen zur Bemessung, Konstruktion und Ausführung sind einzuhalten. Auch zum Beton selbst und seinen Ausgangsstoffen gelten die einschlägigen Regelwerke. Für R-Beton ist zusätzlich die DIN EN 4226-1 zu rezyklierter Gesteinskörnung zu beachten. Für Zement ist neben der DIN EN 197-1 auch die DIN EN 197-5 zu Zementen mit zwei weiteren Hauptbestandteilen neben Klinker zu berücksichtigen.

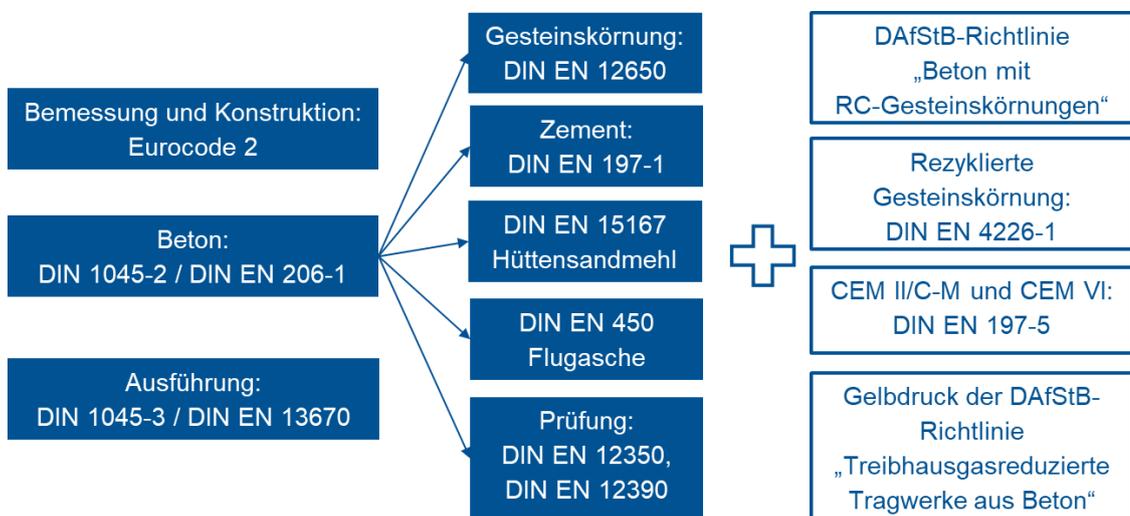


Abbildung 9 Überblick über die normative Situation; erstellt nach: (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2021a; Biscopig, Bosold, & Brunner, 2021), ergänzt

Bisher ist für Betone der CO₂-Klassen Level 3 und 4 bis auf wenige Ausnahmen eine Zustimmung im Einzelfall erforderlich (Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2021).

Gemäß Glock et al. hemmen die bestehenden Rahmenbedingungen in Deutschland eine Steigerung der Effizienz im Bauwesen (2023). Der DAfStb stellt eine Planungshilfe zum nachhaltigen Bauen mit Beton zur Verfügung. Diese unterstützt Planende, den Betonbau innerhalb der gültigen Regelwerke nachhaltig zu gestalten, „ohne auf klimagerechte Regelwerke warten zu müssen“ (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), 2021).

Auf einzelne Normen und Richtlinien wird in den folgenden Kapiteln eingegangen.

3.3.2. Maßnahmen während der Zementproduktion

Wie zuvor beschrieben resultiert der größte Anteil der THG-Emissionen der Betonherstellung aus der Produktion des Ausgangsstoffs Zement.

Zur Dekarbonisierung der Zementindustrie trägt die THG-Emissionsminderung in bestehenden Produktionsprozess durch die Steigerung der thermischen Energieeffizienz durch Abwärmenutzung, Brennstoffwechsel oder energieeffiziente Anlagenkomponenten bei. Jedoch ist das Reduktionspotential begrenzt. (Umweltbundesamt, 2020).

Diese Maßnahmen werden bereits umgesetzt. Im Jahr 2022 betrug der Anteil alternativer Brennstoffe durchschnittlich über 70 Prozent. Der thermische Effizienzgrad von Zementwerken ist im Vergleich zu anderen Industrien mit 70 bis 80 Prozent überdurchschnittlich hoch. (Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2023).

Der Einsatz von alternativen Bindemitteln (siehe Kapitel 3.3.5) und neue z.B. strombasierte Herstellungsprozesse bergen unbestimmtes Potenzial (Umweltbundesamt, 2020). Trotzdem bleiben rohstoffbedingte THG-Emissionen bei der Klinkerbrennung unvermeidbar (vgl. Kapitel 3.1).

Die CO₂-Abscheidung ist bisher das einzige Verfahren, das die direkte Freisetzung verhindert. Eine anschließende Nutzung (Carbon Capture and Utilization) des Kohlenstoffdioxids ist stofflich, physikalisch oder energetisch möglich. Die CO₂-Speicherung (Carbon Capture and Storage) ist ebenfalls umsetzbar und wird im europäischen Kontext diskutiert (Umweltbundesamt, 2020).

Um die Klimaneutralität des Bauwesens zu ermöglichen, müssen die prozessbedingten Emissionen der Zementproduktion vermieden werden (Bechmann & Weidner, 2023). Das gelingt gemäß VDZ nur mit Maßnahmen des CCUS (Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2023).

Bei der Klinkerherstellung können Ressourcen durch die Reduktion des Klinkerbedarfs (vgl. Kapitel 3.3.4) und die Verwendung von Betonbrechsand geschont werden. Betonbrechsand ist ein rezykliertes Material, das aus dem Abbruch von Betonbauwerken stammt und kann Primärrohstoffe wie Kalkstein ersetzen. Dadurch können unter bestimmten Randbedingungen 11 Millionen Tonnen Primärrohstoffe im Jahr ersetzt werden. Zukünftig werden die Ausgangsstoffe Hüttensand und Flugasche aufgrund der Dekarbonisierung der Energie- und Stahlwirtschaft deutlich knapper. Gemäß VDZ ist

der Ersatz durch Primärrohstoffe, vor allem kalzinierte Tone (siehe Kapitel 3.3.5), in einer Größenordnung von fünf Millionen Tonnen notwendig. Langfristig bleiben primäre Rohstoffe die Grundlage der Produktion von Zement und Beton. (Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2023).

In Deutschland sind 41 Zementwerke durch ein CSC-Zertifikat (vgl. Kapitel 3.2.2) in Silber, Gold oder Platin ausgezeichnet (CSC, 2023).

3.3.3. Senken des Zementgehalts

Durch das Senken des Zementgehalts, wird auch das Treibhauspotential der Betonherstellung reduziert. Um die Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen nicht zu gefährden, sind Mindestzementgehalte abhängig von den geforderten Expositionsklassen einzuhalten. Diese liegen zwischen 240 und 320 kg / m³ und werden im normativen Anhang F „Grenzwerte der Betonzusammensetzung“ der DIN 1045-2:2023-08 definiert. Unter Anrechnung von Zusatzstoffen fallen die Grenzwerte niedriger aus. Diese Anforderungen wurden für eine Nutzungsdauer von 50 Jahren festgelegt. (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2023).

Die Reduktion des Treibhauspotentials in Folge eines geringeren Zementgehalts ist abhängig von der Zementart. Eine Minderung um 40 kg Zement / m³ Beton spart bei CEM II ca. 30 kg CO₂-Äq. / m³ und beim weniger emissionsintensiven CEM III ca. 16 kg CO₂-Äq. / m³. (Fingerloos & Schachinger, 2022).

3.3.4. Einsatz klinkereffizienter Zemente

Die Zementklinkerbrennung ist wie zuvor beschrieben der emissionsintensivste Schritt der Zementproduktion.

Deswegen sind klinkereffiziente Zemente ein bedeutender Hebel zur THG-Emissionsminderung. Der Anteil des Zementklinkers wird durch teilweisen Ersatz mit anderen Ausgangsstoffen z.B. Flugasche, Hüttensand oder Kalkstein verringert. Dadurch werden indirekt prozessbedingte und brennstoffbedingte THG-Emissionen gesenkt. Gleichzeitig schont die Nutzung der Rohstoffe aus anderen Industriezweigen Ressourcen. Der durchschnittliche Klinkeranteil in Zement in Deutschland liegt bei 70 Prozent und soll bis 2045 auf ca. 53 Prozent gesenkt werden. (Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2023).

Die DIN EN 197-1 definiert die zulässigen Anteile der Haupt- und Nebenbestandteile verschiedener Normalzemente. Die Anzahl der geregelten Zementsorten hat in den letzten Jahren deutlich zugenommen, um eine weitere Reduktion des Klinkerfaktors zu ermöglichen. Während die DIN EN 197-1:2011-11 27 Normalzemente unterscheidet, sind es in der E DIN EN 197-1:2018-11 39 Normalzemente. Die Kompositzemente CEM VI sind neu hinzugekommen.

Tabelle 6 Zusammensetzung der Normalzemente CEM V und CEM VI, Teil der Tabelle 1 der E DIN 197-1:2018-11 (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2018)

Hauptarten	Bezeichnung der 39 Produkte (Normalzementarten)		Zusammensetzung (Massenanteile in Prozent ^a)										Nebenbestandteile	
			Hauptbestandteile											
			Klinker	Hütten-sand	Silica-staub	Puzzolan		Flugasche		Ge-brannter Schiefer	Kalkstein			
						natürlich	natürlich getempert	kiesel-säurereich	kalkreich		L	LL		
Produktname	Produktbezeichnung	K	S	D ^b	P	Q	V	W	T	L	LL			
CEM V	Hütten-sand-Puzzolan-Zement	CEM V/A	40-64	18-30	-	←----- 18-30 ----->		-	-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-49	-	←----- 31-49 ----->		-	-	-	-	-	0-5	
CEM VI	Komposit-zement ^c	CEM VI (S-P)	35-49	31-59	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM VI (S-V)	35-49	31-59	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5	
		CEM VI (S-L)	35-49	31-59	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM VI (S-LL)	35-49	31-59	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5

^a Die Werte in der Tabelle beziehen sich auf die Summe der Haupt- und Nebenbestandteile.
^b Der Anteil an Silicastaub ist auf 6 % bis 10 % begrenzt.
^c In den Portlandkompositzementen CEM II/A-M, CEM II/B-M und CEM II/C-M, in den Puzzolanzementen CEM IV/A und CEM IV/B, in den Hütten-sand-Puzzolan-Zementen CEM V/A und CEM V/B und in den Kompositzementen CEM VI müssen die Hauptbestandteile, außer Klinker, durch die Bezeichnung des Zements angegeben werden (Beispiele, siehe Abschnitt 8).

Die DIN 197-5:2021-07 regelt die Zusammensetzung von klinkereffizienten Portlandkompositzementen CEM II/C-M und Kompositzementen CEM VI, die neben dem Klinker zwei Hauptbestandteile enthalten. Bei CEM II/C-M kann der Klinkeranteil um die Hälfte reduziert werden, während CEM VI nur 35 Prozent Zementklinker enthalten muss. (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2021).

Der Einsatz von CEM II/C-M war zuvor mit einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung möglich (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), 2021). Die Verfügbarkeit von Hütten-sand und Flugasche ist begrenzt, weshalb die Kombination mit Kalkstein in CEM II/C-Zementen den Einsatz begünstigt (Müller, 2023).

Die Anwendungsbereiche für Zemente in Beton regeln die DIN EN 206:2013+A2:2021 und die DIN 1045-2:2023-08. Die Hochofenzemente CEM III/A und CEM III/B sind in allen Expositionsklassen verwendbar, wobei für XF4 bestimmte Anforderungen gestellt werden (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2023). Diese Zementarten ermöglichen eine Reduktion des GWP um die Hälfte (vgl. Abbildung 10).

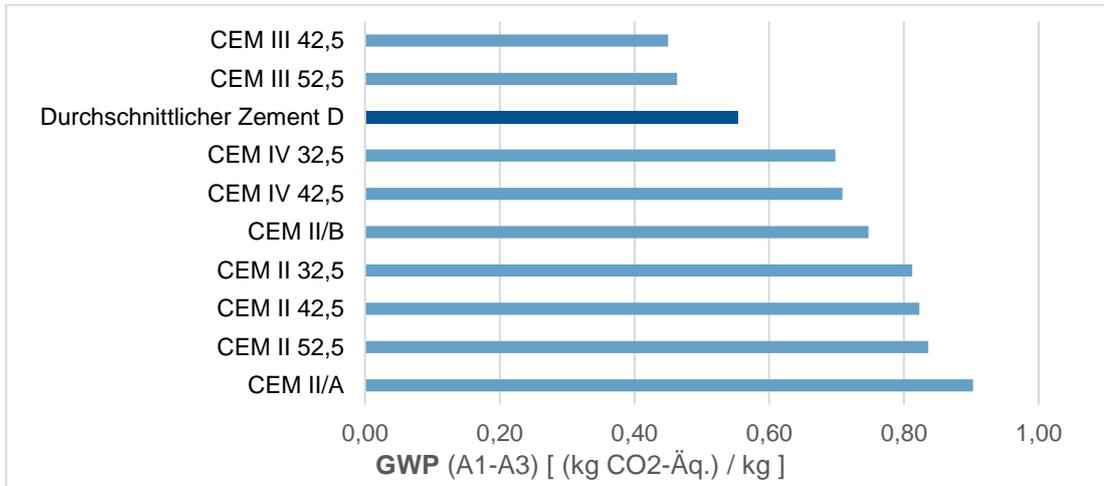


Abbildung 10 Treibhauspotentiale der Produktion verschiedener Zementarten, erstellt nach: OBD 2023-1 (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023)

Auch die Zementart CEM VI ist gemäß Tabelle F.5 der DIN 1045-2:2023-08 in allen Expositionsklassen einsetzbar. Die Portlandkompositzemente CEM II/C-M mit drei Hauptbestandteilen sind nicht für die Expositionsklassen XF2 bis XF4 geeignet (vgl. Tabelle 7).

Für Innen- und Außenbauteile (XC1-4, XF1) des üblichen Hochbaus können CEM II/C-M-Zemente verwendet werden. Außerdem ist es in Deutschland üblich die Eignung einer Zementsorte für weitere Expositionsklassen durch eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung nachzuweisen. (Müller, 2023).

Tabelle 7 Anwendungsbereiche für CEM-II-M-Zemente mit drei Hauptbestandteilen, Ausschnitt aus Tabelle F.4 der DIN 1045-2:2023-08 (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2023)

Expositionsklassen	X = gültiger Anwendungsbereich — = für die Herstellung nach diesem Dokument nicht anwendbar	Kein Korrosions-/Angriffsrisiko	Bewehrungskorrosion									Betonangriff						Umsetzung der EN 206:2021 für die Betonklasse BK-E	Spannstahlverträglichkeit ^f							
			durch Karbonatisierung verursachte Korrosion					durch Chloride verursachte Korrosion				Frostangriff				Aggressive chemische Umgebung				Verschleiß						
			XC1	XC2	XC3	XC4	XC5	XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3	XF1	XF2	XF3	XF4			XA1	XA2 ^b	XA3 ^b	XM1	XM2	XM3	
B	S-D; S-T; D-T; S-V ^d ; V-T ^d	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	S-P; S-Q; D-P; D-V ^d ; D-Q; P-T; P-Q; P-V ^d ; Q-V; Q-T	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	—	X	—	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X ^c
	S-LL ^e ; V-LL ^e ; T-LL ^e	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	—	—	—	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X ^c
	S-L; D-L; P-L; Q-L; V-L ^d ; T-L	X	X	X	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	X ^c
C	S-L	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	—	—	—	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X ^c

^a Sollen Zemente, die nach dieser Tabelle nicht anwendbar sind, verwendet werden, bedürfen sie einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung.

^b Bei chemischem Angriff durch Sulfat (ausgenommen bei Meerwasser) muss oberhalb der Expositionsklasse XA1 ein Zement mit hohem Sulfatwiderstand nach 5.3.2 verwendet werden. Zur Herstellung von Beton mit hohem Sulfatwiderstand darf bei einem Sulfatgehalt des angreifenden Wassers von $SO_4^{2-} \leq 1500 \text{ mg/l}$ anstelle von SR-Zement eine Mischung aus Zement und Flugasche verwendet werden (siehe 5.2.5.2.2).

^c Zemente, die P bzw. Q enthalten, sind ausgeschlossen, da sie bisher für diesen Anwendungsfall nicht überprüft wurden.

^d Zemente zur Herstellung von Beton nach der vorliegenden Norm dürfen nur Flugaschen mit bis zu 5 % Glühverlust enthalten.

^e Der zulässige Kalksteingehalt der Zemente (S-LL), (V-LL) und (T-LL) ist auf 20 M.-% begrenzt. Die Einhaltung des maximal zulässigen Kalksteingehaltes ist durch den Hersteller des Zements zu erklären.

^f Spannbeton ist der Betonklasse BK-E zugeordnet.

3.3.5. Einsatz alternativer Bindemittel

Das Potenzial neuartiger Bindemittel ist gemäß Umweltbundesamt bisher unbestimmt (2020). Die Forschung beschäftigt sich mit alternativen Bindemitteln z.B. aus Magnesiumsilikaten, kalziniertem Ton, Puzzolanen oder Betonmehl (Bechmann & Weidner, 2023). Calcium-Sulfoaminat-Zemente (CSA-Zemente) und Calciumhydrosilicate (CHS) weisen im Vergleich zu heutigem Zement mit einem Klinkerfaktor von ca. 0,7 eher geringe THG-Einsparpotentiale auf (Müller, 2023). Bisher ist Portlandzementklinker jedoch als Hauptbestandteil von Zement für Beton vorgeschrieben (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2023).

3.3.6. Verlängerung des Nachweisalters von Beton

Die Betondruckfestigkeit wird üblicherweise nach 28 Tagen geprüft. Durch eine spätere Prüfung nach 56 oder 91 Tagen kann die Nacherhärtung genutzt werden, um entweder die Zementmenge (vgl. Kapitel 3.3.3) oder den Klinkeranteil (vgl. Kapitel 3.3.4) zu reduzieren (Fingerloos & Schachinger, 2022). Indirekt werden so brennstoff- und prozessbedingte Emissionen der Zementproduktion eingespart.

Das Potenzial der Nacherhärtung von Beton beträgt abhängig von der Zementart ungefähr 10 bis 15 Prozent. Die Zementmenge die maximal eingespart werden kann liegt zwischen 60 und 70 kg / m³ und wird bei Beton mit einer A-Sieblinie der Konsistenz F3 erreicht. Das Nachweialter kann projektspezifisch festgelegt werden. Nur die Betondruckfestigkeitsklasse wird normativ über die Prüfung nach 28 Tagen definiert. Begrenzt wird die Verlängerung des Prüfalters durch mögliche Bauzeitverlängerungen. Wird ein Nachweialter von 56 oder 91 Tage gewählt, resultieren langsam bis sehr langsam erhärtende Betone. (Fingerloos & Schachinger, 2022).

Die langsamere Festigkeitsentwicklung hat erhebliche Auswirkungen auf den Bauablauf, die in Kapitel 7.3 behandelt werden.

3.3.7. Ersatz von primärer Gesteinskörnung durch rezykliertes Material

Um natürliche Ressourcen zu schonen, kann primäre Gesteinskörnung durch rezyklierte Gesteinskörnung ersetzt werden. Auf die THG-Emissionen der Betonherstellung hat der Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung kaum Einfluss (Bechmann & Weidner, 2023).

Das Kreislaufwirtschaftsgesetz betrifft auch die Bauplanung und -ausführung. Dieses schreibt eine möglichst hochwertige Verwertung von unvermeidbaren Abfällen vor, um Ressourcen zu schonen (Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI), 2019). Reiner Betonbruch wird deutschlandweit fast vollständig recycelt. Bauschutt, der neben Beton andere mineralische Bestandteile aufweist, wird zu fast 90% verwertet. Das Recyclingmaterial findet kaum Einsatz in der Betonproduktion, sondern wird größtenteils im Straßenbau eingesetzt (Biscopig, Bosold, & Brunner, 2021). Im Sinne des Materialkreislaufs ist die Wiederverwendung von Abbruchmaterial als recycelte Gesteinskörnung in Beton der üblichen niedrigerwertigen Verwendung im Straßenbau vorzuziehen.

Die DAfStB-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit recycelten Gesteinskörnungen nach DIN EN 1260 – Teil 1“ beschreibt Anforderungen an Beton, bei deren Einhaltung eine konventionelle Bemessung nach DIN EN 1992-1-1 erfolgen darf. Im Anwendungsbereich der DAfStB-Richtlinie liegt Beton bis einschließlich der Festigkeitsklasse C30/37. Die zulässigen Anteile von Sekundärmaterial sind in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen festgelegt (siehe Tabelle 8). Neben dem Anwendungsbereich werden auch zwei Typen von RC-Gesteinskörnung definiert (Deutsches Institut für Normung, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 2010).

Recycelte Gesteinskörnungen für Beton sind in DIN EN 4226-1 geregelt. Der Typ 1 wird auch als Betonsplitt bezeichnet und enthält mindestens 90 Masse-Prozent Beton oder Naturstein. Der Typ 2, auch Bauwerkssplitt genannt, darf bis zu 30 Masse-Prozent aus Nebenanteilen wie Kalksandstein oder Ziegel bestehen. Die Verwendbarkeit von Recyclingmaterial in Beton hängt unter anderem von dessen Reinheit ab. Im Vergleich zu primärer GK haben recycelte GK eine geringere Rohdichte. Zusätzlich kann diese wegen variierender Zusammensetzungen größeren Schwankungen unterliegen. (Biscopig, Bosold, & Brunner, 2021).

Recycelte Gesteinskörnung muss auch abfallrechtlichen Anforderungen genügen (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), 2021).

Zu beachten ist auch die Berichtigung der DAfStB-Richtlinie aus dem Jahr 2019. Aufgrund neuer Forschungsergebnisse wurde die Einordnung von recycelter Gesteinskörnung in Alkaliempfindlichkeitsklassen angepasst. Diese reichte zuvor nicht zur Vermeidung der schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion aus. Außerdem wurden die Normenteile 101 und 102 der DIN 4226, die Regelungen für Nachweise der Um-

weltverträglichkeit der rezyklierten Gesteinskörnung beinhalten, ergänzt (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 2019).

Tabelle 8 Zulässige Anteile rezyklierter Gesteinskörnungen > 2mm, bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung (Vol.-%); Tabelle 5 aus (Deutsches Institut für Normung, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton , 2010)

Spalte	1	2	3	4
Zeile	Anwendungsbereich		Kategorie der Gesteinskörnung	
	Alkalirichtlinie	DIN EN 206-1 und DIN 1045-2	Typ 1	Typ 2
1	WO (trocken)	Karbonatisierung XC1	≤ 45	≤ 35
2	WF ^{a)} (feucht)	Kein Korrosionsrisiko X0 Karbonatisierung XC1 bis XC4		
3		Frostangriff ohne Taumittleinwirkung XF1 ^{a)} und XF3 ^{a)} und in Beton mit hohem Wassereindringwiderstand	≤ 35	≤ 25
4		Chemischer Angriff (XA1)	≤ 25	≤ 25

^{a)} zusätzliche Anforderungen s. Abschnitt 1, (3) und (4).

Der DAfStb hat angekündigt, größere Austauschmengen aufzunehmen und weitere GK-Typen zu definieren (Kiltz & Voland, 2022).

Der Anhang E.3 der neuen DIN 1045-2:2023-08 regelt die Verwendung von rezyklerten Gesteinskörnungen. Wie die DAfStb-Richtlinie ermöglicht dieser die Bemessung nach Eurocode 2 beim Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung in Beton bis einschließlich der Festigkeitsklasse C30/37. Die maximal zulässigen Anteile sind ebenfalls abhängig von den Expositionsklassen und der Feuchtekategorie zu bestimmen (siehe Tabelle 9). (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2023).

Der Anwendungsbereich wurde im Vergleich zur DAfStb-Richtlinie um Zeile 7 in der folgenden Tabelle erweitert.

Tabelle 9 Zulässige Anteile grober rezyklierter Gesteinskörnungen in Bezug auf die gesamte Gesteinskörnung [Vol.-%], Tabelle E.5 aus DIN 1045-2:2023-08 (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2023)

	1	2	3	4
	Anwendungsbereich		Kategorie der Gesteinskörnung	
	Alkalirichtlinie ^a	DIN EN 206 und DIN 1045-2	Typ 1	Typ 2
1	WO	Karbonatisierung XC1	≤ 45 ^b	≤ 35
2	WF	Kein Korrosionsrisiko X0		
3		Karbonatisierung XC1 bis XC4	≤ 45	≤ 35
4		Frostangriff ohne Taumittleinwirkung XF1 und XF3	≤ 25	≤ 25
5		Beton mit hohem Wassereindringwiderstand nach 5.5.3		
6		Chemischer Angriff XA1 ^d		
7	WA ^c	XD1 und XD2 XS1 und XS2 XF2 und XF4	≤ 30	≤ 20

^a Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktionen im Beton (DAfStb-Alkali-Richtlinie) sowie zusätzliche Anforderungen siehe E.3.1.3.

^b Es dürfen feine rezyklierte Gesteinskörnungen des Typs 1 ≤ 20 % Volumenanteil der austauschbaren rezyklierten Gesteinskörnung eingesetzt werden, sofern sie aus einer Produktion der verwendeten groben rezyklierten Gesteinskörnung stammen, für die die Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung nach DIN EN 933-11 nachgewiesen wurde. Der Anteil der feinen rezyklierten Gesteinskörnung bezogen auf den Anteil der groben rezyklierten Gesteinskörnung darf dabei nicht größer sein, als der Anteil der gesamten feinen Gesteinskörnung bezogen auf den Anteil der gesamten groben Gesteinskörnung.

^c Die Feuchtigkeitsklasse WA darf nur für rezyklierte Gesteinskörnung mit nachgewiesener Alkaliempfindlichkeitsklasse E I-S nach DAfStb-Alkali-Richtlinie verwendet werden.

^d Die Regelung zum chemischen Angriff ist für XA1 durch die Betonklasse BK-N abgedeckt.

Eine Substitution von mehr als 45 Volumen-Prozent der gesamten Gesteinskörnung durch Sekundärmaterial ist normativ nicht möglich und erfordert eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder Zustimmung im Einzelfall (Biscopig, Bosold, & Brunner, 2021).

Die Verfügbarkeit von R-Beton wurde auf Grundlage von Preislisten und Produktverzeichnissen erarbeitet, die vor der neuen DIN 1045-2 veröffentlicht wurden. Deswegen entsprechen die verfügbaren R-Betone (siehe Kapitel 5.3) den Vorgaben der DAfStb-Richtlinie. Folglich wurde der maximal substituierbare Anteil der rezyklierten Gesteinskörnung nach derselben Richtlinie (vgl. Tabelle 8) für die Varianten des Tragwerks des Beispielprojekts in Kapitel 6.2 ermittelt. Die neue DIN 1045er-Reihe ist erst im Laufe der Bearbeitungszeit dieser Masterarbeit erschienen. Der nach Anhang E der DIN 1045-2:2023-08 maximal substituierbare Anteil (vgl. Tabelle 9) wird nur für die Betrachtung des Ressourceneinsparpotentials in Kapitel 6.2.2 ermittelt.

4. Einfluss der Ed. Züblin AG – Direktion Bayern als ausführende Firma

Um den Einfluss der Ed. Züblin AG als ausführende Firma einzuschätzen, wurde ein Projektvergleich hinsichtlich des Treibhauspotentials des Rohbaus (siehe Kapitel 2.4) und Betoneinsatzes durchgeführt. Die Betrachtung der Rohbau-Hauptmengen ist ausreichend, weil Beton vorwiegend in tragenden Bauteilen eingesetzt wird. Die Bilanzen befinden sich in Anhang 5. Die folgenden fünf Hochbauprojekte der Direktion Bayern werden verglichen:

Tabelle 10 Beschreibung und Kennzahlen der betrachteten Projekte der Ed. Züblin AG

Nr.	Projekt	Nutzung	BRI [m ³]	BGF [m ²]	Beschreibung
B1	DonauTower (Variante 2, vgl. Kapitel 2.3)	vorwiegend Büro, Gewerbe, Tiefgarage	85.500	20.160	Neubau eines innerstädtischen Büro- und Geschäftsgebäudes; Höhe: ca. 57m; knapp 15.000m ² Nutzfläche (vgl. Kapitel 6.1.1)
B2	Neubau in Skelettbauweise	Büro	k.A.	63.600	Innerstädtisches Bürogebäude mit zwei Untergeschosse, Erdgeschoss und sechs Obergeschossen
W/B1	Neubau in Holzhybridbauweise	Büro, Wohnen, Tiefgarage	71.600	20.300	innerstädtischen Büro- und Wohngebäudes in Holz-Hybrid-Bauweise mit dreigeschossiger Tiefgarage
W1	Neubau eines Mehrfamilienhauses	Vorwiegend Wohnen, Tiefgarage	9.130	2.390	17 Wohneinheiten, 1 Geschäftsfläche + 20 Einzelstellplätze
S1	Neubau mit aufwändiger Architektur	Büro, Kinderkrippe	7.740	1.480	Zweigeschossig, Architektur mit vielen gebogenen Flächen

Auffällig ist, dass im Projekt W1 nur Beton der Festigkeitsklasse C20/25 verwendet wurde. Im Projekt B2 wurden die Bodenplatten und einige Außenwände des zweiten Untergeschosses aus Beton mit langsamer Festigkeitsentwicklung erstellt. Das ist eine für CO₂-effizienten Beton typische Eigenschaft (siehe Kapitel 5.2.1 und 7.3), jedoch liegen keine spezifischen Daten zum GWP der verwendeten Betonrezeptur vor.

Das Betonvolumen je Brutto-Rauminhalt liegt zwischen 14 und 22 Prozent. Mit 18 Prozent liegt der Kennwert für den Neubau in Holzhybridbauweise (W/B 1) im Durch-

schnitt und ist damit unerwartet hoch. Die Hauptursache ist die dreigeschossige Tiefgarage in Stahlbetonbauweise. Deswegen beträgt der Anteil des Holzvolumens am BRI nur vier Prozent.

Tabelle 11 Beton- und Holzvolumen je BRI

Kennwert	B1	B2	W/B1	W1	S1
Beton / BRI [m ³ / m ³]	0,140	k.A.	0,177	0,143	0,222
Holz / BRI [m ³ / m ³]	0	k.A.	0,041	0	0

Baustahl wurde in allen fünf Projekten nur in geringen Mengen verwendet. Die folgende Abbildung 11 zeigt, dass der Beton mit 62 bis 71 Prozent, den größten Anteil des Treibhauspotentials der Erstellung und Entsorgung des Rohbaus verursacht. Der darin eingebaute Betonstahl verursacht 35 bis 38 Prozent des GWPs.

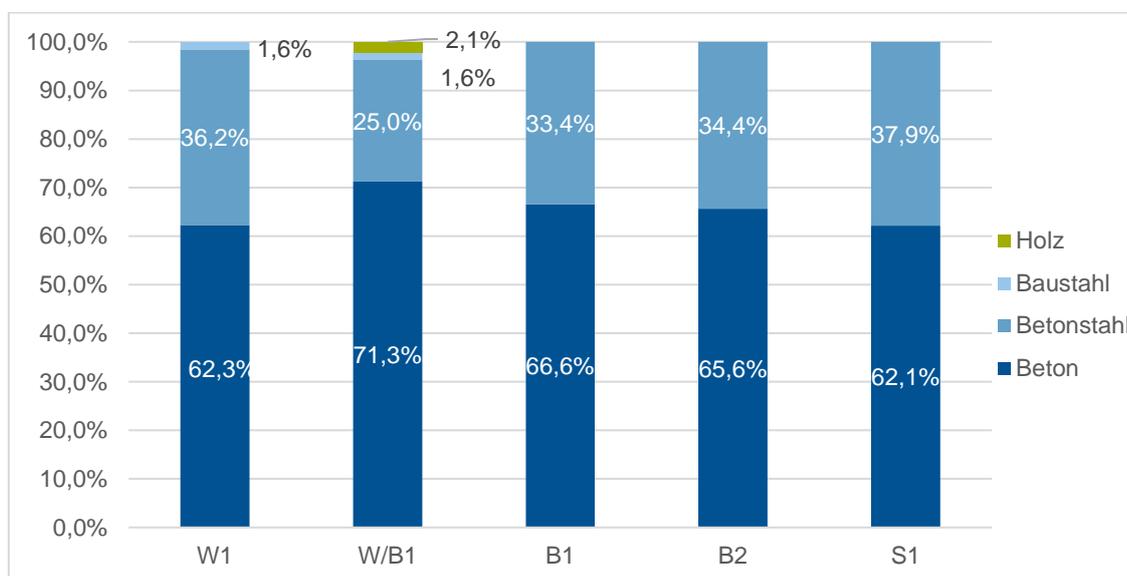


Abbildung 11 Anteile der Baustoffe am GWP des Rohbaus (A1-A3, C3, C4)

Bezieht man das GWP der Errichtung und Entsorgung des Rohbaus auf die Brutto-Grundfläche des jeweiligen Projekts, ergeben sich für die Gebäude, die vorwiegend zum Wohnen oder als Büro genutzt werden, ähnlich große Werte (vgl. Abbildung 12). Das Treibhauspotential je BGF des Projekts S1 ist mehr als doppelt so groß. Grund dafür ist nicht die Mischnutzung als Büro und Kinderkrippe, sondern die zweigeschos-

sige aufwändige Architektur. Aus dieser resultiert ein hoher Materialeinsatz (siehe Tabelle 11) bei vergleichsweise niedriger BGF (siehe Tabelle 10).

Zu beachten ist, dass es sich bei B1 bereits um eine teilweise optimierte Variante des Rohbaus des DonauTowers handelt. Das Bürogebäude B2 hat das geringste GWP je BGF, weil es in Skelettbauweise errichtet ist. Auch hier schneidet der Neubau in Holzhybridbauweise (W/B 1) aufgrund der dreigeschossigen Tiefgarage in Stahlbetonbauweise nicht besser ab als die anderen Büro- und Wohngebäude. Erst bei der Betrachtung des Gesamtgebäudes wirkt sich die Holzbauweise der Fassade positiv aus.

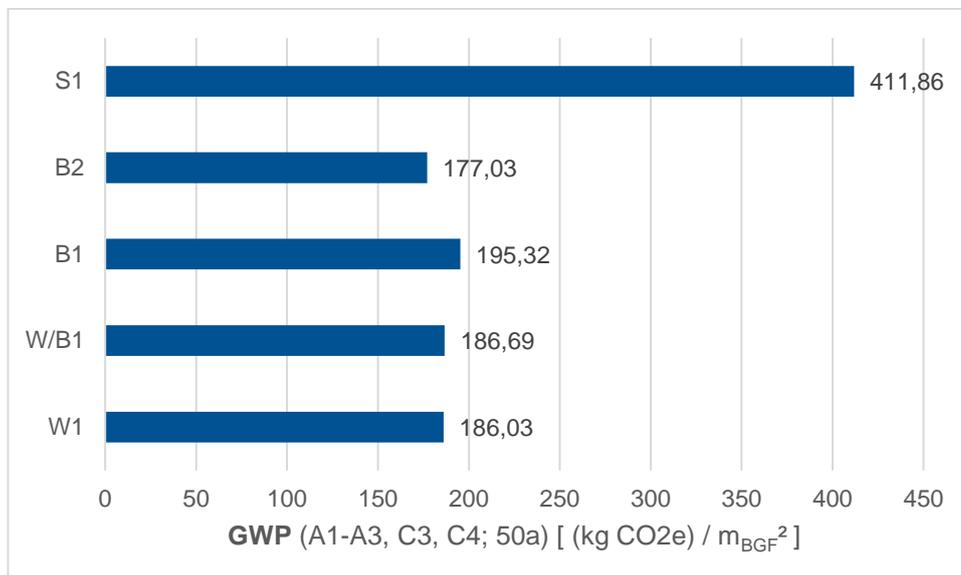


Abbildung 12 Treibhauspotentiale je Brutto-Grundfläche

Der Projektvergleich zeigt, dass Beton in großen Mengen verbaut wird und den größten Anteil am Treibhauspotential der Errichtung und Entsorgung des Rohbaus hat. Die Wahl des Baustoffs und Tragwerksoptimierung hinsichtlich des Materialeinsatzes liegen zumeist nicht im Einflussbereich der Bauausführenden. In Kapitel 3.3 wurden technologisch und normativ mögliche Maßnahmen zur Optimierung des Ressourcenverbrauchs und Treibhauspotentials von Beton beschrieben. Die Ed. Züblin AG kann in der Rolle als Ausführende bewusst ökologisch-nachhaltigen Transportbeton nachfragen, um Einfluss auf das Angebot der Hersteller zu nehmen und die Umweltwirkung von Hochbauprojekten, die sie ausführt, zu verringern. Dazu werden im Folgenden Hersteller von CO₂-effizientem und R-Beton in Bayern identifiziert und die Verfügbarkeit entsprechender Produkte ausgewertet.

5. Verfügbarkeit von CO₂-effizientem und R-Beton in Bayern

Im Rahmen der Masterarbeit wurde untersucht, von welchen Herstellern und für welche Einsatzbereiche CO₂-effizienter und R-Beton in Bayern derzeit erhältlich ist. Die Ergebnisse der Internetrecherche (vgl. Kapitel 2.2.1) werden in Anhang 1.1 zusammengefasst und im Folgenden in Kombination mit den anonymisierten Antworten von Transportbetonherstellern auf den Fragebogen (Anhang 3.1) ausgewertet. Die Übersicht erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Außerdem entwickeln Transportbetonwerke ihr Angebot ständig weiter. Darauf können Baufirmen durch gezielte Nachfrage Einfluss nehmen (vgl. Kapitel 2.1). Deswegen wurde eine Methode zur Ermittlung der aktuellen, regionalen Verfügbarkeit von CO₂-effizientem und R-Beton entwickelt. Anschließend werden die Nettopreise für CO₂-effizienten und R-Beton denen für Standardbeton und dem Treibhausgas- bzw. Ressourceneinsparpotential gegenübergestellt. Die Aufpreise für CO₂-effizienten Beton werden mit Klimakosten und Preisen für CO₂-Zertifikate verglichen.

5.1. Auswertung, Optimierung und Empfehlung zur zukünftigen Nutzung des Fragebogens

Der in Kapitel 2.2.2 beschriebene Fragebogen wird ausgewertet und zur zukünftigen Nutzung bei der Ed. Züblin AG optimiert. Schließlich wird eine Methode zur projektspezifischen Ermittlung der Verfügbarkeit empfohlen.

5.1.1. Auswertung des Fragebogens zu umweltrelevanten Daten und alternativen Sorten von Transportbeton

Der Fragebogen wird ca. zwei Monate nach seiner Veröffentlichung für diese Arbeit ausgewertet. Die folgende Tabelle 12 gibt einen Überblick über den Rücklauf bis zum 22. Dezember 2023. Direkte Zitate von Empfängern sind mit Anführungszeichen gekennzeichnet.

Innerhalb der ersten zwei Monate sind nur acht Antworten eingegangen, weil viele Firmen erst zu SPS registriert oder neue Ansprechpartner (z.B. aus dem Qualitätsma-

nagement oder Nachhaltigkeitsbeauftragte der Unternehmen) hinterlegt werden müssen und / oder Schwierigkeiten mit der Nutzung des Portals haben.

Einige Absagen sind darauf zurückzuführen, dass kleinen Unternehmen oft Anreize und Mittel zur Umsetzung von Innovationen fehlen (Glock, et al., 2023).

Tabelle 12 Rücklauf des Fragebogens bis einschließlich 22. Dezember 2023

Angefragt	Beantwortet	offen / im Austausch	Abgesagt	Grund
34	8	21	5	
			1	Dublette in SPS
			1	kein Werk in Bayern
		4		falscher Ansprechpartner in SPS hinterlegt
		2		Schwierigkeiten mit SPS
			1	Anfrage "so nicht beantwortbar"
			1	"zu aufwändig"; "Mittelständler"
		2		Anfrage herstellerintern weitergeleitet
		3	1	zuständige Person länger nicht im Haus (Urlaub, Krankheit)
		10		keine Zu-/Absage trotz mehrfachem Kontakt

In Anhang 3.1 sind die Antworten der Hersteller A bis G zusammengefasst. Hersteller H wird nicht berücksichtigt, weil als Antwort nur die aktuelle Preisliste abgegeben wurde. Im Folgenden werden die Treibhauspotentiale der Standardbetonsorten, allgemeine Angaben zu ökologisch-nachhaltigen Alternativen und die CSC-Zertifizierung ausgewertet. Die restlichen Ergebnisse der Umfrage werden in den entsprechenden Teilen der Kapitel 5 und 9 behandelt.

[1] Umweltwirkung

Abbildung 13 Überschrift des ersten Abschnitts, Anhang 2.1

Die Hersteller B, D und G nutzten das zur Verfügung gestellte Formular zur Berechnung der THG-Emissionen Ihrer Standardprodukte. Hersteller C, E und F gaben Selbstdeklarationen zur Umweltwirkung Ihrer Standardprodukte ab. Hersteller C teilte zusätzlich mit, dass im Auftragsfall Selbstdeklarationen für die gelieferten Betonsorten erstellt werden können. Die Angaben stammen teilweise von einem Standort, teilweise handelt es sich um Mittelwerte mehrerer Standorte. Zu den Unternehmen gehören jeweils ein bis fünf Werke, wobei zwei Unternehmen Teil einer größeren Gruppe sind. Insgesamt sind die sieben Hersteller an 23 Standorten vertreten. Hersteller A und B verwenden in allen Werken identische Ausgangsstoffe, während die anderen Hersteller verschiedene Lieferanten haben.

Das Treibhauspotential von einem Kubikmeter Standardbeton steigt mit zunehmender Festigkeitsklasse. Die spezifischen Werte für einen C25/30 (XC4 XF1 XA1, Größtkorn 16mm, F3) liegen je nach Hersteller zwischen 156 und 184 kg CO₂-Äq. / m³. Am wenigsten variieren die Werte für den abgefragten Beton der Festigkeitsklasse C35/45 (XC4 XF2+XF3 XA2 XD2, Größtkorn 16mm, F3). Diese liegen zwischen 191 und 209 kg CO₂-Äq. / m³. Dazwischen liegen die Werte des C30/37 (XC4 XF1 XA1, Größtkorn 16mm, F3).

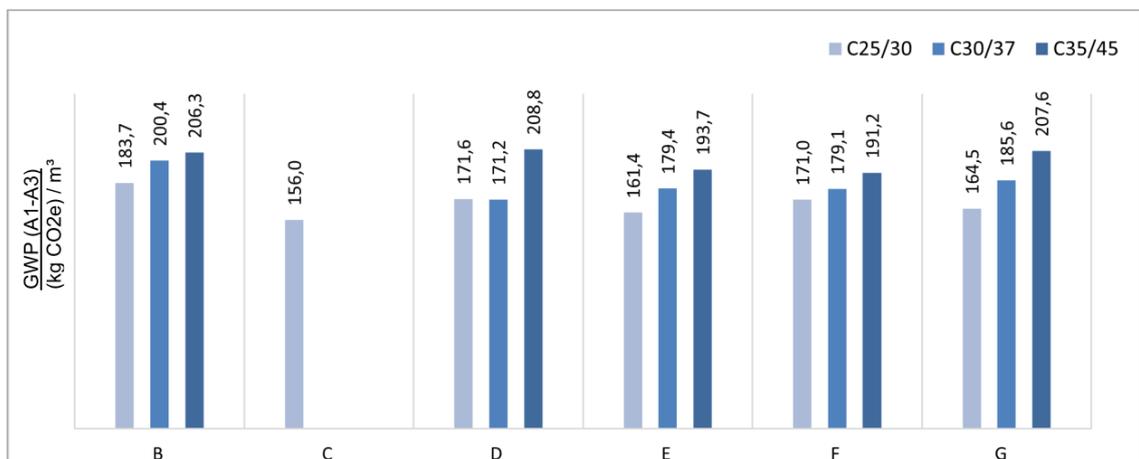


Abbildung 14 GWP der Standardbetonsorten der Hersteller B bis G, Anhang 3.1

Die folgende Tabelle 13 setzt die spezifischen Herstellerangaben ins Verhältnis zu den CSC-Branchenreferenzwerten. Die Standardsorten liegen 22 bis 34 Prozent unterhalb

der Branchenreferenzwerte des CSC. Damit erreichen die markierten Betone die CO₂-Klasse Level 1 (vgl. Kapitel 3.2.2).

Tabelle 13 GWP der Standardbetonsorten der Hersteller B bis G und Bezug auf die CSC-Branchenreferenzwerte, Anhang 3.1 und (Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2022a)

Hersteller	GWP [kg CO ₂ e / m ³] (A1-A3)			Reduktion um ... in Bezug auf die CSC-Branchenreferenzwerte		
	C25/30	C30/37	C35/45	C25/30	C30/37	C35/45
B	183,74	200,38	206,33	22%	23%	28%
C	155,99	-	-	34%	-	-
D	171,59	171,16	208,84	28%	34%	27%
E	161,40	179,40	193,70	32%	31%	32%
F	170,99	179,08	191,22	28%	31%	33%
G	164,47	185,57	207,58	31%	29%	27%
CSC-Branchenreferenzwerte	237,00	261,00	286,00			

[2] Ökologisch-nachhaltige Alternativen in der Produktgruppe
Beton

Abbildung 15 Überschrift des zweiten Abschnitts, Anhang 2.)

Sechs der sieben Hersteller, die den Fragebogen bisher ausgefüllt haben, bieten CO₂-reduzierte Betonsorten an. Auch R-Betone bieten sechs Hersteller an. Die Entwicklung von CO₂-reduzierten und Recycling-Produkten wird in den meisten Unternehmen gefördert. Hersteller C gibt an, die Entwicklung von klimaneutralen Produkten zu fördern. Je nach Unternehmen werden verschiedene Maßnahmen zur Reduktion von THG-Emissionen umgesetzt. Dabei fällt auf, dass keiner der Hersteller CO₂-Abscheidung oder -Speicherung nutzt (vgl. Kapitel 3.3.2). Aufpreise für eine Zementänderung z.B. zu CEM III wurden jeweils von einem Transportbetonhersteller mit 3, 7 und 9,5 Euro pro Kubikmeter beziffert (vgl. Frage [2.4] in Anhang 3.1).

5.1.2. Optimierung des Fragebogens zu umweltrelevanten Daten und alternativen Sorten von Transportbeton

Anhand der Antworten und Rückmeldung der Empfänger wird der Fragebogen (Anhang 2.1) wie folgt optimiert, bevor er als Vorlage in der Einkaufsplattform der STRABAG (siehe Kapitel 2.2.2) hinterlegt wird.

Die Fragen [3.8] und [4.9] zu Preisschwankungen für ökologisch-nachhaltige Alternativen zu Standardbeton entfallen. Stattdessen können Nettoaufpreise mithilfe von zusätzlichen Positionen im Leistungsverzeichnis projektspezifisch angefragt werden (siehe Abbildung 26). In Frage [2.4] sollte abhängig von den individuellen Anforderungen eines Projekts nach bestimmten Zementsorten gefragt werden.

Folgende Frage wird ergänzt:

[1.5] Können im Auftragsfall Selbstdeklarationen für alle gelieferten Betonsorten erstellt werden?

Die Rückmeldung auf die Fragen [3.6] und [4.6] zu Produkteigenschaften, Verfügbarkeit und Aufpreisen war sehr gering. Grund dafür ist die Excel-Tabelle, die erst heruntergeladen werden, dann ausgefüllt und schließlich ins Portal zurück geladen werden muss. Deswegen werden die beiden Tabellen durch Fragen mit Freitextantworten teilweise ersetzt. Die Produkteigenschaften werden weniger umfangreich abgefragt. Projektspezifische Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich der THG-Emissionen der Produkte und den Anteilen an Sekundärmaterial rücken in den Fokus. Diese Anpassung ist wichtig, weil die verfügbaren Produkte zwar relevante THG- bzw. Ressourceneinsparpotentiale aufweisen, aber die technologischen und normativen Möglichkeiten nicht voll ausschöpfen (vgl. Kapitel 3.3). Die Verfügbarkeit in einzelnen Werken wird weiterhin berücksichtigt. Nettopreise und Aufpreise werden wie zuvor beschrieben durch Positionen in Leistungsverzeichnissen der Angebotsanfrage abgedeckt. Folgende Fragen ersetzen die Fragen [3.6] und [4.6]:

- [3.6] Ist eine projektspezifische Optimierung der Betonsorten hinsichtlich der THG-Emissionen während der Herstellung möglich?
- [3.8] In welchen Ihrer Werke sind CO₂-reduzierte Produkte dauerhaft und in welchen auf Anfrage erhältlich?

- [4.6] Wie groß ist der Anteil der substituierten Gesteinskörnung in Ihren R-Betonsorten? Welche Korngrößen werden substituiert? Welchen Anteil der primären Gesteinskörnung können Sie maximal ersetzen?
- [4.9] In welchen Ihrer Werke sind Recycling-Produkte dauerhaft und in welchen auf Anfrage erhältlich?

5.1.3. Empfehlung der projektspezifischen Ermittlung der Verfügbarkeit

Folgende Schlüsse werden aus der Bearbeitungszeit, Auswertung des Fragebogens und den Gesprächen mit Empfängern gezogen:

- Die Vorgehensweise ist zeitintensiv.
- Der Zeitaufwand verringert sich deutlich, wenn der Empfänger bereits im SPS-Portal registriert ist, insbesondere wenn er dieses bereits zur Abgabe von Angeboten nutzt.
- Grundsätzlich ist die Einkaufsplattform SPS gut für derartige Anfragen geeignet. Der Reiter „Antworten“ ermöglicht es den Überblick über die Kommunikation mit allen Empfängern zu behalten. In der Spalte „Kommentare“ können Rücksprachen mit den Lieferanten dokumentiert werden.
- Der Fragebogen ist gut zu bearbeiten. Anhand der Rückmeldungen der Hersteller wurde er wie zuvor beschrieben optimiert. Das Tool zur Berechnung der THG-Emissionen ist verständlich.
- Ohne eine spezifische Projektanfrage ist die Motivation einiger Hersteller zur Beantwortung des Fragebogens gering.
- Aufgrund ständiger Entwicklungen haben die Daten, insbesondere Angaben zum Treibhauspotential, keine lange Gültigkeit.

Deswegen wird die folgende Empfehlung zur zukünftigen Nutzung des Fragebogens ausgesprochen:

Der Fragebogen sollte an projektspezifische Angebotsanfragen an Lieferanten von Transportbeton angehängt werden. Die Übersichtstabelle (Anhang 1.1, vgl. Kapitel 2.2.1) unterstützt den Einkauf Hersteller von ökologisch-nachhaltigem Beton in der

Nähe eines Projektstandorts zu identifizieren und gezielt anzufragen. In der internen Version gibt es zusätzlich eine Spalte, die Zeilen aus der Tabelle mit den entsprechenden Lieferanten auf der Einkaufsplattform SPS verknüpft. Die Aussicht einen Auftrag zu erhalten, erhöht das Interesse und somit die Beteiligung der Hersteller. Außerdem bestehen aufgrund von variierenden Lieferanten der Ausgangsstoffe zwischen mehreren Standorten desselben Unternehmens die THG-Emissionen. So können auf Basis aktueller und regionaler Daten Entscheidungen getroffen und Aufträge vergeben werden. Die Treibhauspotentiale werden neben dem Preis ein zunehmend relevantes Kriterium bei der Vergabe von Aufträgen. Neue Regulierungen und Förderungen (z.B. QNG, EU Taxonomie) oder Verpflichtungen von Unternehmen nachhaltig zu handeln, treiben diese Entwicklung an. Bei konsequenter Umsetzung werden mit jeder Angebotsanfrage Daten gesammelt. Auf diese kann für weitere Projekte zurückgegriffen werden. Im Zuge neuer Anfragen werden die Daten regelmäßig aktualisiert. Der Zeitaufwand ist in diesem Fall deutlich geringer, weil der Einkaufende aufgrund der Angebotsanfrage bereits in Kontakt mit dem Lieferanten steht. Die Anzahl der Empfänger bleibt überschaubar. Dazu wird der optimierte Fragebogen als Vorlage im SPS-Portal hinterlegt. Einzelne Fragen können an das jeweilige Projekt angepasst oder gelöscht werden. Weitere Hinweise zur Ausschreibung von CO₂-effizientem Beton enthält Kapitel 7.1.

Die Übersichtstabelle zu Herstellern und Eigenschaften von CO₂-effizientem und R-Beton (Anhang 1.1) und der optimierte Fragebogen sind Hilfsmittel, die den Einsatz von ökologisch-nachhaltigem Beton in der Ed. Züblin AG – Direktion Bayern fördern.

5.2. Verfügbarkeit von CO₂-effizientem Beton

Dieses Kapitel beschreibt die Verfügbarkeit von CO₂-effizientem Transportbeton in Bayern sowie die Treibhausgas-Einsparpotentiale der verfügbaren Produkte.

5.2.1. Hersteller, Produkte, Anwendungsbereiche und Betoneigenschaften

Hersteller:

41 Hersteller bieten CO₂-effiziente Betonsorten aus 160 Transportbetonwerken in Bayern an. Dabei handelt es sich um mittelständische Unternehmen und Konzerne.

Folgende Tendenz lässt sich erkennen: Je mehr Standorte zu einem Transportbetonhersteller gehören, desto größer ist das Angebot CO₂-effizienter Betonsorten. Eine Ausnahme ist die Ganser GmbH & Co. KG, die nur drei Standorte im Raum München hat. Dieses Unternehmen bietet unter der Bezeichnung „Klima Beton“ (Ganser Beton GmbH & Co. KG, 2023) einige CO₂-effiziente Betonsorten an. Ein noch umfassenderes Angebot hat die ITB Isar Transportbeton GmbH mit ihrem Werk in Königsdorf (ITB Isar Transportbeton GmbH, 2023).

In allen Postleitzahl-Gebieten Bayerns (63, 80 bis 87, 89 bis 97) gibt es Lieferanten von CO₂-effizientem Betonen.

Sechs der sieben Hersteller, die den Fragebogen zu Transportbeton beantwortet haben, bieten CO₂-reduzierte Sorten an (Frage [3.0] Anhang 3.1).

Verfügbarkeit der Produkte:

Die meisten Produkte sind nur auf Anfrage erhältlich. Einige Hersteller haben CO₂-effiziente Betonsorten dauerhaft im Angebot oder machen auf ihren Webseiten, Preislisten und Lieferverzeichnissen keine expliziten Angaben zur Verfügbarkeit.

Zum Beispiel gibt Hersteller G an, dass CO₂-reduzierte Betonsorten in allen Werken nur auf Anfrage verfügbar sind (Frage [3.6], Anhang 3.1).

Der einzuplanende Vorlauf zur Lieferung von CO₂-reduziertem Beton unterscheidet sich deutlich zwischen den Herstellern. Die Angaben reichen von „bis zu einer Woche“ (Hersteller F), „2 Wochen“ (Hersteller B) bis „nach Rücksprache“ (Hersteller A). (Frage [3.7] Anhang 3.1).

CSC-Zertifikat

Von den 160 Betonwerken sind 30 mit dem CSC-Zertifikat in „Gold“ ausgezeichnet. Das zusätzliche „CO₂-Modul“ (siehe Kapitel 3.2.2) wurde bei dreizehn davon zertifiziert. Fünf Werke haben die Zertifizierungsstufe „Silber“. „Platin“ erreicht nur das Betonwerk der Heidelberg Materials Beton DE GmbH in Dettelbach (CSC, 2023). Zertifiziert sind vor allem Werke die zu Unternehmensgruppen oder Konzernen gehören. Da jeder Standort einzeln betrachtet wird, sind nicht alle Standorte eines Herstellers zertifiziert und durch das gleiche CSC-Zertifikat bzw. der Beton mit den gleichen Zusatzmodulen ausgezeichnet. Die PS-Beton Piederstorfer Solnhofer Transportbeton GmbH ist das einzige Unternehmen, dessen Standorte alle durch das CSC in der Stufe „Gold“ zertifiziert sind (CSC, 2023).

Einige Werke der Hersteller C, E und F sind mit CSC-Zertifikaten für Beton in Gold oder Silber ausgezeichnet. Beton aus zwei Werken des Herstellers E erhält das Zusatzzertifikat CO₂-Modul (Anhang 3.1).

Produkt:

CO₂-effiziente Produkte werden in Preislisten und Lieferverzeichnissen von Betonherstellern meist als „CO₂-reduziert“ bezeichnet oder erhalten spezielle Produktnamen wie „EcoCrete“ (Heidelberger Beton GmbH, d), „Vertua“ (CEMEX Innovation Holding Ltd., 2021), „GWP-Beton“ (SCHWENK Beton Südbayern GmbH) oder „Klima Beton“ (Ganser Beton GmbH & Co. KG, 2023). Das Angebot variiert nicht nur zwischen den Herstellern, sondern auch zwischen den einzelnen Transportbetonwerken deutlich.

Eine Zementänderung ist bei projektspezifischer Anfrage meist möglich. Jedoch sind die Aufpreise dafür selten in Preislisten enthalten und abhängig von der gewünschten Zementsorte.

Projektspezifische Optimierungen der Betonrezeptur hinsichtlich des Treibhauspotentials insbesondere der Ausgangsstoffe sind im Regelfall möglich. Das bietet zum Beispiel die Berger Beton SE auf Anfrage an (Berger Beton SE, 2023a).

Das Produkt „Vertua zero“ wird als „klimaneutral“ (Heidelberger Beton GmbH, d) beworben. Die Betonrezeptur wird weitestmöglich optimiert und die restlichen THG-Emissionen über Klimazertifikate kompensiert (Heidelberger Beton GmbH, d). Dadurch handelt es sich um einen treibhausgasneutralen Transportbeton. Klimaneut-

ral – wie im Glossar definiert – ist das Produkt aufgrund sonstiger Umweltwirkungen nicht.

Aufgrund der langsameren Festigkeitsentwicklung und geringeren Hydratationswärme kann der Einsatz von Beton mit klinkereffizientem Zement bei kalten Umgebungstemperaturen problematisch sein (vgl. Kapitel 7.3). Deswegen bietet die ITB Isar Transportbeton GmbH „Wintersorten“ an. (ITB Isar Transportbeton GmbH, 2023).

Das GWP der Betone wird vor allem durch die Optimierung von Betonrezepturen, den Einsatz von klinkereffizientem Zement, die Nutzung von Ökostrom und des Nacherhärtungspotentials von Beton über ein abweichendes Prüfalter reduziert (vgl. Kapitel 3.3).

Festbetoneigenschaften:

Die meisten Hersteller von CO₂-effizientem Beton bieten entsprechende Produkte bis einschließlich der Festigkeitsklasse C30/37 an. In den Preislisten von ca. der Hälfte der Werke findet man auch Betonsorten für C35/45.

Anhand der Expositionsklassen gemäß DIN 1045-2 wird der mögliche Anwendungsbereich einer Betonsorte festgelegt. Ca. 65 Prozent des Ortbetons in Deutschland werden in den Expositionsklassen des üblichen Hochbaus XC1 für Innenbauteile und XC4, XF1 für Außenbauteile eingesetzt (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), 2021). Für diese Expositionsklassen sind fast alle CO₂-effizienten Betone aus den Produktverzeichnissen und Preislisten geeignet.

Die Isar Transportbeton GmbH bietet für fast jedes ihrer Standardprodukte eine CO₂-reduzierte Alternative und deckt somit besonders viele Expositionsklassen ab (ITB Isar Transportbeton GmbH, 2023). Die erhältlichen Expositionsklassen der „GWP-Betone“ (SCHWENK Beton Südbayern GmbH) von SCHWENK variieren stark zwischen den einzelnen Gesellschaften (vgl. Anhang 1.1).

Die Reduktion der THG-Emissionen erfolgt meist durch den Einsatz klinkereffizienter Zemente. Die verwendete Zementart beeinflusst den Anwendungsbereich eines Betons (vgl. Kapitel 3.3.4). Allerdings wird diese nicht in allen Preislisten angegeben. Der Hochofenzement CEM III/A wird am häufigsten genannt (vgl. z.B. ITB Isar Transportbeton GmbH, 2023; KILIAN WILLIBALD GmbH). Hersteller F reduziert die THG-Emissionen seiner Betonsorten durch die Verwendung der klinkereffizienten Zemente CEM II/B-M V-LL oder CEM III/A und Flugasche als Zusatzstoff (Frage [3.6],

Anhang 3.1). CEM II/C-M-Zemente werden selten eingesetzt, z.B. von Hersteller G (Frage [3.6], Anhang 3.1) oder der MOOSLEITNER GmbH. Der Einsatz von CEM VI wird nicht explizit angegeben.

Die normativen Möglichkeiten werden durch die gemäß Produktverzeichnissen und Preislisten erhältlichen Produkte nicht voll ausgeschöpft. Die Auswertung der Umfrage zeigt, dass auf Anfrage mehr CO₂-effiziente Produkte verfügbar sind.

Die verfügbaren Betonsorten sind teilweise zum Einsatz in Stahlbetonbauteilen mit hohem Wassereindringwiderstand geeignet (vgl. Kapitel 7.4). Zur Eignung als Sichtbeton finden sich auf den Webseiten der Transportbetonwerke kaum Angaben. Jedoch ist der Einsatz grundsätzlich möglich (vgl. Kapitel 7.4).

Zum Beispiel sind die CO₂-effizienten Betone des Herstellers G teilweise geeignet für Bauteile mit hohem Wassereindringwiderstand oder Sichtbetonanforderungen. (Frage [3.6], Anhang 3.1).

Festigkeitsentwicklung

Es besteht folgender grundsätzlicher Zusammenhang: Je geringer der Klinkerfaktor des verwendeten Zements, desto weniger THG-Emissionen entstehen bei der Herstellung und desto langsamer ist die Festigkeitsentwicklung des Betons. Grund dafür ist, dass die Klinkerbrennung der THG-emissionsintensivste Produktionsschritt ist (vgl. Kapitel 3.1) und geringe Klinkeranteile zu weniger Hydratationswärme führen.

Üblicherweise haben CO₂-effiziente Betonsorten eine langsame Festigkeitsentwicklung. Gründe dafür sind z.B. der Einsatz von klinkereffizienten Zementen oder das abweichende Prüfalter und somit die Nutzung der Nacherhärtung von Beton (vgl. Kapitel 3.3). Die THG-Emissionen der Betone mit mittlerer Festigkeitsentwicklung sind weniger stark reduziert.

So bietet zum Beispiel die PS-Beton Piederstorfer Solnhofer Transportbeton GmbH & Co. KG zwei Reduktionsstufen an: Es werden Betonsorten, deren Treibhauspotential um 40% gegenüber den CSC-Branchenreferenzwerten reduziert ist, mit langsamer Festigkeitsentwicklung angeboten. CO₂-reduzierte Betone mit mittlerer Festigkeitsentwicklung sind ebenfalls erhältlich, deren GWP ist jedoch nur um 30% reduziert. (PS-Beton Piederstorfer Solnhofer Transportbeton GmbH & Co. KG, 2023).

Die CO₂-effizienten Betone des Herstellers G sind mit langsamer oder mittlerer Festigkeitsentwicklung erhältlich. Das Prüfalalter beträgt 56 Tage bzw. 28 Tage. (Frage [3.6], Anhang 3.1).

Es werden keine CO₂-effizienten Produkte mit schneller Festigkeitsentwicklung angeboten.

Frischbetoneigenschaften:

Die Konsistenzklasse F3 wird mit Abstand am häufigsten angeboten. Auf Anfrage ist die Änderung der Konsistenzklasse meist gegen einen Aufpreis möglich. Viele der CO₂-effizienten Betonsorten sind pumpfähig.

Zum Beispiel sind die CO₂-effizienten Transportbetone des Herstellers G teilweise pumpfähig und in den Konsistenzklassen F2 bis F4 erhältlich (Frage [3.6], Anhang 3.1).

Zwei Hersteller geben in der Umfrage an, dass hinsichtlich der Verarbeitbarkeit der CO₂-reduzierten Produkte keine Besonderheiten zu beachten sind (vgl. Kapitel 7.2). Hersteller B beschreibt, dass diese Betone ein geringeres Wasserrückhaltevermögen aufweisen und somit stärker zum Bluten neigen. (Frage [3.5] Anhang 3.1).

In der Umfrage geben die Hersteller an, dass aufgrund der langsamen Festigkeitsentwicklung eine längere Ausschulfrist und das Prüfalalter von 56 Tagen für Betone mit CEM III zu beachten sind (vgl. Kapitel 7.3). (Frage [3.4] Anhang 3.1).

5.2.2. Treibhausgas-Einsparpotentiale

Treibhausgas-Einsparpotential gemäß Produktbroschüren und Preislisten:

Die folgende Tabelle vergleicht die mögliche THG-Reduktion bei der Betonherstellung von verschiedenen Herstellern. Weitere Herstellerangaben befinden sich in Anhang 1.1. Viele Transportbetonhersteller bieten Produkte in verschiedenen Reduktionsstufen und projektspezifische Optimierungen an. Beim Vergleich von Herstellerangaben ist darauf zu achten, worauf das GWP bei der Ermittlung der Einsparpotentiale bezogen wird.

Tabelle 14 THG-Einsparpotentiale der Betonherstellung gemäß Hersteller; Anhang 1.1, Quellen: Anhang 1.3

Hersteller	Produktname	Reduktionsstufen	Max. Reduktion	Referenz
Heidelberger Beton	EcoCrete	30%, 40%, 50%	66%	„Branchenreferenzwert“ (Heidelberger Beton GmbH, d)
Berger Beton		Nur Projektspezifische Optimierung	50%	„CSC-Referenzbetone“ (Berger Beton SE, 2023a)
Ganser Beton	Klima Beton	mind. 30%	keine Angabe	„Branchenreferenzwert“ (Ganser Beton GmbH & Co. KG, 2023)
ITB Isar Transportbeton	CO ₂ -reduzierter Beton	50% Wintersorten: 30%	keine Angabe	„gegenüber den „normalen“ Betonsorten [...] hinsichtlich der Zement herstellung“ (ITB Isar Transportbeton GmbH, 2023)
CEMEX	Vertua (zero)	mind. 50%	100%*	„Referenzjahr 1990 “ (CEMEX Innovation Holding Ltd., 2021)
SCHWENK	GWP-Beton	Mind. 30%, 40% oder 50% (je nach Standort)	keine Angabe	„Branchenreferenzwert“ (SCHWENK Beton Südbayern GmbH)

*mit Kompensation durch Klimazertifikate

Außerdem gibt SCHWENK an, dass ca. 90% ihrer Betone je nach Standort um 20%, 30% oder 40% gegenüber den Branchenreferenzwerten reduziert sind (SCHWENK Beton Südbayern GmbH; SCHWENK Beton Vogtland GmbH & Co. KG; SCHWENK Beton Alb-Donau GmbH & Co. KG). Das Treibhauspotential der Produktgruppe Vertua liegt bei maximal 170 (kg CO₂-Äq.) / m³ (A1-A3 exkl. Anteil aus Sekundärbrennstoffen) (CEMEX Innovation Holding Ltd., 2021).

Die in Deutschland üblichen Treibhauspotentiale der Betonherstellung liegen deutlich unter den CSC-Branchenreferenzwerten (vgl. Kapitel 3.2.2).

Die folgende Abbildung ordnet die Reduktion des Treibhauspotentials in den Kontext der Branchenreferenz- und Durchschnittswerte ein. Sie zeigt, dass eine Reduktion von 20% gegenüber den CSC-Branchenreferenzwerten erst in höheren Festigkeitsklassen ein relevantes Einsparpotential darstellt (rot markiert). Beton mit den klinkereffizienten CEM III/A, CEM II/C hat ein im Vergleich zu den Branchenreferenzwerten um ca. 30% reduziertes GWP. Das entspricht der CO₂-Klasse Level 1. Zur Erreichung der CO₂-Klasse Level 2 (orange markiert) sind weitere Maßnahmen nötig.

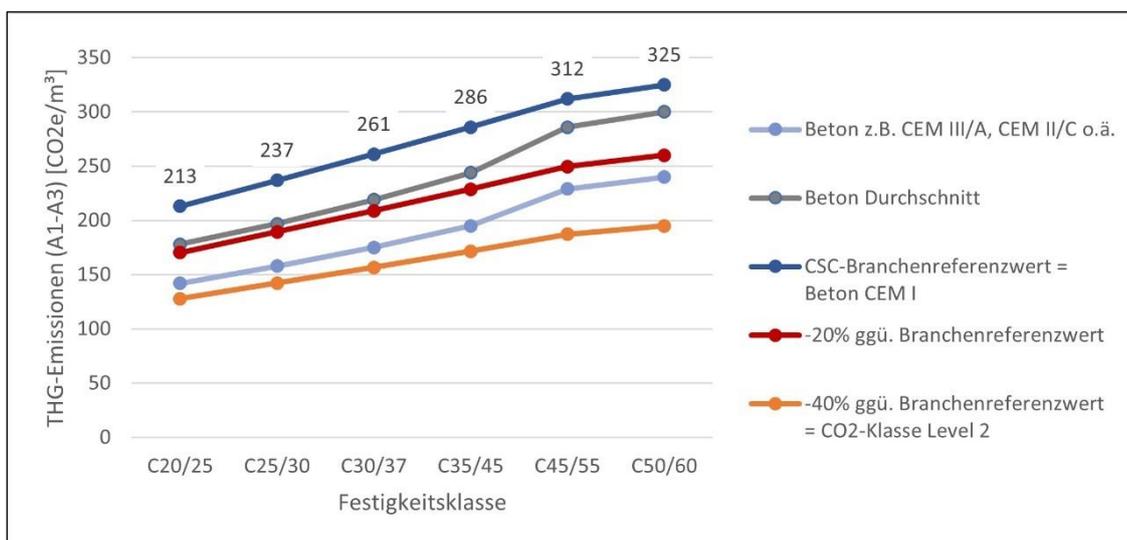


Abbildung 16 Einordnung der THG-Einsparpotentiale in Bezug auf Branchenreferenz- und Durchschnittswerte; Abbildung 8, ergänzt

Treibhausgas-Einsparpotential gemäß Umfrage:

[3] CO₂-reduzierter Beton

Abbildung 17 Überschrift des dritten Abschnitts, Anhang 2.1

Als Antwort auf den Fragebogen geben drei Hersteller spezifische THG-Emissionen für die Herstellung von CO₂-reduzierten Sorten an. Hersteller B beschreibt, dass der Unterschied zu den Standardsorten nur im Ersatz des CEM II durch einen CEM III besteht. Hersteller C gab an, im Auftragsfall Selbstdeklarationen erstellen zu können und CO₂-reduzierte Sorten herzustellen. Das zur Verfügung gestellte Excel-Tool zur Berechnung der THG-Emissionen verwendete Hersteller G und gab Mittelwerte an. Die Daten der anderen Hersteller beruhen auf Selbstdeklarationen und stammen jeweils von einem Werk. (Anhang 3.1).

Die Treibhauspotentiale steigen mit zunehmender Festigkeitsklasse an. Die stärkste Reduktion erreicht Hersteller E (vgl. Tabelle 15). Auffällig ist, dass sich das GWP der CO₂-effizienten Sorten wenig unterscheidet und alle Betonsorten die CO₂-Klasse Level 2 (vgl. Kapitel 3.2.2) erreichen.

Tabelle 15 GWP der CO₂-effizienten Sorten der Hersteller E bis G und Bezug auf die CSC-Branchenreferenzwerte, Anhang 3.1 und (Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2022a)

Hersteller	GWP [kg CO ₂ e / m ³] (A1-A3)			Reduktion in Bezug auf die Standardsorte desselben Herstellers			Reduktion in Bezug auf die CSC- Branchenreferenzwerte		
	C25/30	C30/37	C35/45	C25/30	C30/37	C35/45	C25/30	C30/37	C35/45
E	127,70	141,50	155,30	21%	21%	20%	46%	46%	46%
F	143,06	154,25	-	16%	14%	-	40%	41%	-
G	140,18	147,74	-	15%	20%	-	41%	43%	-
CSC- Branchen- referenzwerte	237,00	261,00	286,00						

5.3. Verfügbarkeit von R-Beton

Bauausführenden wird empfohlen sich mit R-Beton auseinanderzusetzen, weil entsprechende Ausschreibungen zunehmen werden. Insbesondere sollten Hersteller identifiziert und die Verfügbarkeit geprüft werden (Kiltz & Voland, 2022). Das wurde im Rahmen der Masterarbeit gemacht. Die Ergebnisse sind im Folgenden zusammengestellt. Zusätzlich werden die THG-Emissionen der R-Betonherstellung den Ressourceneinsparpotentialen, die aus der teilweisen Substitution der primären Gesteinskörnung resultieren, gegenübergestellt.

5.3.1. Hersteller, Produkte, Anwendungsbereiche und Betoneigenschaften

Hersteller:

In Bayern wird R-Beton von 47 Herstellern in 161 Transportbetonwerken angeboten. Die Unternehmensgröße variiert vom Mittelstand bis zu Konzernen, ist aber durchschnittlich etwas geringer als bei den Herstellern von CO₂-effizientem Beton. Viele Unternehmen bieten beide ökologisch-nachhaltigen Alternativen zu Standardbeton an. R-Beton wird in Werken in allen Postleitzahl-Gebieten Bayerns angeboten.

Von den sieben Herstellern, die den Fragebogen beantwortet haben, bieten sechs R-Betone an (Frage [4.0], Anhang 3.1).

Verfügbarkeit der Produkte:

R-Beton ist fast ausschließlich auf Anfrage erhältlich. Wenige Betonwerke bieten dauerhaft Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung an.

Die R-Betone des Herstellers F sind in einem Werk dauerhaft und in den restlichen auf Anfrage verfügbar. In der Hälfte der Werke von Hersteller G ist R-Beton dauerhaft, in der anderen Hälfte auf Anfrage erhältlich. (Antworten auf Frage [4.6]).

Die Angaben zum nötigen Vorlauf variieren stark zwischen den Herstellern. C verweist auf die Abhängigkeit von der Verfügbarkeit von rezyklierter Gesteinskörnung (Frage [4.7], Anhang 3.1). Vier Hersteller beziehen die RC-Gesteinskörnung regional, einer von ihnen – Hersteller C - produziert diese teilweise selbst (Frage [4.8], Anhang 3.1).

Die Verfügbarkeit von R-Beton ist stark abhängig von der regionalen Verfügbarkeit von RC-Gesteinskörnung in ausreichender Menge und Qualität (Kiltz & Volland, 2022; Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), 2021). Deswegen schwankt die werk-spezifische Verfügbarkeit von R-Beton deutlich stärker als die von CO₂-effizientem Beton. Die vermehrte Abbruch- und Bautätigkeit in Ballungsräumen begünstigt die Verfügbarkeit von rezyklierter Gesteinskörnung und den Einsatz von R-Beton. Auf die Relevanz der Transportentfernungen zwischen den Orten des Abbruchs, der Aufbereitung und des Einsatzes geht Kapitel 5.3.2 ein.

CSC-Zertifikat:

49 der 161 Betonwerke wurden durch das CSC zertifiziert. 44 haben das CSC-Zertifikat in Gold, davon 17 mit R-Modul, erhalten. Kein Beton der Hersteller A bis G wurde durch das Zusatzzertifikat R-Modul ausgezeichnet (Anhang 3.1).

Produkt:

Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung wird in Preislisten und Produktverzeichnissen meist als „R-Beton“ oder „R-Beton nach DAfStb-Richtlinie“ bezeichnet. Vereinzelt werden auch der Begriff „Recyclingbeton“ oder spezielle Produktnamen z.B. „Märker R“ (Märker Gruppe) verwendet.

Die Produktgruppe „EcoCrete R“ enthält mind. 10% und max. 45% rezyklierte Gesteinskörnung. Sie ermöglicht auch eine Kombination der Ziele der Ressourcenschonung und THG-Emissionsreduktion. Die Reduktionsstufen des CO₂-effizienten „EcoCrete“ wurde in Kapitel 5.2 bereits beschrieben. (Heidelberger Beton GmbH, d).

Das Angebot variiert zwischen Herstellern und zwischen einzelnen Standorten desselben Herstellers. Der Ansatz zur Ressourcenschonung ist bei allen verfügbaren R-Betonen die teilweise Substitution der primären Gesteinskörnung durch Sekundärmaterial. In Bayern ist Transportbeton mit vollständigem Ersatz der natürlichen Gesteinskörnung gemäß Preislisten und Produktverzeichnissen nicht verfügbar.

Festbetoneigenschaften:

R-Beton ist bis einschließlich der Festigkeitsklasse C30/37 verfügbar. Grund dafür ist, dass Beton höherer Festigkeitsklassen außerhalb des Anwendungsbereichs der DAfStb-Richtlinie zu Beton mit RC-Gesteinskörnung liegt.

Der Anwendungsbereich kann mithilfe der Expositionsklassen gem. DIN 1045-2 bestimmt werden. Er ist für R-Beton nach der DAfStb-Richtlinie bzw. Anhang E.3 der DIN 1045-2:2023-08 klar definiert (vgl. Kapitel 3.3.7) und deutlich begrenzter als für CO₂-effizienten Beton. Die meisten erhältlichen R-Betone sind für X0 und XC1 bis XC4 geeignet. Weniger häufig wird die Expositionsklasse XF1 und selten XA1 abgedeckt (siehe Anhang 1.1). Häufig sind auf Anfrage weitere ressourcenschonende Sorten erhältlich.

Keiner der R-Betone aus Preislisten und Produktverzeichnissen ist für die Umgebungsbedingungen XD1, XD2, XS1, XS2, XF2 oder XF4 geeignet. Die neue DIN 1045-2 lässt R-Beton für diese zu, wurde jedoch später als die meisten der gesichteten Dokumente veröffentlicht. Deswegen ist eine Erweiterung des Sortiments zu erwarten.

Zur Eignung von R-Beton für Bauteile mit hohem Wassereindringwiderstand oder als Sichtbeton werden in Preislisten und Produktverzeichnissen selten Angaben gemacht. Die R-Betonsorten der Rennig Beton können teilweise für hohen Wassereindringwiderstand verwendet werden (Rennig Beton, 2023). Die TB Transportbeton Glöckle gibt an, dass ihr R-Beton weder für Sichtbeton noch WU-Bauteile geeignet ist (Transportbeton Glöckle, 2023). Bei der Hans Steidele GmbH kann die Eignung für hohen Wassereindringwiderstand gesondert vereinbart werden (Hans Steidele GmbH).

Die R-Betone des Herstellers G sind teilweise geeignet für Sichtbeton und Bauteile mit hohem Wassereindringwiderstand (Antwort auf Frage [4.6]).

Festigkeitsentwicklung:

Die Festigkeitsentwicklung steht nicht im Zusammenhang mit dem Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung. Der Ausgangsstoff, der den größten Einfluss auf die Entwicklung der Betondruckfestigkeit hat, ist der Zement.

Die meisten R-Betone haben eine mittlere Festigkeitsentwicklung. Vier Hersteller führen auch Sorten mit schneller Festigkeitsentwicklung in ihren öffentlichen Produktverzeichnissen oder Preislisten. Ebenfalls vier Unternehmen bieten R-Beton mit langsamer Festigkeitsentwicklung an.

Frischbetoneigenschaften:

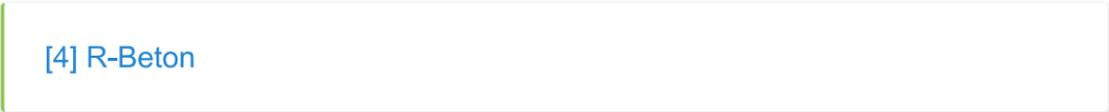
R-Beton ist vorwiegend in der Konsistenzklassen F3 und etwas weniger häufig in F4 erhältlich. Ressourcenschonende Sorten der meisten Hersteller sind teilweise pumpfähig. Rennig Beton und Ganser Beton geben an, dass ihr R-Beton nicht pumpfähig ist (Ganser Beton GmbH & Co. KG, 2023; Rennig Beton, 2023). Die Produkte des Hersteller G sind teilweise pumpfähig und in der Konsistenzklasse F3 erhältlich (Antwort auf Frage [4.6]).

Für die R-Betone von C, F und G sind bezüglich der Verarbeitbarkeit keine Besonderheiten zu beachten. Hersteller A antwortet: „Möglichst frühzeitige und ausreichende Nachbehandlungszeit nach Norm; Prüfalter: 56 d beim CEM III; Einbaukonsistenz nicht über F3; Max. bis C25/30 XC4, XF1, XA1“. (Frage [4.4], Anhang 3.1).

Der Nachbehandlung kommt bei R-Beton eine besondere Bedeutung zu (siehe Kapitel 7.3.3). Eine Kombination von klinkereffizienten Zementen mit rezyklierter Gesteinskörnung ist möglich. Das zeigen auch die Antworten der Hersteller A und C auf die Fragen [4.4] und [4.5] zur Verarbeitbarkeit und Ausschallfrist von R-Beton (Anhang 3.1).

Die Frischbetoneigenschaften von R-Beton unterliegen aufgrund der inhomogenen rezyklierten Gesteinskörnung größeren Schwankungen als für Transportbeton üblich (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), 2021).

5.3.2. Gegenüberstellung der Treibhauspotentiale und des Ressourceneinsparpotentials von R-Beton



[4] R-Beton

Abbildung 18 Überschrift des vierten Abschnitts, Anhang 2.1

Treibhauspotential und Ressourceneinsparpotential gemäß Umfrage:

Drei Hersteller machten Angaben zu den THG-Emissionen der Herstellung von R-Beton für je einen Standort. Hersteller G hat Mittelwerte über alle Werke angegeben. Hersteller D und G nutzten das zur Verfügung gestellte Formular zur Berechnung der THG-Emissionen, während die Hersteller E und F Selbstdeklarationen abgaben. (Abschnitt [4], Anhang 3.1).

Die THG-Emissionen von R-Beton steigen mit der Festigkeitsklasse an. Die Werte der verschiedenen Hersteller für gleiche R-Betonsorten sind ähnlich. Hersteller F hat auch THG-Emissionen für eine Beton der Festigkeitsklasse C35/45 mit rezyklierte Gesteinskörnung zu Verfügung gestellt. Dieser liegt aufgrund der Festigkeitsklasse außerhalb der DAfStb-Richtlinie „Beton [...] mit rezyklierten Gesteinskörnungen [...]“ (2010; 2019) und außerhalb der DIN 1045-2:2023-08. Deswegen können Bauteile aus diesem Beton nicht nach Eurocode 2 bemessen werden. (Frage [4.1], Anhang 3.1).

Im Vergleich zu den Standardsorten desselben Herstellers sind die THG-Emissionen der R-Betonherstellung leicht erhöht. Bezieht man die Treibhauspotentiale auf die CSC-Branchenreferenzwerte, erreichen die in der folgenden Tabelle markierten Sorten die CO₂-Klasse Level 1 (vgl. Kapitel 3.2.2).

Tabelle 16 GWP der R-Betonsorten der Hersteller E bis G und Bezug auf die CSC-Branchenreferenzwerte, Anhang 3.1 und (Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2022a)

Hersteller	GWP [kg CO ₂ e / m ³] (A1-A3)			in Bezug auf die Standard- sorte desselben Herstellers			in Bezug auf die CSC- Branchenreferenzwerte		
	C25/30	C30/37	C35/45	C25/30	C30/37	C35/45	C25/30	C30/37	C35/45
E	166,60	184,80	-	+3%	+3%	-	30%	29%	-
F	172,04	180,14	192,29	+1%	+1%	+1%	27%	31%	33%
G	172,56	181,92	-	+5%	-2%	-	27%	30%	-
CSC- Branchen- referenzwerte	237,00	261,00	286,00						

In den R-Betonsorten des Herstellers F werden 20% der primären Gesteinskörnung durch Sekundärmaterial ersetzt. Dabei wird RC-Gesteinskörnung Typ 1 in der Korngruppe 8/16mm und der Zement CEM II/B-M (V-LL) 42,5 N eingesetzt. Im R-Beton des Herstellers G wird ebenfalls rezyklierte Gesteinskörnung des Typ 1 verwendet. Diese wird in den Korngruppen 2/8mm bzw. 8/16mm eingesetzt. Der Anteil des Sekundärmaterials liegt bei 25% bis 35% des Volumens der Gesteinskörnung. Die Sorten sind bis XC4 einsetzbar. Wird XA1 gefordert, muss der Anteil auf 25% gesenkt werden. Das trifft auf die angefragten Betonsorten zu. Der Zement CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N wird mit Flugasche als Zusatzstoff verwendet. (Antwort auf Frage [4.6]).

Das entspricht den Anforderungen der DAfStb-Richtlinie (vgl. Tabelle 8).

Tabelle 17 GWP und Anteil rezyklierter Gesteinskörnung der R-Betonsorten der Hersteller E bis G und Bezug auf die CSC-Branchenreferenzwerte, Anhang 3.1 und (Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2022a)

Hersteller	GWP [kg CO ₂ e / m ³] (A1-A3)			Anteil rezyklierter an der gesamten Gesteinskörnung [Vol.-%]			Reduktion um ... in Bezug auf die CSC- Branchenreferenzwerte		
	C25/30	C30/37	C35/45	C25/30	C30/37	C35/45	C25/30	C30/37	C35/45
E	166,60	184,80	-	k.A.	-k.A.	-	30%	29%	-
F	172,04	180,14	192,29	20%	20%	20%	27%	31%	33%
G	172,56	181,92	-	25%	25%	-	27%	30%	-
CSC- Branchen- referenzwerte	237,00	261,00	286,00						

Keiner der Hersteller E bis G bietet eine R-Betonsorte mit den maximal zulässigen 45 Vol.-% der rezyklierten Gesteinskörnung an. Die Sorten des Herstellers F halten mit einem Anteil des Sekundärmaterials von 20 Vol.-%, die Grenzwerte für alle Expositionsklassen ein (vgl. Tabelle 8 und Tabelle 9).

Die THG-Emissionen der Bereitstellung der Gesteinskörnung machen nur einen geringen Anteil am GWP der Betonherstellung aus (vgl. Abbildung 6). Deswegen hat es einen geringen direkten Einfluss auf das GWP eines Betons, ob als Ausgangsstoff natürliche Gesteinskörnung abgebrochen oder Sekundärmaterial aufbereitet wird. Die Transportentfernung zwischen den Orten des Abbruchs, der Aufbereitung und der Verarbeitung entscheidet darüber, ob mit einer Erhöhung der Emissionen gerechnet werden muss. (Bechmann & Weidner, 2023).

Zum Transport zwischen dem Abbruchort und der Aufbereitung liegen keine Daten vor. Tabelle 18 vergleicht die Transportentfernungen der natürlichen und rezyklierten Gesteinskörnung zu den Betonwerken aus der Umfrage. Die RC-Gesteinskörnung beziehen die Hersteller regional (Frage [4.8], Anhang 3.1).

Tabelle 18 Transportdistanz der Gesteinskörnung zum Betonwerk, Antworten auf den Fragebogen

Hersteller	Grobe, primäre GK [km]	Feine, natürliche GK [km]	Rezyklierte GK [km]
D	4,9	66,5	36,5
G	72,0	72,0	2,0

Der Bauausführende hat keinen Einfluss auf die Verfügbarkeit von rezyklierter Gesteinskörnung, kann aber schon beim Einholen von Angeboten neben dem Preis die Transportentfernung abfragen. So kann einer negativen Wechselwirkung zwischen der Ressourcenschonung durch den Einsatz von rezylierter Gesteinskörnung und dem GWP aus deren Transport entgegengewirkt werden. Auch Mehrkosten für lange Transporte werden vermieden. Der Baustellentransport (Modul A4) wird in Kapitel 6.2.4 behandelt.

Ressourceneinsparpotentiale gemäß Produktbroschüren und Preislisten:

Häufig wird in den öffentlichen Preislisten keine Angabe zum Anteil der rezyklierten Gesteinskörnung gemacht. Außerdem ist für die Verwendung des Begriffs „R-Beton“ kein Mindestanteil von Sekundärmaterial vorgeschrieben.

Die folgende Tabelle zeigt beispielhaft Ressourceneinsparpotentiale, die sich aus dem Ersatz der primären Gesteinskörnung ergeben.

Tabelle 19 Anteile rezyklierter Gesteinskörnung in Transportbetonen verschiedener Hersteller, vgl. Anhang 1.1

Hersteller	Produktname	Min. Anteil RC-GK [Vol.-%]	Max. Anteil RC-GK [Vol.-%]	Quelle
Heidelberger Beton	EcoCrete R	10%	45%	(Heidelberger Beton GmbH, d)
Glontaler Transportbeton	R-Beton nach DAfStb-Richtlinie	keine Angabe	45%	(Glontaler Transportbeton GmbH & Co. Prod. KG, 2021)
PS-Beton	R-Beton	keine Angabe	45%	(PS-Beton Piederstorfer Solnhofer Transportbeton GmbH & Co. KG, 2023)
Märker	Märker R	keine Angabe	keine Angabe	(Märker Gruppe)

Die Anteile in den Transportbetonen sind ebenfalls abhängig von der regionalen Verfügbarkeit von geeignetem RC-Material. Die maximalen Volumenanteile entsprechen den normativen Vorgaben (siehe Kapitel 3.3.7)

Ein Kubikmeter Beton enthält ca. 1690 bis 1840 kg Gesteinskörnung (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023). Bei maximalem Einsatz von Sekundärmaterial (45 [Vol.-%]) und unter der Annahme einheitli-

cher Rohdichten können ca. 760 bis 830 kg primärer Rohstoffe je Kubikmeter R-Beton eingespart werden.

5.4. Preise für CO₂-effizienten und R-Beton

Die Preise für CO₂-effizienten und R-Beton werden betrachtet, um die wirtschaftliche Umsetzbarkeit zu beurteilen. Die Kosten sind eines der Hauptkriterien der Produktwahl, obwohl ökologische Kriterien wie die Umweltwirkung an Bedeutung gewinnen. Außerdem ist es im Sinne der Nachhaltigkeit ökonomische Aspekte zu betrachten.

Die Zusammensetzung der Nettopreise für Beton wurde bereits in Kapitel 2.2.1 erklärt. Die Nettopreise stammen aus Preislisten verschiedener Hersteller aus dem Jahr 2023.

Die Nettopreise für ökologisch-nachhaltigen Beton werden mit denen für Standardbeton desselben Herstellers, für gesellschaftliche Kosten von Umweltbelastungen gemäß Umweltbundesamt und für CO₂-Zertifikate des EU Emissions Trading System verglichen.

Die Preise werden für die folgenden Betonanforderungen verglichen:

- Festigkeitsklasse: C30/37
- Expositionsklassen: XC4 XF1 XA1
- Größtkorn: 16mm
- Konsistenzklasse: F3
- Festigkeitsentwicklung: mittel (ggf. für CO₂-effizienten Beton: langsam)

Diese entsprechen einer der abgefragten Betonsorten des Fragebogens zu Transportbeton in Bayern (Anhang 2.1).

5.4.1. Nettopreise für ökologisch-nachhaltigen Transportbeton im Vergleich zu Standardbeton und Einsparpotentialen

Häufig können Rabattsätze, die z.B. in Rahmenverträgen vereinbart sind, nicht auf ökologisch-nachhaltigen Beton, insbesondere R-Beton, angewendet werden.

Den Nettopreis für CO₂-effiziente Produkte geben die meisten Hersteller nicht in den veröffentlichten Preislisten, sondern nur auf Anfrage an. Dasselbe gilt für R-Beton.

Die CO₂-effizienten Alternativen sind teurer als Standardbeton. Eine Reduktion des Treibhauspotentials um 30% wirkt sich mit 1,6 bis 5,6 Prozent kaum auf den Preis aus. Bei Beton mit THG-Einsparpotentialen von mind. 40 Prozent steigen die Nettopreise im Vergleich zu Standardbeton stärker, nämlich um 5,5 bis 20 Prozent (vgl. Tabelle 20). Die THG-Emissionen dieser Betone liegen deutlich unter dem deutschen Durchschnitt (vgl. Abbildung 16). Der durchschnittliche Aufpreis für Transportbeton der CO₂-Klasse Level 1 liegt bei 5,6 Euro / m³ und für CO₂-Klasse Level 2 bei 7,5 Euro / m³ (vgl. Tabelle 20).

In der Preisliste der ITB Isar Transportbeton GmbH werden auf einer Doppelseite immer links die Standardbetonsorten und rechts entsprechende CO₂-reduzierte Alternativen für normale und kühle Witterung angegeben (2023). Diese Darstellung ermöglicht es, einfach Alternativprodukte zu finden und direkt Preise zu vergleichen. Der Preisunterschied beträgt immer drei Euro je Kubikmeter für die THG-Reduktion durch den Einsatz von CEMIII/A und einem Zementanteil im Beton von ca. 15% (ITB Isar Transportbeton GmbH, 2023).

Als Aufpreis für eine Zementänderung zu CEMIII wurden von jeweils einem Hersteller drei, sieben und 9,5 Euro/m³ in der Umfrage angegeben (Frage [2.4] in Anhang 3.1). Hersteller F gibt als Aufpreis für Betonsorten mit CEM II/B-M-V-LL 42,5 und Flugasche drei Euro je Kubikmeter an. Für Sorten mit CEM III/A 42,5 N und Flugasche sind es acht Euro je Kubikmeter. (Frage [3.6] Anhang 3.1).

Die Frage nach starken Preisschwankungen von CO₂-effizienten Produkten wurde von Hersteller C verneint (Frage [3.8], Anhang 3.1).

Tabelle 20 Vergleich der Nettopreise von Standard- und CO2-effizientem Beton für die Anforderungen C30/37, XC4 XF1 XA1, 16mm, F3; unter Verwendung von (Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2022a)

Hersteller	Nettopreis Standard [Euro/m ³]	Nettopreis CO2-effizient [Euro/m ³]	Aufpreis (CO2-effizient zu Standard)	THG-Einsparpotential (ggü. CSC-Branchenreferenzwerten)	Quelle
G	-	-	15% bis 20%	43%	(Anhang 3.1)
Ganser Beton	182,3	187,8	3,0%	mind. 30%	(Ganser Beton GmbH & Co. KG, 2023)
CEMEX	195,3	206,3	5,6%	mind. 35%*	(CEMEX Deutschland AG, 2022)
PS-Beton	181,5	184,5	1,7%	30%	(PS-Beton Piederstorfer Solnhöfer Transportbeton GmbH & Co. KG, 2023)
PS-Beton	181,5	191,5	5,5%	40%	(PS-Beton Piederstorfer Solnhöfer Transportbeton GmbH & Co. KG, 2023)
SCHWENK	182,5	185,5	1,6%	mind. 30%	(SCHWENK Beton Südbayern GmbH)
ITB Isar Transportbeton	182,9	185,9	1,6%	ca. 40%**	(ITB Isar Transportbeton GmbH, 2023)

*Herstellerangabe: mehr als 50% gegenüber Referenzjahr 1990, max. 170 (kg CO₂e) / m³

**Herstellerangabe: „um 50% reduziertes CO₂-Äquivalent hinsichtlich Zementherstellung“, Annahme: Anteil der Zementherstellung am GWP von Beton gem. Abbildung 6

Auch die Nettopreise für R-Beton liegen über denen für äquivalenten Standardbeton.

Die Preise für R-Beton sind um 4 bis 20 Prozent höher als die für Standardbeton desselben Herstellers. Eine Ausnahme ist R-Beton der TB Transportbeton Glöckle GmbH & Co. KG, die einen Nachlass von drei Euro je Kubikmeter gewährt (2023).

Die Anteile der rezyklierten an der gesamten Gesteinskörnung werden nicht in Preislisten oder Produktverzeichnissen angegeben. Gemäß der DAfStb-Richtlinie zu Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung, können aufgrund der Expositionsklasse XA1 maximal 25% Sekundärmaterial eingesetzt werden (vgl. Tabelle 8).

Die R-Betone der Hersteller A und F unterliegen keinen starken Preisschwankungen. (Frage [4.9], Anhang 3.1).

Tabelle 21 Vergleich der Nettopreise von Standard- und R-Beton für die Anforderungen C30/37, XC4 XF1 XA1, 16mm, F3

Hersteller	Nettopreis Standard [Euro/m ³]	Nettopreis R-Beton [Euro/m ³]	Aufpreis (R-Beton zu Standard)	Anmerkungen	Quelle
G	-	-	15% bis 20%	nicht für XF1, XA1	(Antwort auf Frage [4.6])
Ganser Beton	182,3	190,3	4,4%	nicht für XA1	(Ganser Beton GmbH & Co. KG, 2023)
PS-Beton	181,5	193,5	6,6%	nicht für XF1, XA1	(PS-Beton Piederstorfer Solnhofer Transportbeton GmbH & Co. KG, 2023)
SCHWENK Beton	182,5	194	6,3%	nicht für XA1; Konsistenz: F4	(SCHWENK Beton Südbayern GmbH)
TB Glöckle	177,9	174,9	-1,7%	Nachlass: 3,00 Euro/m ³	(Transportbeton Glöckle, 2023)
Hans Humpenöder	196	204	4,1%	nicht für XA1	(Hans Humpenöder GmbH, 2023)
Glontaler Transportbeton	178	186	4,5%	-	(Glontaler Transportbeton GmbH & Co. Prod. KG, 2021)
Märker	180,5	193,5	7,2%	nicht für XA1, Konsistenz: F4	(Märker Gruppe, b)
Rennig Beton	180	192	6,7%	-	(Rennig Beton, 2023)
Transportbeton Roth	196	204	4,1%	nicht für XA1	(Transportbeton Roth GmbH & Co. KG)

5.4.2. Aufpreise für CO₂-effizienten Beton im Vergleich zu Klimakosten und CO₂-Zertifikaten

Üblicherweise berechnen Transportbetonhersteller einen „CO₂-Zuschlag“ (auch als „Nachhaltigkeitszuschlag“, „CO₂-Abgabe“ oder „CO₂-Zulage“ in Preislisten bezeichnet) aufgrund des Emissionshandels. Einige Hersteller weisen kombinierte Zuschläge z.B. als „Energiekostenzuschlag“ für Diesel, Strom, Gas und CO₂ (Hans Humpenöder GmbH, 2023) aus.

CO ₂ Zulage	Zulage abhängig von der Preisentwicklung der gehandelten CO ₂ -Zertifikate (siehe Gleitklausel)	je m ³	3,50
Nachhaltigkeitszuschlag	Ausweitung des gesetzlichen Emissionshandel, insb. CO ₂ (Berücksichtigt ist hierbei ein CO ₂ -Preis bis max. 90,00 €/t). Entstehen weitere Kostensteigerungen (CO ₂ – Preis > 90,00 €/t) oder aufgrund gesetzlicher und behördlicher Reglementierungen werden diese pauschal weiter berechnet.	je m ³	4,00
CO ₂ -Abgabe	umfasst das Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) und das EU-Emissionshandelssystem (EU-EHS)	m ³	60204929 4,50 €

Abbildung 19 Beispiele für CO₂-Zuschläge, Ausschnitte aus den Preislisten: oben (ITB Isar Transportbeton GmbH, 2023), Mitte (Märker Gruppe, b), unten (CEMEX Deutschland AG, 2022)

Der CO₂-Zuschlag wird pauschal je Kubikmeter Beton und unabhängig von dessen Treibhauspotential berechnet. Es wird nicht zwischen Standard- und CO₂-effizienten Produkten unterschieden. Die CO₂-Zuschläge variieren in den Preislisten aus dem Jahr 2023 zwischen 2,5 und 5,2 Euro (vgl. Tabelle 22).

Tabelle 22 CO₂-Zuschläge aus Preislisten verschiedener Hersteller von Transportbeton

Hersteller	CO ₂ -Zuschlag [Euro/m ³]	Quelle
Ganser Beton	5,2	(Ganser Beton GmbH & Co. KG, 2023)
CEMEX	4,5	(CEMEX Deutschland AG, 2022)
PS-Beton	3,5	(PS-Beton Piederstorfer Solnhofer Transportbeton GmbH & Co. KG, 2023)
SCHWENK	3,5	(SCHWENK Beton Südbayern GmbH)
TB Glöckle	2,5	(Transportbeton Glöckle, 2023)
Gonntaler Transportbeton	3,0	(Glonntaler Transportbeton GmbH & Co. Prod. KG, 2021)
Märker	4,0	(Märker Gruppe, b)
ITB Isar Transportbeton	3,5	(ITB Isar Transportbeton GmbH, 2023)

Nach der Empfehlung des Umweltbundesamt sind für das Jahr 2022 und eine Zeitpräferenzrate von 1 Prozent 237 Euro je Tonne Kohlenstoffdioxid anzunehmen (Wilke, 2023). Im selben Jahr lag der Preis für ein CO₂-Zertifikat des EU Emissions Trading System bei ca. 81 Euro je Tonne CO₂-Äquivalent (Statista GmbH, 2024).

Der Aufpreis für CO₂-effiziente Sorten ist deutlich niedriger als der Preis für CO₂-Zertifikate des EU-ETS oder die Klimakosten gem. Umweltbundesamt. Das gilt auch in

Summe mit dem CO₂-Zuschlag, den Transportbetonhersteller aber pauschal auf jede Betonsorte unabhängig von deren GWP aufschlagen.

Der Unterschied der Klimakosten gemäß Umweltbundesamt zwischen Standardbeton und Beton der CO₂-Klasse Level 2, liegt bei 9,34 Euro / m³. Der Aufpreis für CO₂-effizienten Beton liegt nach Tabelle 20 mit 7,5 Euro / m³ darunter. Für Beton der CO₂-Klasse Level 1 ist der Aufpreis für den CO₂-effizienten Beton größer als die Reduktion der Klimakosten (vgl. Tabelle 23). Allerdings entstehen neben den direkten Mehrkosten für CO₂-effizienten Beton durch dessen veränderte Frischbetoneigenschaften und deren Einfluss auf den Bauablauf indirekte Mehrkosten (siehe Kapitel 8.2), die in diesem Vergleich fehlen.

Tabelle 23 CO₂-Zuschläge und Aufpreise für CO₂-effizienten Beton im Vergleich zu Klimakosten gem. UBA und Kosten für CO₂-Zertifikate des EU-ETS

	GWP (A1-A3) [kg CO ₂ -Äq. / m ³]	CO₂-Zuschlag [Euro/m ³]	CO₂-Zertifikat (EU-ETS) [Euro/m ³]	Klimakosten gem. UBA [Euro/m ³]	Reduktion Klimakosten gem. UBA [Euro/m ³]	Aufpreis für CO₂-effizienten Beton [Euro / m ³]
Durchschnitt C30/37	196,0**	3,85*	15,88	46,45	0	0
Durchschnitt C30/37 (nur Transporte und Prozesse im Werk)	16,27	3,85*	1,32	3,86	0	0
CO ₂ -Klasse Level 1	182,7	3,85*	14,80	43,30	3,15	5,6
CO ₂ -Klasse Level 2	156,6	3,85*	12,68	37,11	9,34	7,5
Quelle	(Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2022a)	Preislisten (Anhang 1.2)	(Statista GmbH, 2024)	(Wilke, 2023)	(Wilke, 2023)	Kapitel 5.4.1, Tabelle 20

*= (2,5+5,2) / 2 ** (InformationsZentrum Beton GmbH, 2023)

Es ist zu beachten, dass der größte Anteil der THG-Emissionen der Betonherstellung aus der Zementproduktion stammt. Für diesen Anteil ist der Zementhersteller verantwortlich. Zieht man die Anteile am GWP der Produktion der Ausgangsstoffe ab, bleiben 8,3% des gesamten Treibhauspotentials der Betonherstellung. Diese setzen sich aus Transporten (5,7%) und Prozessen im Werk (2,6%) zusammen (vgl. Abbildung 6).

Für diesen Anteil der THG-Emissionen muss der Transportbetonhersteller aufkommen. Der durchschnittliche CO₂-Zuschlag entspricht den Klimakosten gemäß Umweltbundesamt für die Zeitpräferenzrate 1% (siehe Zeile 2 der Tabelle 23).

Die CO₂-Bepreisung hat derzeit keine Lenkungswirkung (Glock, et al., 2023). Das verdeutlicht der pauschale Ansatz von CO₂-Zuschlägen unabhängig von den tatsächlich verursachten THG-Emissionen.

6. Beispielprojekt: Substitution des konventionellen Betons im Tragwerk des DonauTowers

Nach der Betrachtung auf Produktebene in Kapitel 5 werden die Auswirkungen der Substitution von Standardbeton mit ökologisch-nachhaltigen Alternativen auf ein aktuelles Hochbauprojekt untersucht. Das Beispielprojekt „DonauTower“ in Ingolstadt wird beschrieben. Anschließend wird ein Variantenvergleich hinsichtlich der Treibhauspotentiale und des Ressourcenverbrauchs durch primäre Gesteinskörnung von Standard-, CO₂-effizienten und R-Betonen für das Tragwerk durchgeführt. Die Erfahrungen und Daten des Beispielprojekts fließen auch in die nachfolgenden Kapitel zu Auswirkungen auf Bauablauf, -zeit und -kosten ein.

6.1. Grundlegende Daten des DonauTowers

Im Folgenden wird das Beispielprojekt, die Treibhauspotentiale der projektspezifischen Betonsorten und der bis zum 13.12.2023 ausgeführte Zustand beschrieben.

6.1.1. Auswahl und Beschreibung des Projekts „DonauTower“

Der „DonauTower“ ist ein ca. 57m hoher Neubau in Stahlbetonbauweise. Er entsteht in Ingolstadt auf einer zuvor als Parkplatz genutzten Fläche. Nach Fertigstellung dient etwa die Hälfte der Flächen als Zentrale der Volksbank Raiffeisenbank, während die andere Hälfte als Büro und Geschäftsfläche vermietet wird. Die Brutto-Grundfläche beträgt ca. 20.160m² und der Brutto-Rauminhalt 85.500m³.

Das Gebäude hat eine Tiefgarage und dreizehn Obergeschosse. Im 1. Und 6. Obergeschoss befindet sich jeweils ein Außenbereich. (DonauTower, 2023).



Abbildung 20 DonauTower, (DonauTower, 2023)

Dieses Projekt wird gewählt, weil einige der tragenden Bauteile aus CO₂-effizientem Beton erstellt wurden oder im weiteren Verlauf werden. Das Projekt eignet sich für den folgenden Variantenvergleich besonders gut, da der Rohbau ausschließlich in Stahlbetonbauweise erstellt wird. Vorteilhaft ist auch, dass die Mengenermittlung, Kalkulation und Terminplanung vollständig und aktuell vorliegen. Das ermöglicht den Vergleich des ausgeführten Zustands mit anderen – im Rahmen der Masterarbeit erarbeiteten – Varianten z.B. hinsichtlich THG-Emissionen (siehe Kapitel 6.2).

6.1.2. Treibhauspotential der projektspezifischen Betonsorten

Die Treibhauspotentiale der herstellereinspezifischen Betonsorten stammen aus einem Variantenvergleich des zuständigen Betontechnologen, der während des Projekts durchgeführt wurde. Die folgende Tabelle zeigt die THG-Emissionen von Standardbetonsorten des Lieferanten und bezieht diese auf die CSC-Branchenreferenzwerte (vgl. Kapitel 3.2.2). Die Sortennummern wurden verändert. Auffällig ist, dass alle Betonsorten die Referenzwerte um 4 bis 19 Prozent überschreiten. Gemäß dem DAfStb liegt der heutige Durchschnitt bereits unterhalb dieser Referenzwerte (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), 2021). Dies zeigen auch Selbstdeklarationen, die von Transportbetonherstellern als Antwort auf den Fragebogen abgegeben wurden (vgl. Kapitel 2.2).

Tabelle 24 GWP der projektspezifischen Betonsorten in Bezug auf die CSC-Branchenreferenzwerte – 1. Variante, unter Verwendung von (Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2022a)

Betonsorte	Festigkeitsklasse	GWP [kg CO ₂ e / m ³] (A1-A3)	Bezug auf die CSC- Branchenreferenzwerte
13224	C30/37	293,40	+12%
13234	C30/37	283,30	+9%
13324	C30/37	270,20	+4%
13334	C30/37	275,20	+5%
14134	C30/37	310,50	+19%
14224	C30/37	295,40	+13%
14234	C30/37	300,40	+15%
14324	C30/37	280,30	+7%
24234	C35/45	318,60	+11%
24224	C35/45	311,60	+9%

In der zweiten, zur Ausführung vorgesehenen Variante werden ca. zwei Drittel des Betonvolumens durch CO₂-effiziente Sorten (in Tabelle 25 markiert) ersetzt. [

Die Optimierung hinsichtlich der THG-Emissionen der Betonherstellung (A1 bis A3) erfolgt vor allem durch die Substitution verschiedener Portlandkompositzemente (CEM II) durch Hochofenzement (CEM III). Alle CO₂-effizienten Betonsorten, die gemäß des Variantenvergleichs zur Verwendung im DonauTower vorgesehen sind, erreichen die CO₂-Klasse Level 1 des CSC, weil die Emissionen der Betonherstellung um mindestens 30% reduziert wurden (vgl. Tabelle 25).

Es ist nicht geplant, alle Tragwerksteile aus CO₂-effizientem Beton zu erstellen. Grund dafür können die Auswirkungen auf den Bauablauf, die Bauzeit und die Baukosten (siehe Kapitel 7 und 8) sein. Herkömmliche Transportbetonsorten machen ca. ein Drittel des Betonvolumens aus. Diese Betonsorten überschreiten die CSC-Branchenreferenzwerte um 5 bis 19 Prozent (vgl. Tabelle 25).

Tabelle 25 GWP der projektspezifischen Betonsorten in Bezug auf die CSC-Branchenreferenzwerte – 2. Variante, unter Verwendung von (Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2022a)

Betonsorte	Festigkeitsklasse	GWP [kg CO ₂ e / m ³] (A1-A3)	Bezug auf die CSC- Branchenreferenzwerte
13241	C30/37	179,00	-31%
13341	C30/37	169,90	-35%
14240	C30/37	175,60	-33%
13234	C30/37	283,30	+9%
13334	C30/37	275,20	+5%
14134	C30/37	310,50	+19%
14234	C30/37	300,40	+15%
14241	C30/37	180,00	-31%
14340	C30/37	166,40	-36%
24240	C35/45	190,60	-33%
24234	C35/45	318,60	+11%

6.1.3. Ausgeführter Zustand bis einschließlich 13.12.23

Es wurden Standard- und CO₂-effiziente Betonsorten verbaut. Die eingebaute Menge und Zusammensetzung der Sorten weichen von der optimierten 2. Variante ab.

Gemäß der Bauleitung gibt es dafür vielfältige Gründe. Die Bauzeit hat sich aufgrund von Behinderungen und Lieferschwierigkeiten in den Winter verschoben. Zwischenzeitlich gab es Lieferschwierigkeiten der Flugasche, weshalb andere Betonrezepturen zum Einsatz kamen. Um negative Auswirkungen auf den Bauablauf zu vermeiden, wurde in einigen Fällen auf den Einsatz der CO₂-effizienten Sorten verzichtet. (Anhang 4.5).

Die Auswirkungen auf den Bauablauf und die Vorgehensweise bei der Ausführung des DonauTowers werden in Kapitel 7 detailliert beschrieben.

Die Bodenplatte und die Wände ab 1. UG wurden aus den optimierten Sorten erstellt. Die Obergeschosse entstehen in Skelettbauweise. Für die meisten Decken wurde CO₂-effizienter Beton eingesetzt. Die Stützen bestehen vorwiegend aus Standardbeton. (Anhang 4.5).

Die folgende Tabelle stellt die bis einschließlich 13. Dezember 2023 verbauten Mengen und Eigenschaften der CO₂-effizienten Betone je Sorte zusammen.

Tabelle 26 Verbaute Mengen bis einschließlich 13.12.23 und Eigenschaften der CO₂-effizienten Sorten, auf Grundlage von Dokumenten der Ed. Züblin AG

Betonsorte	Festigkeitsklasse	Festigkeitsentwicklung	Prüfalter [d]	Bauteile	Verbaute Menge [m ³]
34241	C30/37	langsam	56	Wände, Decken	1.614,00
34141	C30/37	langsam	56	Wände	156,00
14240	C30/37	langsam	56	Bodenplatte	2.703,50
14141	C30/37	langsam	56	Wände	137,00
14241	C30/37	mittel-langsam	56	Wände	312,00
23240	C35/45	langsam	56	Decken	65,00
24121	C35/45	mittel	28	Decken, Wände	47,50
24240	C35/45	mittel-langsam	56	Decken, Wände, Stützen	942,75
13240	C30/37	langsam	56	Bodenplatte	122,50

Die langsamere Festigkeitsentwicklung ist typisch für CO₂-reduzierten Beton. Die daraus resultierenden Besonderheiten für die Bauausführung werden in Kapitel 7.3 beschreiben.

6.2. Variantenvergleich hinsichtlich Treibhauspotential und Ressourcenverbrauch des Tragwerks

Die Varianten werden gemeinsam mit der Systemgrenze, Sachbilanz und Datenherkunft in Kapitel 2.3 beschrieben. Die Treibhauspotentiale und die mögliche Substitution von primärer durch sekundäre Gesteinskörnung der Varianten wird verglichen. Außerdem werden die THG-Einsparpotentiale den THG-Emissionen einer weiteren Transportentfernung zur Baustelle (Modul A4) gegenübergestellt. Die THG-Bilanzen der einzelnen Varianten befinden sich in Anhang 4.2.

6.2.1. Treibhausgas-Einsparpotential

Variante 4 wird als Referenz verwendet, weil sie die länderspezifische Situation in Deutschland abbildet. Für alle Varianten, die hinsichtlich der THG-Emissionen optimiert sind, ergeben sich Einsparpotentiale von 20 bis 44 Prozent.

Wären ausschließlich Standardsorten des Lieferanten des DonauTowers verbaut worden (Variante 1), läge das durch die Herstellung und Entsorgung des Betons entstandene GWP um 8 Prozent über dem in Deutschland üblichen Wert (Variante 4). Der geplante teilweise Einsatz von projektspezifischen CO₂-effizienten Sorten (Variante 2), weist im Vergleich zu Standardsorten (Variante 1) desselben Herstellers eine deutliche Reduktion des Treibhauspotentials von 3531 auf 2621 Tonnen CO₂-Äquivalenten auf.

Verwendet man nur CO₂-effiziente Betonsorten so lässt sich das Treibhauspotential sogar noch weiter senken. Erstellt man alle Betonbauteile aus den optimierten projektspezifischen Betonsorten (Variante 3) beträgt das GWP ca. zwei Drittel des Referenzfalls (Variante 4). Wenn nur Betone der Produktgruppe „ECOPact“ der Firma Holcim (Deutschland) GmbH (Variante 7) verbaut werden, ist das GWP ähnlich groß.

Das größte Einsparpotential ermöglicht der Einsatz der CO₂-effizienten Sorten von Hersteller E (Variante 9). Im Vergleich zum Ansatz generischer Datensätze der OBD 2023-I entstehen nur 56% der THG-Emissionen. Zu beachten ist, dass dieses Werk

weiter vom Projektstandort entfernt ist als der tatsächliche Lieferant (vgl. Kapitel 6.2.4).

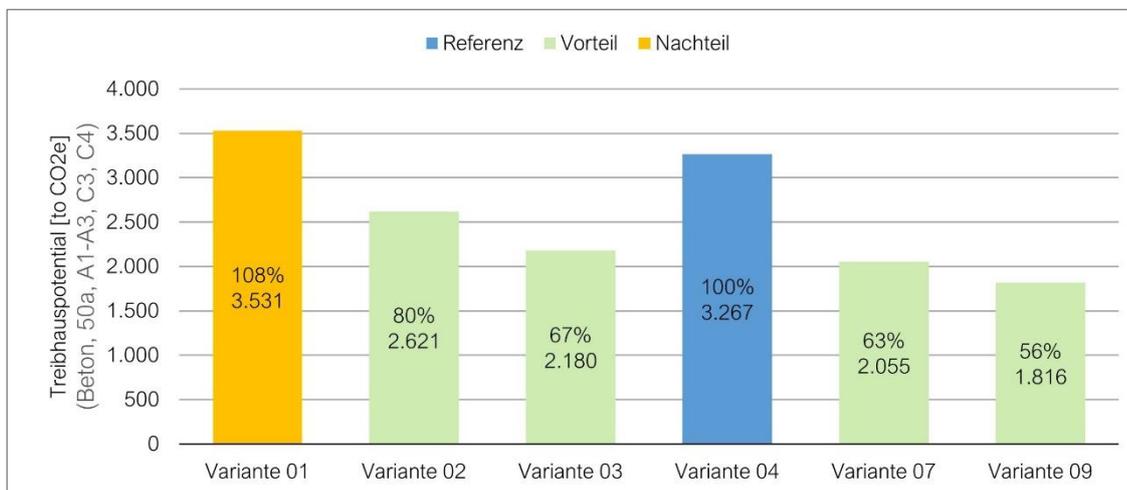


Abbildung 21 Vergleich des Treibhauspotentials des Betons der Varianten 1 bis 4, 7, 9

Als nächstes wird das gesamte Tragwerk betrachtet. Für das gesamte Tragwerk ergibt sich für die hinsichtlich des GWP verbesserten Varianten Einsparpotentiale von 14 (Variante 2) bis 32 Prozent (Variante 9). Abbildung 22 zeigt das GWP der Varianten nach Baustoff. Der Anteil des Betons an den THG-Emissionen des Tragwerks kann je nach Variante von 73 Prozent (Variante 1) bis auf 58 Prozent (Variante 9) verringert werden. Allein durch den Einsatz verfügbarer CO₂-effizienter Betone lässt sich das Treibhauspotential des Tragwerks des DonauTowers um ein Drittel senken.

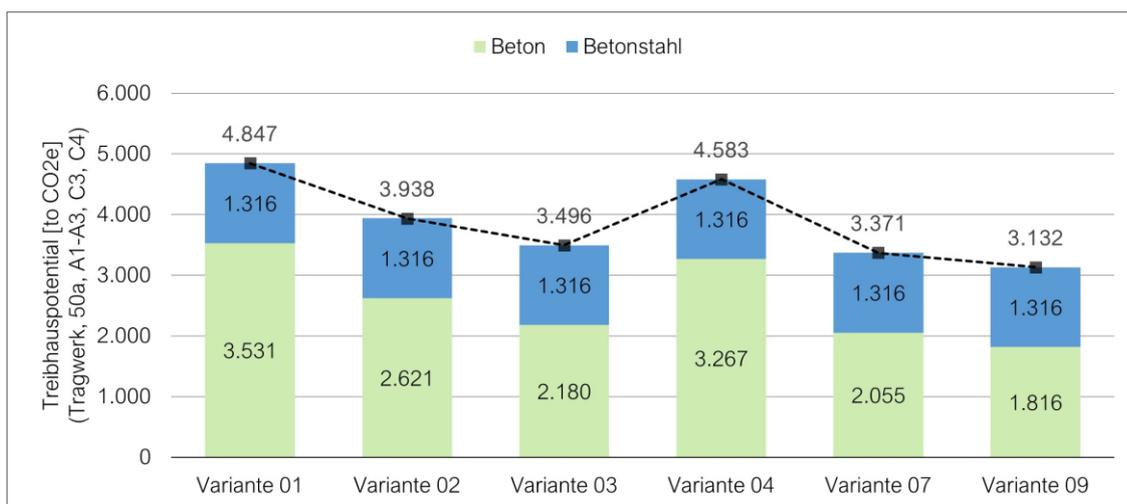


Abbildung 22 Treibhauspotential des Tragwerks der Varianten 1 bis 4, 7, 9 nach Baustoff

Abbildung 23 gibt einen Überblick über das GWP des Tragwerks je Quadratmeter Brutto-Grundfläche der Varianten. Die zulässigen Emissionen des Tragwerks eines Bürogebäudes gem. des Gelbdrucks der DAfStb-Richtlinie „Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton“ sind mit roten Linien für verschiedene Treibhausgas-Minderungsklassen „TM_t“ (vgl. Kapitel 3.2.3) eingezeichnet.

Ohne Optimierung der Betonsorten (Variante 1) würde das Tragwerk des DonauTowers mit 240 kg CO₂-Äq. / m²_{BGF} die maximal zulässigen THG-Emissionen der TM₂₀₂₄ verursachen. Die gleiche THG-Minderungsklasse wird mit aktuellen generischen Daten für Transportbeton in Deutschland erreicht (Variante 4).

Durch den teilweisen Einsatz CO₂-effizienter Betone (Variante 2) erfüllt das Tragwerk die Anforderung der TM₂₀₂₆. Wenn die optimierten Sorten des Lieferanten für alle Bauteile des DonauTowers verwendet würden, wären die Anforderungen der nächsten Klasse TM₂₀₂₈ erfüllt. Auch die Varianten 7 und 9 beschreiben ein vollständig mit verfügbaren CO₂-effizienten Transportbetonen von zwei verschiedenen Herstellern erstelltes Tragwerk. Auch diese erreichen die Treibhausgas-Minderungsklasse TM₂₀₂₈.

Mit 155,4 kg CO₂-Äq. / m²_{BGF} verfehlt auch die hinsichtlich der THG-Emissionen beste Variante 9 knapp den Grenzwert der Treibhausgasminderungsklasse, die bis einschließlich 2030 gilt.

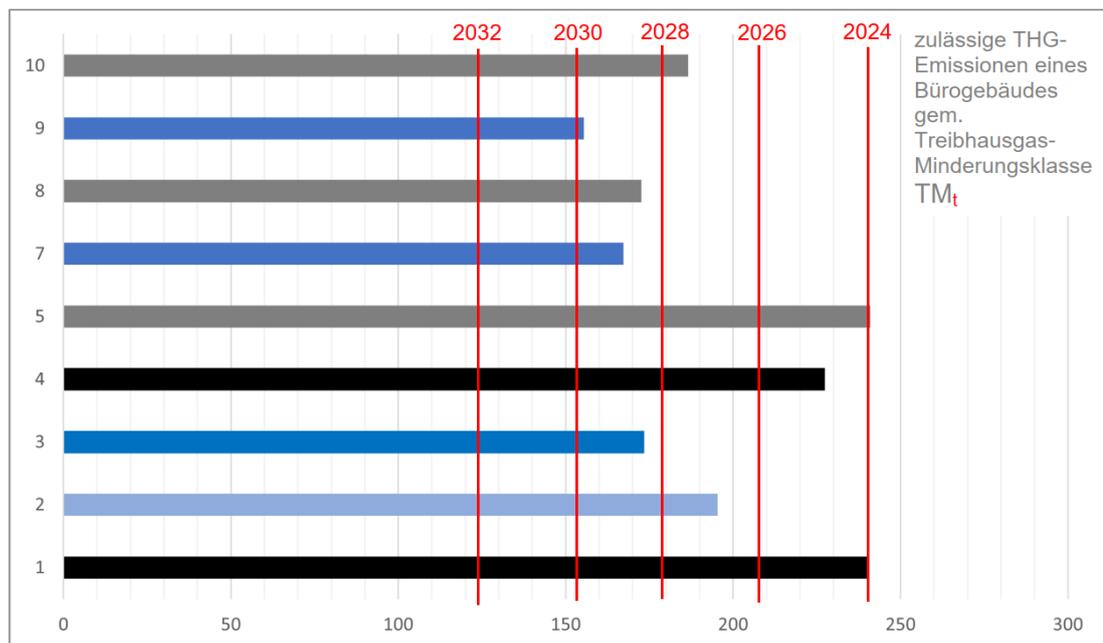


Abbildung 23 GWP der Tragwerksvarianten je m² BGF und Treibhausgasminderungsklassen, unter Verwendung von (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb), 2023)

Der Einsatz von aktuell verfügbaren CO₂-effizienten Beton ermöglicht THG-Emissionsminderungen in einer relevanten Größenordnung und reicht kurzfristig aus, um die Grenzwerte der THG-Minderungsklassen zu erfüllen.

6.2.2. Ressourceneinsparpotential

Es wird ausschließlich das Ressourceneinsparpotential betrachtet, das sich aus der Substitution von natürlicher Gesteinskörnung ergibt. Die zulässigen Anteile rezyklierter Gesteinskörnung nach der DAfStb-Richtlinie zu Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen enthält Tabelle 3. Diese werden den Betonanforderungen aus dem Leistungsverzeichnis des DonauTowers (siehe Anhang 4.1) zugeordnet. So lässt sich der innerhalb der Richtlinie maximal mögliche Anteil rezyklierter Gesteinskörnung ermitteln.

Tabelle 27 Zulässige Anteile rezyklierter GK an der gesamten GK in Bezug auf die Anforderungen des DonauTowers, Anhang 4.1 und (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb), 2010)

Betonanforderungen aus dem LV	Menge [m ³]	zulässiger Anteil RC-GK Typ 1 [Vol.-%]	zulässiger Anteil RC-GK Typ 2 [Vol.-%]	Maßgebende Anforderung
C08/10	243,00	45	35	Nicht definiert
C12/15 X0, WF	243,00	45	35	WF
C20/25	149,00	45	35	Nicht definiert
C25/30	2,00	45	35	Nicht definiert
C30/37 XC4, XF1, XA1	6.971,00	25	25	XA1
C30/37 XC3, XD1, XF1, XA1, WU	3.497,00	0	0	XD1
C35/45 XC4, XD1, XF1, XA2, WU	1.124,00	0	0	Festigkeit
C35/45 XC4, XD1, XF2, XA2, WU	67,00	0	0	Festigkeit
C40/50 XC4, XD3, XF3, XA2	77,00	0	0	Festigkeit
C45/55 XC4, XD3, XF3, XA2	34,00	0	0	Festigkeit
C50/60 XC4, XD3, XF3, XA2	36,00	0	0	Festigkeit

Da der Variantenvergleich nicht auf den Mengen des Leistungsverzeichnisses beruht, werden nur die blau markierten Zeilen darin berücksichtigt. Diese werden mit dem folgenden Faktor multipliziert, um dasselbe Gesamtvolumen zu erreichen.

Formel 2 Faktor für die Volumen Anpassung der LV-Mengen an die Mengen des Variantenvergleichs ab C30/37

$$(Menge\ Variantenvergleich) / (Menge\ LV) = 11672 / (6971 + 3497) = 1,115$$

Aufgrund der geforderten Expositionsklasse XA1 darf nur ein Viertel der natürlichen Gesteinskörnung durch Sekundärmaterial ersetzt werden. Innerhalb der Richtlinie befindet sich nur Beton mit einer maximalen Festigkeitsklasse von C30/37. Beton der Klasse C35/45 bis C50/60 liegt außerhalb des Anwendungsbereichs. (Deutsches Institut für Normung, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 2010).

Tabelle 28 Eignung von R-Beton für die Betonmengen des Leistungsverzeichnis des DonauTowers ab C30/37

Volumenanteil [%]	Betonvolumen [m³]	Einsatz von R-Beton innerhalb der DAfStb-Richtlinie ist...
59,1	6971	möglich.
26,6	3497	aufgrund der Anforderung XD1 nicht möglich.
11,3	1338	aufgrund der Festigkeitsklasse nicht möglich.
100	11806	Gesamtvolumen ab C30/37

Fast 60 Prozent des Betonvolumens des Tragwerks können aus R-Beton erstellt werden. Dabei darf ein Viertel des Volumens der groben Gesteinskörnung rezykliertes Material des Typs 1 oder 2 sein (siehe Tabelle 8). Um das maximal substituierbare Volumen abzuschätzen, wird angenommen, dass das Gesamtvolumen der Gesteinskörnung in einem Kubikmeter aller Betonsorten gleich groß ist. Damit ergibt sich für den DonauTower folgendes Ressourceneinsparpotential aus der Substitution von natürlicher Gesteinskörnung innerhalb der DAfStb-Richtlinie: $0,59 * 0,25 = \text{ca. } 15 \text{ Vol.-%}$.

Das bedeutet, dass **ca. 15 Vol.-%** der primären groben Gesteinskörnung durch Sekundärmaterial ersetzt werden können.

Das entspricht ca. 3150 Tonnen Sekundärmaterial, die im Beton des DonauTowers eingesetzt werden, um primäre Rohstoffe v.a. Kies/Splitt zu schonen.

Gemäß Anhang E.3 der neuen DIN 1045-2:2023-08 können auch 20 Volumen-Prozent der gesamten Gesteinskörnung in der Expositionsklasse XD1 mit Sekundärmaterial ersetzt werden (Tabelle 9). Daraus ergibt sich überschlägig ein höheres Einsparpotential: $0,59 * 0,25 + 0,27 * 0,2 = \text{ca. } 20 \text{ Vol.-%}$. Der Variantenvergleich basiert auf der

DAfStb-Richtlinie, weil die neue DIN 1045er-Reihe erst im Laufe der Bearbeitungszeit dieser Masterarbeit veröffentlicht wurde (vgl. Kapitel 3.3.7).

Die Varianten 5, 8 und 10 sind hinsichtlich des Ressourcenverbrauchs durch die Gesteinskörnung optimiert. Mit den R-Betonsorten des Herstellers G (vgl. Kapitel 5.3) kann die innerhalb der DAfStb-Richtlinie Menge ersetzt werden. Der ressourcenschonende Beton des Herstellers F beinhaltet 20% rezyklierte Gesteinskörnung. Deswegen liegt das Ressourceneinsparpotential im Tragwerk des DonauTowers in Variante 8 mit ca. 12% knapp darunter. Der Anteil von Sekundärmaterial in den R-Betonsorten des Herstellers E der Variante 10 ist nicht bekannt (vgl. Anhang 3.1). Die Varianten 8 und 10 sind innerhalb der DAfStb-Richtlinie (vgl. Kapitel 3.3.7) ausführbar. In Variante 5 enthält der Beton ausschließlich RC-Gesteinskörnung. Diese Sorten sind jedoch nur für die Expositionsklasse X0 geeignet. Deswegen liegt das theoretische Ressourceneinsparpotential durch die Substitution natürlicher Gesteinskörnung für Variante 5 bei 100%.

6.2.3. Vergleich der Ressourceneinsparung und des Treibhauspotentials

Die folgende Abbildung 24 zeigt, dass das Treibhauspotential beim ausschließlichen Einsatz von R-Beton (Variante 5) um 8 Prozent über dem GWP der länderspezifischen Situation Deutschlands (Variante 4) liegt. Außerdem es ist ähnlich groß wie für die Variante 1 ohne Optimierung.

Die Varianten 8 und 10 wurden hinsichtlich des Ressourcenverbrauchs verbessert. Trotzdem liegen die Treibhauspotentiale deutlich unter dem Referenzzustand.

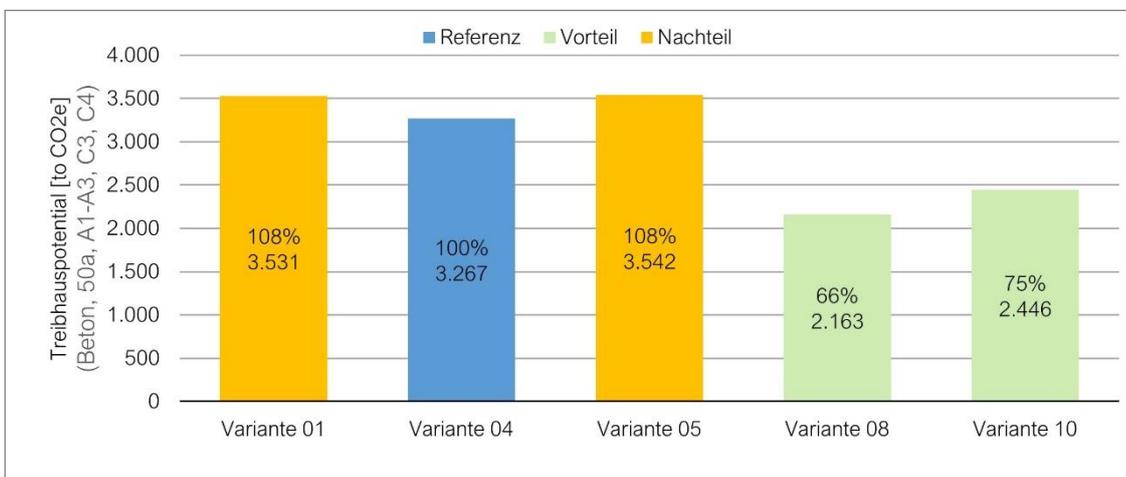


Abbildung 24 Vergleich des Treibhauspotentials des Betons der Varianten 1,4, 5, 8 und 10

Die Variante 5 ist mit Variante 4 zu vergleichen, weil beide auf generischen Daten für Deutschland basieren. Hier zeichnet sich ein geringfügig höheres Treibhauspotential bei ausschließlicher Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung ab (siehe Tabelle 29). Jedoch zeigt Variante 8, dass die Ziele der Ressourcenschonung und Reduktion des Treibhauspotentials gleichzeitig verfolgt werden können (siehe Tabelle 29). Um die THG-Emissionen weiter zu senken, könnten die Bauteile, für die innerhalb der DAfStb-Richtlinie R-Beton nicht geeignet ist, CO₂-effizienter Beton genutzt werden.

Tabelle 29 Gegenüberstellung der Ressourceneinsparpotentiale und des GWP des Betons des DonauTowers, Anhang 4.2

Variante		Substituierbarer Anteil der Gesteinskörnung [Vol.-%]	GWP in Bezug auf Variante 4 [%]
1	Standardbeton - projektspezifisch	0	+8
4	Transportbeton – generisch (OBD 2023-I)	0	0
5	R-Beton – generisch (OBD 2023-I) *	100	+8
8	R-Beton – spezifisch (Hersteller F)	12	-34
10	R-Beton – spezifisch (Hersteller E)	k.A.	-25
-	R-Beton – spezifisch (Hersteller G)	15	-

*nicht ausführbar, theoretische Variante

6.2.4. Gegenüberstellung des THG-Einsparpotentials und THG-Emissionen des Baustellentransports

Wie zuvor beschrieben handelt es sich bei Variante 9 um CO₂-effizienten Beton des Herstellers E aus einem Werk, das ca. 75 km vom DonauTower entfernt ist. Diese Variante zeigt das größte THG-Einsparpotential für die Module A1-A3, C3 und C4. Dort wurde nach den Vorgaben der DAfStb-Richtlinie zu treibhausgasreduzierten Tragwerken aus Beton (siehe Kapitel 3.2.3) der Baustellentransport nicht bilanziert. Auch nach DIN EN 15804:2022-03 ist die Berücksichtigung des Moduls A4 in den meisten Fällen optional.

Es stellt sich die Frage, ob es hinsichtlich der THG-Emissionen sinnvoll ist, ein Produkt mit geringerem GWP aus der Herstellung (A1-A3), aber mit größerer Transportentfernung zur Baustelle (A4) zu verwenden.

Aus baupraktischen Gründen ist eine Transportentfernung von 75 Kilometer vom Werk zur Baustelle nicht üblich, aber möglich. Der Transportbeton sollte nach 90 Minuten vollständig aus einem Mischfahrzeug entladen sein (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2023a). Zusätzlich können Verzögerer eingesetzt werden, um die mögliche Transportdauer zu verlängern. Diese Zusatzmittel sind in der Bilanz der THG-Emissionen zu berücksichtigen.

Tabelle 30 Treibhauspotential (A4) je Kubikmeter und für das gesamte Betonvolumen des Variantenvergleichs, auf Grundlage von: (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023)

	Transportbeton OB2023-I (Variante 4)	Lieferant des DonauTowers	Hersteller E (Variante 9)
Transportdistanz [km]	11	17	75
GWP (A4) [(kg CO ₂ e) / m ³]	2,04	3,15	13,91
GWP (A4) gesamt [t CO ₂ e]	24,34	37,62	165,95

Die Variante 9 hat in Bezug auf Variante 4 ein THG-Einsparpotential von 1451 Tonnen CO₂-Äq. (siehe Abbildung 21). Aus der größeren Transportdistanz ergeben sich zusätzlich 142 Tonnen CO₂-Äq. (siehe Tabelle 30) Dadurch verringert sich das THG-Einsparpotential unter Berücksichtigung des Baustellentransports auf 1309 Tonnen CO₂-Äq. Das zeigt, dass sich der Einsatz des CO₂-effizienten Betons von Hersteller E hinsichtlich des Treibhauspotentials trotz der höheren Transportemissionen vom Werk zur Baustelle lohnt.

Die Transportdistanz ist durch die Erhärtung des Betons begrenzt. Deshalb ist es hinsichtlich des Treibhauspotentials sinnvoll, ein optimiertes Produkt von einem weiter entfernten Transportbetonwerk einem Standardprodukt eines näherliegenden Werks vorzuziehen. Liegt ein Projekt im Liefergebiet mehrerer Werke mit CO₂-effizienten Betonsorten, sollte die Transportdistanz in die Entscheidung einbezogen werden. Dazu sollte sie bereits bei der Angebotsanfrage eingeholt werden (vgl. Kapitel 7.1).

7. Auswirkungen des CO₂-effizienten Betons auf Bauablauf und Bauzeit

Im Folgenden werden die Auswirkungen des Einsatzes von CO₂-effizientem Beton auf Bauablauf und -zeit größtenteils qualitativ erläutert. Die Erfahrungen der bisherigen Ausführung des DonauTowers werden gemeinsam mit normativen Besonderheiten und den Ergebnissen der Literaturrecherche dargestellt.

7.1. Kalkulation, Ausschreibung und Vergabe

Für den DonauTower wurde die Entscheidung CO₂-effizienten Beton zu verwenden erst nach der Ausschreibung und Vergabe des Auftrags an den Transportbetonlieferanten getroffen. Dieser hatte keine entsprechenden Sorten im Standardangebot. Deswegen erarbeitete der Lieferant in Zusammenarbeit mit dem qualitätsprüfenden Betontechnologen projektspezifisch CO₂-effiziente Sorten. Dazu wurden Betonrezepturen mit klinkereffizientem Zement und Flugasche erstellt (vgl. Kapitel 6.1.2).

Die Anforderung wurde wie folgt im Leistungsverzeichnis festgehalten:

OZ	Kurztext	Langtext	VA Menge	ME	EP	WE	GB	WE
04.	Betonarbeiten - Transportbeton							EUR
04.02.03.	Festigkeitsentwicklung							EUR
04.02.03.0010	Zulage langsame Festigkeitsentwicklung Bodenplatte	CEM III/A LH 'Bauteil Bodenplatte' Menge überschläglich ermittelt	2.964,00	m3		EUR		EUR
04.02.03.0011	Zulage langsame Festigkeitsentwicklung	alle weiteren Bauteile' Menge überschläglich ermittelt	9.165,00	m3		EUR		EUR

Abbildung 25: Ausschnitt aus dem Leistungsverzeichnis des DonauTowers; Anhang 4.5, Ed. Züblin AG

Weil beim Einsatz von klinkereffizientem Zement mit Mehrkosten und längerer Bauzeit gerechnet werden muss, ist dieser bereits in der Kalkulation und Ausschreibung zu berücksichtigen. Der Auftraggebende muss über die Auswirkungen der veränderten Betonrezeptur informiert werden und bereit sein, mögliche Mehrkosten oder eine längere Bauzeit hinzunehmen. (Kiltz & Meyer, 2022)

Es empfiehlt sich, frühzeitig mit Transportbetonherstellern in der Region eines neuen Projekts Kontakt aufzunehmen und die Verfügbarkeit von alternativen Betonsorten zu prüfen. Dazu wird eine Vorgehensweise in Kapitel 5.1.3 beschrieben.

In der Ausschreibung kann ein Grenzwert für das GWP des Transportbetons oder für die Transportdistanz vom Werk zur Baustelle angegeben werden (Bechmann & Weidner, 2023, S. 21). Um die Einhaltung der Grenzwerte zu überprüfen, können CSC CO₂-Modul Zertifikate oder (verifizierte) Umweltproduktdeklarationen des Herstellers nach ISO 14025 und EN 15804 bzw. ISO 21930 gefordert werden.

Zur Ausschreibung von CO₂-effizientem Beton stellt das CSC (vgl. Kapitel 3.2.2) Mustertexte für Beton allgemein, Beton in DGNB-Projekten und Beton mit CO₂-Modul oder R-Modul Zertifikat auf seiner Website zum Download zur Verfügung (Concrete Sustainability Council, 2023). Für den DonauTower kann eine tabellarische Ausschreibung von CO₂-effizientem Beton mit CSC CO₂-Modul Zertifikat wie folgt aussehen:

Tabelle 31 Tabellarische Ausschreibung von CO₂-effizientem Beton gem. CSC: Beispiel einer Betonsorte des DonauTowers; (Concrete Sustainability Council, 2023), bearbeitet

Nr.	Druckfestigkeitsklasse	Konsistenzklasse	Größtkorn	Expositions-klassen	Besondere Anforderungen	Menge [m ³]
1	C30/37	F4	16	XC4, XF1, XA1	CSC CO ₂ -Klasse Level 1	3497

Diese Anforderung kann wie folgt in das Leistungsverzeichnis des DonauTowers aufgenommen werden:

OZ	Kurztext	Langtext	VA Menge	ME	EP	WE	GB	WE
04.	Betonarbeiten - Transportbeton							EUR
04.02.	Zulage							EUR
04.02.08.	Betone der CO ₂ -Klasse Level 1							
04.02.07.0010	Zulage für Betone der CO ₂ -Klasse Level 1 für C30/37	erforderliche Bieterangabe: Einfache Lieferstrecke Betonwerk bis Baustelle in [km]	3497	m3		EUR		EUR

Abbildung 26 Beispiel: Position im Leistungsverzeichnis für CO₂-effizienten Beton, auf Grundlage von Anhang 4.5

Für den DonauTower ist eine DGNB Gold Zertifizierung angestrebt. Um im Kriterium ENV1.3 Punkte zu erhalten, hätte die folgende Musterausschreibung des CSC verwendet werden können:

„Ein DGNB-Projekt in [Ort/Adresse] ist in Planung. Für den Erhalt im Kriterium „ENV1.3 Verantwortungsbewusste Ressourcengewinnung“ ist daher der Einsatz von Beton mit CSC-Zertifikat Silber oder höher geplant. Bitte schicken Sie uns Ihr Angebot für die geplante Menge von # m³.“ (Concrete Sustainability Council, 2023)

Die Deklarationspflichten des Herstellers werden deutlich vor den Betoneinbau in die Abgabe des Angebots vorverlegt, um bei der Vergabe des Auftrags auch das Treibhauspotential des Betons zu berücksichtigen (vgl. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI), 2019).

7.2. Erweitertes Sortenverzeichnis, Vorbereiten der Betonage und Verarbeitbarkeit des Frischbetons

Der Einsatz von klinkereffizienten Zementen kann ein umfangreicheres Sortenverzeichnis zur Folge haben. Daraus resultiert ein größerer Abstimmungsaufwand zwischen der Bauausführung und dem Transportbetonlieferanten. Auch die Eigenüberwachung der ausführenden Firma wird aufwändiger, weil mehr Prüfungen durchzuführen sind. (Kiltz & Meyer, 2022).

Das zeigt auch die Erfahrung aus dem Beispielprojekt. Das Sortenverzeichnis und die Abruflisten enthalten zusätzlich zu den CO₂-effizienten Betonen alternative Standardorten, die bei niedrigen Temperaturen abgerufen werden. Allein für die Wände, Brüstungen und Aufkantung über der Geländeoberkante gibt es 13 verschiedene Betonsorten.

Wände, Brüstungen, Aufkantung ü. GOK (Innen- und Außen)													
C30/37	1-4			(1)		WF	F3	16	s	2		28	
C30/37	1-4			(1)		WF	F4	16	s	2		28	
C35/45	1-3	(1)		(1)		WF	F4	8	m	2		28	
C40/50	1-3	(1)		(1)		WO	F4	16	s	2		28	
C50/60	1-3	(1)		(1)		WF	F4	8	s	2		28	
C50/60	1-3	(1)		(1)		WF	F4	16	s	2		28	
C50/60	1-3	(1)		(1)		WF	F4	8	s	2		28	
C50/60	1-3	(1)		(1)		WF	F4	16	s	2		28	
Wände, Brüstungen, Aufkantung ü. GOK (Innen- und Außen), CO ₂ -red. Beton Stufe 1													
C30/37	1-4			(1)		WA	F4	8	l	2		56	Standard, Einbau nur bei TL > 5°C
C30/37	1-4			(1)		WA	F4	16	l	2		56	Standard, Einbau nur bei TL > 5°C
C35/45	4	1		2		WA	F3	16	l	2		56	Standard, Einbau nur bei TL > 5°C
C35/45	4	1		2		WA	F4	16	l	2		56	Standard, Einbau nur bei TL > 5°C
C35/45	4	1		2		WA	F4	16	m	2		28	

Abbildung 27 Betonsorten für Wände, Brüstungen, Aufkantung über GOK aus der Abrufliste des DonauTowers, Ausschnitt aus Abrufliste der Ed. Züblin AG

Eine intensive Kommunikation ist insbesondere bei einem Zementwechsel im Transportbetonwerk nötig. Es muss geprüft werden, ob die Dauerhaftigkeit und Anwendbarkeit z.B. hinsichtlich der Umweltbedingungen mit der veränderten Betonrezeptur gegeben sind. (Kiltz & Meyer, 2022).

Dasselbe gilt für den Austausch eines Zusatzstoffs. Während der bisherigen Bauzeit des DonauTowers gab es Lieferschwierigkeiten der Flugasche, weshalb diese zwischenzeitlich von einem anderen Lieferanten bezogen wurde. Kurzzeitig wurde Beton mit geringerer Qualität geliefert. Das Problem konnte jedoch behoben werden. Zusätzlich wurden Betonsorten ohne Flugasche verwendet, wodurch das Sortenverzeichnis noch umfangreicher wurde. Die Bauleitung beschreibt die notwendige Reaktion auf die Zusatzstoffänderung und somit veränderte Betoneigenschaften als eine Hauptbesonderheit im Umgang mit den CO₂-effizienten Betonsorten. (Anhang 4.5).

Durch erweiterte Erstprüfungen des Betons unter den auf der Baustelle zu erwartenden Randbedingungen, vor allem der Luft- und Frischbetontemperatur, oder Probebetonagen können eine unzureichende Verarbeitbarkeit oder unerwartete Wechselwirkung mit Zusatzmitteln vermieden werden (Kiltz & Meyer, 2022). Beim DonauTower wurden stattdessen für verschiedene Randbedingungen Betonsorten mit entsprechenden Eigenschaften verwendet (vgl. Abbildung 27).

Die Annahmeprüfungen sind bei Beton mit klinkereffizientem Zement besonders sorgfältig durchzuführen und die Baustelle intensiver betontechnologisch zu betreuen. Grund dafür sind die niedrigen Wasserzementwerte, die den Beton empfindlicher gegenüber Veränderungen machen (Kiltz & Meyer, 2022).

Der DonauTower wurde engmaschig betontechnologisch betreut. In Einzelfällen konnte Beton nicht angenommen werden. Dies gilt jedoch für die CO₂-effizienten und die Standardsorten gleichermaßen. (Anhang 4.5).

Wenn die Umgebungstemperatur bei der Betonage besonders hoch oder niedrig ist, sind Vorsichtsmaßnahmen zu treffen. Da CO₂-effizienter Beton meist einen niedrigeren Zementgehalt aufweist und/oder der verwendete Zement eine niedrige Hydratationswärme entwickelt, muss dessen Frischbetontemperatur bereits bei einer Lufttemperatur von maximal +5°C höher als üblich sein. Die DIN 1045-3:2023-08 schreibt vor, dass die Betontemperatur „+10°C nicht unterschreiten [darf], wenn der Zementgehalt

im Beton kleiner ist als 240 kg/m^3 oder wenn Zemente mit niedriger Hydratationswärme verwendet werden“. (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2023a).

Um Verzögerungen des Bauablaufs zu vermeiden, wird beim Bau des DonauTowers nur bei Lufttemperaturen von mehr als 5°C CO_2 -effizienter Beton eingebaut. In Decken wird dieser erst bei mehr als 10°C eingesetzt. Die Abrufliste für Transportbeton (vgl. Abbildung 27) enthält Anmerkungen zu den minimalen Temperaturen für den Einsatz der einzelnen Sorten und alternativen Standardbetonsorten (vgl. Abbildung 27). Die Bauzeit hat sich aufgrund verschiedener Behinderungen z.B. Lieferschwierigkeiten von Rohren in die Wintermonate verschoben (vgl. Anhang 4.5). Folglich wurde deutlich weniger CO_2 -effizienter Beton eingebaut als ursprünglich geplant (siehe Kapitel 6.1.3).

Im Beispielprojekt wurde vorwiegend Transportbeton der Konsistenzklasse F4 eingebaut. Bei der Verarbeitung der CO_2 -effizienten Betonsorten gab es gemäß der Bauleitung keinen Mehraufwand. Der Grund dafür ist, dass CO_2 -effizienter Beton nicht bei kalten Temperaturen verwendet werden. (Anhang 4.5).

7.3. Auswirkungen der langsamen Festigkeitsentwicklung

Grundsätzlich ist die Festigkeitsentwicklung von CO_2 -effizienten Betonen im Vergleich zu herkömmlichen Sorten langsamer (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), 2021). Grund dafür können der verringerte Zementgehalt und/oder klinkereffizienter Zement sein.

Die langsamere Festigkeitsentwicklung ist die Eigenschaft von CO_2 -effizientem Beton mit der größten Auswirkung auf den Bauablauf.

Die Festigkeitsentwicklung eines Betonbauteils hängt nicht nur von betontechnologischen Einflüssen, insbesondere der Art und dem Gehalt des Zements ab (siehe Kapitel 3.3), sondern auch von den Abmessungen, der Schalung, Witterung und Wärmedämmung. Sie ist das maßgebende Kriterium zur Bestimmung der Ausrüst- bzw. Ausschallfrist. Verantwortlich für die Bestimmung des Ausschall- und Ausrüstzeitpunkts ist die Bauleitung. (Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V., 2013).

Aufgrund einer langsamen Festigkeitsentwicklung können sich die Nachbehandlungsdauer, Ausschal- und Ausrüstfrist gemäß DIN 1045-3:2023-08 und DIN EN 13670:2011-03 verlängern (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2023a; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2011). Laut DAfStb sind die „teilweise deutlich längeren Nachbehandlungsdauern“ und „längeren Standzeiten der Schalung“ als zu leistender Mehraufwand zu beachten (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), 2021). Auch der DBV gibt im Merkblatt „Nachbehandlung von Beton“ an, dass sich für langsamen oder sehr langsamen Beton „in der Regel“ Nachbehandlungsdauern und Ausschalfristen verlängern (Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V., 2019).

Die Druckfestigkeit von Beton wird gemäß DIN 1045-2:2023-08 und DIN EN 206-1:2021-06 üblicherweise nach 28 Tagen nachgewiesen. Die Festigkeitsentwicklung wird in der Regel durch das Verhältnis der mittleren Druckfestigkeiten nach 2 und nach 28 Tagen definiert:

Formel 3 Übliche Definition der Festigkeitsentwicklung

$$r = \frac{f_{cm2}}{f_{cm28}}$$

In Abhängigkeit von diesem r-Wert wird die Festigkeitsentwicklung eines Betons als „schnell“, „mittel“ oder „langsam“ bezeichnet (Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V., 2019).

7.3.1. Abweichendes Prüfalter

Bei „besonderen Anwendungen“ kann sich das Prüfalter auf 56 oder 91 Tage verlängern (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2021a). Zur Bestimmung der Festigkeitsentwicklung wird dann die mittlere Druckfestigkeit nach 56 oder 91 Tagen genutzt (Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V., 2019):

Formel 4 Definition der Festigkeitsentwicklung für Beton mit abweichendem Prüfalter

$$r = \frac{f_{cm2}}{f_{cm56}} \quad \text{bzw.} \quad r = \frac{f_{cm2}}{f_{cm91}}$$

Da sowohl die Ausschal- bzw. Ausrüstfrist als auch die Nachbehandlungsdauer abhängig von der Festigkeitsentwicklung und dem r-Wert bestimmt werden, hat das abweichende Prüfalter Einfluss auf den Bauablauf. Falls das Prüfalter eines CO₂-

effizienten Betons von 28 Tagen abweicht, muss dies schon bei der Takt- und Terminplanung berücksichtigt werden.

Die Vorgehensweise zur Berücksichtigung ist in der Bauausführung bekannt, da Beton mit abweichendem Prüfalter häufig für massige Bauteile eingesetzt wird. Der Einsatz von langsam erhärtendem Beton für massige Bauteile wird in der DAfStb-Richtlinie „Massige Bauteile aus Beton“ empfohlen (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb), 2010).

Der informative Anhang F „Regelungen bei von 28 Tagen abweichendem Nachweisalter der Druckfestigkeitsklasse“ beschreibt drei Bedingungen, die zur Abweichung von einem Prüfalter von 28 Tagen erfüllt werden müssen. Es muss ein „technisches Erfordernis“ vorliegen. Beim Einsatz von CO₂-effizientem Beton ist diese Bedingung meist aufgrund der „besonderen Anforderungen hinsichtlich Nachhaltigkeit“ erfüllt. (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2023a).

Das technische Erfordernis muss von der Überwachungsstelle bestätigt werden (Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V., 2019).

Außerdem müssen mindestens die Regelungen der Überwachungsklasse 2 befolgt und ein Qualitätssicherungsplan durch das Bauunternehmen erstellt werden (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2023a). Dieser muss Maßnahmen zu ggf. verlängerten Nachbehandlungsdauern, Ausschal- und Rüstfristen enthalten (Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V., 2019).

Für die CO₂-effizienten Betonsorten des DonauTowers wird Hochofenzement, also ein klinkereffizienter Zement, verwendet. Daraus resultiert für fast alle der hinsichtlich der THG-Emissionen optimierten Betonsorten ein abweichendes Prüfalter von 56 Tagen und eine mittlere bis langsame oder langsame Festigkeitsentwicklung. Nur eine CO₂-effiziente Betonsorte weist das übliche Prüfalter von 28 Tagen und eine mittlere Festigkeitsentwicklung auf (vgl. Tabelle 26), weil anstelle des Hochofenzements (CEM III/A) die Portlandkompositzemente CEM II/A-LL und CEM II/B-M (vgl. Kapitel 3.3.4) eingesetzt werden.

Aufgrund des abweichenden Prüfalters von 56 Tagen wurde nach der Betonage einer Stütze mit CO₂-effizientem Beton erst später als üblich bekannt, dass die Festigkeit des eingebauten Betons nicht der geforderten Klasse entspricht (Anhang 4.5). So

kann die späte Prüfung zu Mehraufwand bei der Nachbesserung führen und den Bauablauf erheblich stören.

7.3.2. Verlängerte Ausrüst- und Ausschallfristen

Die Voraussetzung zur Entfernung von Schalung, Hilfsstützen und Traggerüst gemäß DIN 1045-3:2023-08 ist eine ausreichende Betonfestigkeit. Für den Fall, dass die Schalung zur Nachbehandlung des Betons genutzt wird, kann die Nachbehandlungsdauer maßgebend werden. (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2023a).

Die Ausschal- und Ausrüstfrist ist in DIN 1045-3:2023-08 und DIN EN 13670:2011-03 geregelt. Zusätzlich ist das DBV-Merkblatt „Betonschalungen und Ausschallfristen“ zu beachten. Diese gelten unverändert für CO₂-effiziente und R-Betone. Es sind jedoch die folgenden Besonderheiten zu berücksichtigen.

Aufgrund einer langsameren Festigkeitsentwicklung kann die ausreichende Betonfestigkeit später erreicht und eine längere Schalungsstandzeit nötig werden.

Die Ausschal- und Ausrüstfrist von biegebeanspruchten Bauteilen aus Beton kann mithilfe von Erfahrung der bauausführenden Firma oder tabellarischen Anhaltswerten mit und ohne Nachweis der Ausschalfestigkeit bestimmt werden (Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V., 2013). Die tabellarischen Anhaltswerte der Ausschallfristen können auch für Beton mit abweichendem Prüfalter verwendet werden. Jedoch muss die mittlere Betondruckfestigkeit nach 2 Tagen wie zuvor beschreiben ins Verhältnis zur mittleren Betondruckfestigkeit zum Zeitpunkt des Nachweises, also nach 56 oder 91 Tagen, gesetzt werden. In der Regel ergeben sich daraus längere Ausschallfristen. (Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V., 2013, S. 17)

Tab. 3. Anhaltswerte für Ausschalfrieten t_0 in Tagen für Lastausnutzungsfaktor $\alpha_0 = 0,70$
 Table 3. Reference values for stripping times t_0 in days for a load factor $\alpha_0 = 0,70$

	1	2	3	4
	Bauteiltemperatur ²⁾ ϑ in °C	Festigkeitsentwicklung des Betons $r = f_{cm2} / f_{cm28}$ ¹⁾		
		schnell $r \geq 0,50$	mittel $r \geq 0,30$	langsam $r \geq 0,15$
1	$\vartheta \geq 15$	4	8	14
2	$15 > \vartheta \geq 5$ ³⁾	6	12	20

¹⁾ Die Festigkeitsentwicklung des Betons wird durch das Verhältnis der Mittelwerte der Druckfestigkeiten nach 2 Tagen und nach 28 Tagen beschrieben. Die Festigkeitsentwicklung ist vom Betonhersteller anzugeben und kann dem Lieferschein entnommen werden.
 Bei der Bestimmung der Festigkeitsentwicklung eines Betons bei von 28 Tagen abweichendem Prüfalter für die Druckfestigkeit ist für die Ermittlung der Festigkeitsentwicklung r nicht der f_{cm2}/f_{cm28} -Wert, sondern z. B. der f_{cm2}/f_{cm56} -Wert oder f_{cm2}/f_{cm91} -Wert heranzuziehen. Dadurch ergeben sich i. d. R. längere Ausschalfrieten.

²⁾ Die tatsächliche Temperatur des Bauteils ϑ während des Abfließens der Hydratationswärme und in der Schalung ist i. d. R. höher als die Lufttemperatur. Anstelle der Temperatur des Bauteils ϑ darf vereinfachend die mittlere Lufttemperatur ϑ_m angesetzt werden. Als mittlere Lufttemperatur ϑ_m darf das Tagesmittel aus der höchsten und der niedrigsten Lufttemperatur in Bauwerksnähe verwendet werden.

³⁾ Bei Lufttemperaturen $\vartheta_m < 5^\circ\text{C}$ ist die Ausschalffrist um die Tage zu verlängern, an denen die Bauteiltemperatur $\vartheta < 5^\circ\text{C}$ betrug.

Abbildung 28 Anhaltswerte für Ausschalfrieten, Tab. 3 aus: (Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V., 2013, S. 17), Markierung hinzugefügt

Die Ausschalfrieten können mit Nachweis der Ausschalfestigkeit genauer ermittelt werden, um die Schalungsstandzeit zu verkürzen (vgl. Kapitel 7.3.4).

Wenn Bauteile später belastbar werden, sind Hilfsabstützungen länger erforderlich und können ebenfalls den Bauablauf stören. Beispielweise durch die Verzögerung von Ausbauarbeiten oder weil Decken noch nicht als Lagerflächen für Material genutzt werden können (Kiltz & Meyer, 2022).

Beim DonauTower kam es bisher durch den Einsatz des CO₂-effizienten Betons nicht zu Verzögerungen des Bauablaufs, weil die einzelnen Takte ausreichend lang waren und Kapazitäten aufgrund der vier Takte gut harmonisiert wurden (Anhang 4.5). Auch die für den Turm geplanten zwei Takte je Decke wirken einer Bauzeitverlängerung durch die längeren Ausschalfrieten entgegen (vgl. Kapitel 7.3.4). Der Einsatz des CO₂-effizienten Betons wurde in der Arbeitsvorbereitung, insbesondere Takt- und Terminplanung, des DonauTowers nicht von Beginn an berücksichtigt, weil die Entscheidung für die alternativen Betonsorten zu einem späteren Zeitpunkt getroffen wurde (vgl. Anhang 4.5).

Außerdem wird teilweise präventiv auf den Einsatz der langsamer erhärtenden Betonsorten verzichtet, um eine Bauzeitverlängerung zu vermeiden. So wurde seit Mitte Oktober aufgrund der niedrigen Außenlufttemperaturen vor allem Standardbeton eingebaut. (Anhang 4.5).

Dadurch weicht der ausgeführte Zustand deutlich von der geplanten Optimierung ab und verursacht ein größeres Treibhauspotential.

Von der Verwendung von CO₂-effizientem Beton in Stützen wurde größtenteils abgesehen (Anhang 4.5). Die geringere Hydratationswärme des klinkereffizienten Hochofenzements wirkt sich in einem schlanken Bauteil und bei kalten Umgebungstemperaturen besonders negativ auf die Festigkeitsentwicklung und somit auf den Bauablauf aus. Aufgrund des geringen verbauten Betonvolumens in Stützen wirkt sich der Einsatz von Standardbeton nur geringfügig negativ auf das Treibhauspotential des gesamten Tragwerks aus.

Wären die zuvor beschriebenen Besonderheiten von Beginn an in der Arbeitsvorbereitung berücksichtigt worden, hätten deutlich mehr Bauteile aus CO₂-effizientem Beton erstellt werden können, ohne Verzögerungen im Bauablauf zu verursachen. Einige Maßnahmen, die einer Bauzeitverlängerungen aufgrund des Einsatzes von langsam erhärtendem Beton entgegenwirken, werden in Kapitel 7.3.4 aufgeführt.

7.3.3. Besonderheiten bei der Nachbehandlung

Die Art und Dauer der Nachbehandlung von Betonbauteilen sind ebenfalls in DIN 1045-3:2023-08 und DIN EN 13670:2011-03 geregelt. Zusätzlich ist das DBV-Merkblatt „Nachbehandlung von Beton“ zu beachten. Abhängig von der Empfindlichkeit und Festigkeitsentwicklung des Betons, den Expositionsklassen nach DIN 1045-2 und der Frischbeton- und Umgebungstemperatur sind verschiedene Maßnahmen zu ergreifen und Nachbehandlungsdauern einzuhalten (Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V., 2019).

Die Dauer der Nachbehandlung kann sich wie die Ausschalfristen für CO₂-effiziente Betone aufgrund der langsameren Festigkeitsentwicklung verlängern. In den Tabellen 6 und 7 der DIN 1045-3:2023-08 zur „Mindestdauer der Nachbehandlung von Beton“ ist für Beton mit verlängerten Prüfalalter die Anmerkung b bzw. c zu beachten (vgl. Abbildung 29). Die Hinweise des DAfStb-Heft 526 zum Ansatz maßgeblicher Temperatur

ren während des Nachbehandlungszeitraums gelten auch für CO₂-effiziente Betone (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2023a).

Nr.	1	2	3	4
Frischbetontemperatur T_{fb} zum Zeitpunkt des Betoneinbaus	Minstdauer der Nachbehandlung in Tagen ^a			
	Festigkeitsentwicklung des Betons ^b			
		schnell ($r \geq 0,5$)	mittel ($0,3 \leq r < 0,5$)	langsam ^c ($0,15 \leq r < 0,3$)
1	$T_{fb} \geq +15\text{ °C}$	1	2	4
2	$+10 \leq T_{fb} < +15\text{ °C}$	2	4	7
3	$+5 \leq T_{fb} < +10\text{ °C}$	4	8	14
<p>^a Bei mehr als 5 h Verarbeitbarkeitszeit ist die Nachbehandlungsdauer angemessen zu verlängern.</p> <p>^b Die Festigkeitsentwicklung des Betons wird – analog zu DIN 1045-2:2023-08, 7.2 (2) und (3a) – durch das Verhältnis der mittleren Druckfestigkeit nach 2 Tagen und nach 28 Tagen ($r = f_{cm2}/f_{cm28}$) beschrieben, das bei der Erstprüfung oder auf der Grundlage eines bekannten Verhältnisses von Beton mit vergleichbarer Zusammensetzung ermittelt wurde. Wird bei besonderen Anwendungen in den Ausführungsklassen AK E oder AK S die Druckfestigkeit zu einem späteren Zeitpunkt als 28 Tage bestimmt, ist für die Ermittlung der Nachbehandlungsdauer der Schätzwert des Festigkeitsverhältnisses entsprechend DIN 1045-2:2023-08, Tabelle 19 aus dem Verhältnis der mittleren Druckfestigkeit nach 2 Tagen ($f_{cm,2}$) zur mittleren Druckfestigkeit zum Zeitpunkt der Bestimmung der Druckfestigkeit unter Berücksichtigung von DIN EN 12390-2 zu ermitteln oder eine Festigkeitsentwicklungskurve bei 20 °C zwischen zwei Tagen und dem Zeitpunkt der Bestimmung der Druckfestigkeit anzugeben.</p> <p>^c Die Verwendung eines Betons mit langsamer Festigkeitsentwicklung setzt die Planungsklasse PK E und die Ausführungsklasse AK-E voraus.</p>				

Abbildung 29 Minstdauer der Nachbehandlung von Beton; Tabelle 7 aus (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2023a), Markierung hinzugefügt

Demnach muss die Festigkeitsentwicklung, die aus dem späteren Nachweis der Druckfestigkeit resultiert, zur Bestimmung der Minstdauer der Nachbehandlung verwendet werden. Deswegen ergeben sich für Betone mit langsamer oder sehr langsamer Festigkeitsentwicklung in der Regel längere Nachbehandlungsdauern. (Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V., 2019).

Betone der Expositionsklasse XF4 mit langsamer oder sehr langsamer Festigkeitsentwicklung werden der Nachbehandlungsklasse 4 zugeordnet. Diese gilt üblicherweise nur für Beton, der mechanisch beansprucht wird (Expositionsklasse nach DIN 1045-2: XM) (Tab. 5 aus: (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2023a)). Für solche Betone verdoppelt sich die Minstdauer der Nachbehandlung nach Tabelle 7 der DIN 1045-3:2023-08 (vgl. Abbildung 29). Die Zuordnung von langsam erhärtendem Beton für Bauteile der Expositionsklasse XF4 in Nachbehandlungsklasse 4, also eine Nachbehandlung bis 70% der Druckfestigkeit erreicht sind, wurde bereits 2019 im DBV-Merkblatt „Nachbehandlung von Beton“ empfohlen, um eine ausreichende Frost-Tausalz-Widerstandsfähigkeit zu gewährleisten (Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V., 2019).

Die langsamere Festigkeitsentwicklung wirkt sich auf eines der Ziele der Nachbehandlung positiv aus. Um das Risspotenzial infolge von Temperaturspannungen zu verringern, hilft die geringere Entwicklung von Hydratationswärme die Höchsttemperatur zu begrenzen. Das trägt zur Vermeidung von Trennrissen bei. (Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V., 2019).

Die Bauteile aus Standard- und CO₂-effizientem Beton wurden gemäß der Bauleitung beim DonauTower gleich nachbehandelt. Zusätzliche Maßnahmen waren nicht nötig. (Anhang 4.5). Das liegt auch daran, dass wie zuvor beschrieben auf den Einsatz von CO₂-effizienten Betonsorten bei kalten Umgebungstemperaturen verzichtet wird.

Das deckt sich mit Angabe des DAfStb, dass „die für die Nachbehandlung bedeutende Festigkeitsentwicklung von Betonen mit CEM II- und CEMIII/A-Zementen [...] unter baupraktischen Bedingungen vergleichbar“ (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), 2021) ist.

Es ist zu erwarten, dass die notwendige Nachbehandlungsdauer von Beton mit klinkereffizientem CEM II/C-M (S-LL) vergleichbar mit der von Beton mit CEM III/A ist. Diese kann etwas verlängert sein, befindet sich aber „im baupraktisch üblichen Bereich“ (Müller, 2023). Wenn der Klinkergehalt noch stärker reduziert wird wie bei CEM VI-Zementen, kann sich die Festigkeitsentwicklung weiter verlangsamen und die Mindestnachbehandlungsdauer deutlicher verlängern. (Müller, 2023).

Zusammenfassend sind folgende Auswirkungen auf den Bauablauf durch die Verwendung von langsam erhärtendem Beton möglich:

- Der Bauablauf kann durch „späteres Ausschalen“, „spätere Belastbarkeit der Bauteile und länger erforderliche Hilfsabstützungen“ (Kiltz & Meyer, 2022) gestört werden.
- Die Nachbehandlung ist vor allem bei niedrigen Temperaturen aufwändiger und länger erforderlich.

Diese möglichen Einflüsse müssen bereits in der Takt- und Terminplanung bedacht werden, um Bauzeitverlängerungen zu vermeiden. (Kiltz & Meyer, 2022).

7.3.4. Maßnahmen zur Vermeidung von Mehraufwand und Bauzeitverlängerungen aufgrund langsam erhärtenden Betons

Mit den folgenden Maßnahmen kann einer Bauzeitverlängerung aufgrund des Einsatzes von Beton mit langsamer Festigkeitsentwicklung entgegengewirkt werden:

Geschickte Taktplanung:

Wenn die langsamere Festigkeitsentwicklung von Beton mit klinkereffizientem Zement bei der Arbeitsvorbereitung berücksichtigt wird, fallen unerwartete Bauzeitverlängerungen geringer aus. Längere Ausschal- und Ausrüstfisten sowie Nachbehandlungsdauern sind bei der Takt- und Terminplanung zu berücksichtigen. Besonders negativ wirkt sich langsam erhärtender Beton auf die Bauzeit aus, wenn Takte ausschließlich vertikal aufeinander folgen. Für den Beginn der Arbeiten im nächsten Takt ist dann eine bestimmte Betonfestigkeit Voraussetzung. Geschickter ist es mehrere Takte je Geschoss zu planen. Während der notwendigen Schalungsstandzeit kann im nächsten Takt bereits weitergearbeitet werden.

Die unteren Geschosse des Donau-Towers wurden in jeweils vier Takten erstellt. Für die Ausführung des Turms sind zwei Takte je Geschoss vorgesehen (vgl. Abbildung 30), weil die Deckenflächen deutlich kleiner sind. Die langsamer erhärtenden Betonsorten wurden nicht in die Arbeitsvorbereitung des Donau-Towers miteinbezogen, weil die Entscheidung zum Einsatz von CO₂-effizientem Beton später getroffen wurde.

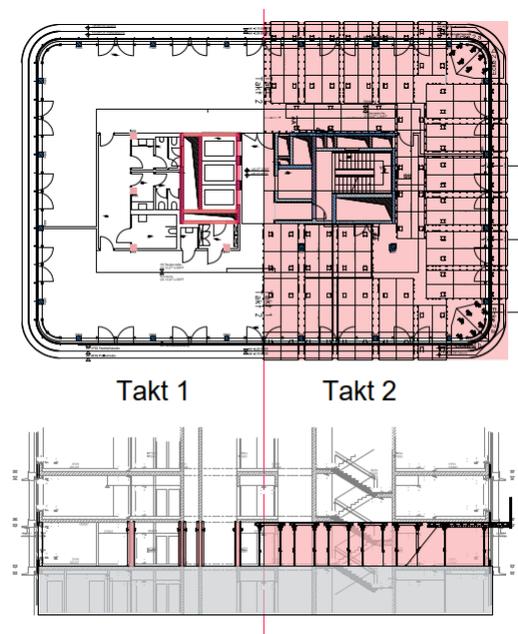


Abbildung 30 Skizze der Takteinteilung eines Turmgeschosses des Donau-Towers, Ausschnitt aus dem Taktplan der Ed. Züblin AG

Dank der verschiedenen Takte konnten Kapazitäten gut harmonisiert und die Bauteile fristgerecht ausgeschalt werden ohne Verzögerungen im Bauablauf zu verursachen (Anhang 4.5). Der Ausschnitt aus dem Taktplan des Turms des Donau-Towers zeigt das Prinzip in zwei Takten.

Verkürzte Schalungsstandzeit durch Ermittlung der Ausschalfrist mit Nachweis der Ausschalfestigkeit:

Erfahrungswerte und tabellarische Werte der Ausschalfristen (vgl. 7.3.2) liegen gegenüber der Ermittlung mit Nachweis der Ausschalfestigkeit auf der sicheren Seite. Die genauere Bestimmung des Ausschalzeitpunkts ermöglicht kürzere Ausschalfristen und kann somit einer Bauzeitverlängerung entgegenwirken.

Die Grundlage für den Nachweis der Ausschalfestigkeit sind Reifegrad- oder Druckfestigkeitsprüfungen. Soll der Nachweis mithilfe einer Druckfestigkeitsprüfung durchgeführt werden, müssen mindestens drei Probekörper aus dem im Bauteil verwendeten Beton hergestellt und möglichst gleichartig nachbehandelt werden. Dieses Vorgehen ist möglich, aber aufwändig. Stattdessen können Reifeformeln für die eingesetzten Betonsorten kalibriert werden. Aufgrund der starken Abhängigkeit zwischen der Temperaturentwicklung und dem Fortschritt der Erhärtungsreaktion von Beton, kann angenommen werden, dass die Druckfestigkeit von Betonen mit gleicher Zusammensetzung und Reife ebenfalls übereinstimmt. So kann auch die Reifegradprüfung zum Nachweis der Ausschalfestigkeit genutzt und mithilfe von Reifecomputern praktisch angewendet werden. (Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V., 2013).

Zum Beispiel kann das System "Concremote" der Firma Doka verwendet werden, um den frühestmöglichen Ausschalzeitpunkt mithilfe von Temperaturmessungen am Bauteil zu bestimmen. Mithilfe von Vorkalibrierungen kann außerdem die Festigkeitsentwicklung verglichen und somit in der Auswahl der Betonsorten für ein Projekt berücksichtigt werden. Die kontinuierlichen Messungen ermöglichen es früher auf Abweichungen zu reagieren. Es gibt Auskunft über die Festigkeitsentwicklung eines Bauteils bevor das ggf. verlängerte Prüfaltes (vgl. Kapitel 7.3.1) erreicht ist. Dadurch trägt es zur Qualitätssicherung bei. (Doka GmbH, 2023).

Solche Systeme können auch für Standardbeton genutzt werden, jedoch bieten Sie beim Einsatz von langsam erhärtendem Beton besonders großes Potenzial.

Auch der Mehraufwand bei der Nachbehandlung von langsam erhärtendem Beton kann reduziert werden.

Verkürzte Nachbehandlungsdauer durch Nachweis der erreichten Druckfestigkeit:

Neben der Nutzung von Tabellen zur Ermittlung der erforderlichen Nachbehandlungsdauer (vgl. Kapitel 7.3.3) ist gem. DIN 1045-3:2023-08 ein genauere Nachweis über die prozentual erreichte charakteristische Druckfestigkeit in den Nachbehandlungsklassen 2, 3 und 4 möglich. Dieser lässt in der Regel eine kürzere Nachbehandlungsdauer zu. Der Nachweis wird wie für die Ausschalfestigkeit anhand von Prüfkörpern oder mittels Reifegradprüfung durch Temperaturmessung am Bauteil durchgeführt (Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V., 2019). Dabei ist die zu erreichende Druckfestigkeit von der Mindestdruckfestigkeitsklasse der maßgebenden Expositionsklasse abhängig (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2023a). Mithilfe von Reifecomputern z.B. dem System „Concremote“ der Firma Doka kann die Einhaltung der erforderlichen Nachbehandlungsdauer überprüft werden (Doka GmbH, 2023).

7.4. Eignung für Bauteile mit besonderen Anforderungen

Bauteile mit hohem Wassereindringwiderstand:

Auch im Untergeschoss des DonauTowers wurden die Wände und die Bodenplatte aus Beton mit Hochofenzement erstellt. Die Anforderung des hohen Wassereindringwiderstands konnte erfüllt werden. Aufgrund von drückendem Wasser wurden in priorisierten Bereichen nicht nur Fugenbänder, sondern auch Frischbetonverbundfolie eingebaut. In manchen Fällen kann auf den Einsatz der Frischbetonverbundfolie verzichtet werden, jedoch handelt es sich hier um eine übliche Bauweise. (Anhang 4.5).

Es gelten die üblichen Regelwerke, insbesondere die DAfStb-Richtlinie „Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton“.

Bauteile mit Sichtbetonanforderungen:

Grundsätzlich kann CO₂-effizienter Beton für Bauteile in Sichtbetonqualität verwendet werden. Die DIN 1045-3:2023-08 verweist zur Ausführung von Sichtflächen auf das DBV/VDZ-Merkblatt „Sichtbeton“. Auch das DBV-Merkblatt „Nachbehandlung von Beton“ beschreibt, wie Anforderungen an das Aussehen von Sichtbetonflächen erreicht werden (Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V., 2019).

Für den DonauTower gibt es eine Arbeitsanweisung zu Sichtbeton. Diese enthält den Hinweis, dass aufgrund der langsamen Festigkeitsentwicklung der CO₂-reduzierten Betone eventuell einzelne Forderungen des DBV/VDZ-Merkblatts „Sichtbeton“ nicht umgesetzt werden können. Das betrifft vorrangig die Betonage bei kalten Umgebungstemperaturen, d.h. um 0°C und weniger. Jedoch wurde von der Betonage mit CO₂-reduzierten Sorten bei Umgebungstemperaturen unter 5°C abgesehen (vgl. Kapitel 6.1.3 und 7.3). Außerdem ist ein Wechsel der Ausgangsstoffe, insbesondere der Zementart, mit dem Auftraggebenden zu besprechen. Dieser ist gemäß DBV-Merkblatt „Sichtbeton“ zur Vermeidung farblicher Unterschiede der Betonflächen nicht zulässig (vgl. DBV. & VDZ, 2015).

An die Treppenkernelwände, Wände im Erdgeschoss (siehe Abbildung 31) und Stützen des DonauTowers wurden Sichtbetonanforderungen der Klasse SB3 gestellt. Der notwendige Aufwand zur Betonkosmetik war bisher nicht höher als üblich. Bisher wurden vor allem Fassadenstützen betonkosmetisch behandelt, die jedoch aus Standardbeton erstellt wurden. Weder eine schlechtere Sichtbetonqualität noch ein erhöhter Aufwand für die betonkosmetische Behandlung der Bauteile aus Beton mit klinkereffizientem Zement zeichnet sich ab. Die Farbunterschiede sind vergleichbar mit denen zwischen Standardbetonen unterschiedlicher Rezeptur z.B. aufgrund verschiedener Festigkeitsklassen. (Anhang 4.5).



Abbildung 31 Wandfläche im EG des DonauTowers aus CO₂-effizientem Beton, Eigenes Foto

8. Auswirkungen des CO₂-effizienten Betons auf die Baukosten

Die Auswirkungen des CO₂-effizienten Betons auf die Baukosten lassen sich in Mehrkosten für den Transportbeton selbst und indirekte Mehrkosten, die sich vor allem aus dessen veränderten Frischbetoneigenschaften ergeben, gliedern. Zunächst werden die Mehrkosten für den Beton des Beispielprojekts quantitativ ausgewertet. Anschließend wird allgemein und am Beispiel des DonauTowers gezeigt, wie indirekte Kosten aus dem Einsatz von CO₂-effizientem Beton resultieren können.

8.1. Direkte Mehrkosten für den Transportbeton

Die Zusammensetzung der Nettopreise für Beton wurde bereits in Kapitel 2.2.1 erklärt. Die Kosten für die Beschaffung von Beton mit klinkereffizienten Zementen z.B. CEM II/A-B oder CEM III/A lagen im Juli 2022 „im üblichen Rahmen“ (Kiltz & Meyer, 2022). Derzeit liegen Aufpreise für CO₂-effizienten Transportbeton in Bayern bei ca. 5,6 Euro / m³ für CO₂-Klasse Level 1 und 7,5 Euro / m³ (vgl. Kapitel 5.4.1). Zu den Beschaffungskosten von Beton mit CEM II/C-M lagen 2022 wenige Erfahrungen vor (Kiltz & Meyer, 2022). Auch 2023 machten wenige Transportbetonhersteller Preisangaben zu derartigen Betonsorten (siehe Kapitel 5.4.1). Trotzdem sollte im Vergleich zu konventionellem Beton mit höheren Kosten gerechnet werden (Kiltz & Meyer, 2022).

Beim DonauTower wurden die CO₂-effizienten Sorten für die Bodenplatte kostenneutral geliefert. Allerdings wurde für die darüberliegenden Bauteile eine Zulage von drei Euro / m³ für Transportbeton mit dem klinkereffizienten Zement CEM III/A vereinbart. Verglichen mit den Preisen für eine Zementänderung und Aufpreisen für Betone der CO₂-Klasse Level 1 in Kapitel 5.4.1, liegt diese Zulage im unteren üblichen Bereich. Bei der Bauausführung ist mit höheren Mehrkosten zu rechnen (Kiltz & Meyer, 2022). Deren Herkunft wird im Folgendem beschrieben.

8.2. Indirekte Mehrkosten für Lohn und Material

Auch auf die Baukosten hat die für CO₂-effiziente Betone übliche, langsame Festigkeitsentwicklung den größten Einfluss. Die folgende Abbildung 32 stellt vereinfacht die Ursachen für mögliche Mehrkosten dar. Bei den Ursachen handelt es sich um Auswirkungen auf den Bauablauf, die bereits in Kapitel 7 beschrieben wurden und Kosten verursachen.

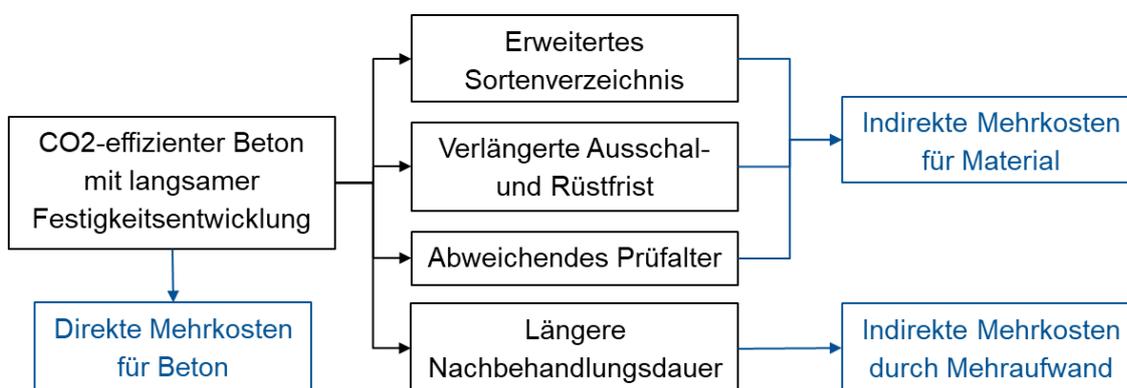


Abbildung 32 Ursachen möglicher Mehrkosten durch den Einsatz von CO₂-effizienten Beton mit langsamer Festigkeitsentwicklung

Ein umfangreicheres Sortenverzeichnis oder eine notwendige Änderung der Betonrezeptur führen aufgrund des höheren Abstimmungsaufwands und der aufwändigeren Eigenüberwachung und Qualitätssicherung zu Mehrkosten für qualifiziertes Personal. Wird aufgrund des abweichenden Prüfalters später bekannt, dass ungeeigneter Beton verbaut wurde, können die Kosten für den Rückbau deutlich höher sein. (Kiltz & Meyer, 2022).

Beide Besonderheiten sind beim DonauTower aufgetreten (siehe Kapitel 7.2).

Zur Vermeidung von schlechter Verarbeitbarkeit unter Baustellenbedingungen können zum Beispiel erweiterte Erstprüfungen oder Probestonagen durchgeführt werden oder für verschiedene Umgebungstemperaturen eigene Betonrezepturen entwickelt werden (Kiltz & Meyer, 2022). Jede dieser Maßnahmen führt zu Mehrkosten im Vergleich zum Einsatz von konventionellem Beton.

Betone mit niedrigen Wasserzementwerten, wie für klinkereffiziente üblich, sind empfindlicher gegenüber Veränderungen, weshalb höhere Kosten für die betontechnische Betreuung einer Baustelle einzuplanen sind (Kiltz & Meyer, 2022).

Wenn Bauteile aus CO₂-effizientem Beton aufwändiger oder länger nachbehandelt werden müssen, steigen die Lohnkosten und gegebenenfalls auch Kosten für notwendige Hilfsstoffe wie Curing-Mittel oder Folien. Das trifft vor allem bei kalten Umgebungstemperaturen zu. Ist das Belassen in der Schalung Teil der Nachbehandlung, kann dadurch sogar ein weiterer Schalungssatz nötig werden (siehe Kapitel 7.3).

Auch der DAfStb gibt in der Planungshilfe zum nachhaltigen Bauen mit Beton an, dass der zu leistende Mehraufwand für längere Schalungsstandzeiten und Nachbehandlungsdauern bei einer „weitere[n] Reduzierung des Klinkergehalts im Zement oder des Zementgehalts im Beton“ berücksichtigt werden muss (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), 2021).

Eine größere Vorhaltemenge an Schal- und Rüstmaterial kann bei entsprechender Taktplanung eine indirekte Folge von längeren Ausschal- und Rüstfristen sein. Die Alternative wäre in diesem Fall eine Bauzeitverlängerung. Beides verursacht erhebliche Mehrkosten, denen jedoch mit den in Kapitel 7.3.4 beschriebenen Maßnahmen entgegengewirkt werden kann. Auch diese Gegenmaßnahmen z.B. Reifegradprüfungen mittels Temperaturmessung verursachen Mehrkosten für qualifiziertes Personal und Material. Im Fall von Reifegradprüfungen mittels Temperaturmessung ist für jede verwendete Betonsorte zunächst eine Kalibrierung notwendig (Doka GmbH, 2023). Je mehr verschiedene Sorten genutzt werden, desto teurer wird dieses Vorgehen.

Die indirekten Mehrkosten lassen sich für das Beispielprojekt DonauTower nicht quantitativ ermitteln. Weder in der Takt- und Terminplanung noch in der Schalungsplanung wurde der Beton mit klinkereffizientem Zement zunächst berücksichtigt.

Ob Kosten durch eine Bauzeitverlängerung oder größere Vorhaltemenge der Schalung beim DonauTower aufgrund des Einsatzes von CO₂-effizientem Beton entstanden sind, lässt sich nicht eindeutig klären. Der Vergleich verschiedener Stände der Terminplanung zeigt eine Bauzeitverlängerung, aus der Kosten entstanden sind. Wie in Kapitel 7 beschrieben, sind die Gründe dafür vielfältig. Gemäß der Bauleitung kam es zu keiner Verzögerung des Bauablaufs, weil ein Bauteil aus Beton mit Hochofenzement noch nicht ausgeschalt werden konnte (vgl. Anhang 4.5).

Die Schalungsmenge auf der Baustelle hängt wie die Bauzeit von vielfältigen Einflussfaktoren ab, weshalb Mehrkosten für Schalung beim DonauTower nicht eindeutig zugeordnet werden können. Es konnte kein zeitlicher Zusammenhang zwischen der auf

der Baustelle befindlichen Schalungsmenge und dem Einsatz von CO₂-effizientem Beton hergestellt werden. Deswegen wird davon ausgegangen, dass eine Bauzeitverlängerung nicht durch mehr Schal- und Rüstmaterial vermieden wurde.

9. Diskussion der Ergebnisse

Die Wechselwirkungen zwischen der THG-Emissionsreduktion und Ressourcenschonung bzw. Dauerhaftigkeit des Betons werden dargestellt. Es wird diskutiert, wie sich die zu erwartende Veränderung der Verfügbarkeit von Ersatzstoffen für Zementklinker auf das Angebot von CO₂-effizientem Beton und auf die Bauausführung auswirkt. Die THG- bzw. Ressourceneinsparpotentiale werden von der bisher betrachteten Produkt- und Tragwerksebene auf den gesamten Lebenszyklus eines Bürogebäudes übertragen. Schließlich werden die Ergebnisse in Anreizsysteme für den Einsatz von CO₂-effizientem und R-Beton eingeordnet.

9.1. Wechselwirkungen

9.1.1. Reduktion des Treibhauspotentials und Ressourcenschonung

Grundsätzlich ist es möglich, die Ziele der Ressourcenschonung und der THG-Reduktion gleichzeitig zu verfolgen. Zum Beispiel können klinkereffiziente Zemente mit rezyklierter Gesteinskörnung in einer Betonrezeptur kombiniert werden.

Aber es kann aufgrund der Eigenschaften der RC-Gesteinskörnung ein höherer Zementgehalt für R-Beton erforderlich werden. Der Wasseranspruch schwankt aufgrund der Inhomogenität des Sekundärmaterials und ist höher als beim ausschließlichen Einsatz primärer Gesteinskörnung. Während Primärrohstoffe wie Kies geschont werden, wird mehr Wasser verbraucht. Für den Einsatz von R-Beton im Sinne der Nachhaltigkeit sind kurze Transportwege zwischen Abbruch, Aufbereitung und Ort des Einsatzes von Bedeutung. Diese sind im Einzelfall zu betrachten und in der Entscheidung für ein Produkt bzw. einen Transportbetonlieferanten zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 5.3.2).

Die Tendenz eines höheren Treibhauspotentials von R-Beton im Vergleich zu einem äquivalenten Standardbeton ist aus den Antworten von Transportbetonherstellern auf den Fragebogen (siehe Tabelle 32) und generischen Datensätzen der OBD 2023-I erkennbar (vgl. Kapitel 5.3.2 und 6.2.1). Trotzdem erreichen einige der R-Betonsorten die CO₂-Klasse Level 1 und liegen so unter den durchschnittlichen THG-Emissionen der Betonherstellung in Deutschland (siehe Abbildung 16). Bei diesen R-Betonsorten liegt der Anteil der rezyklierten Gesteinskörnung bei 20 bzw. 25 bis 25 Volumen-

Prozent des groben Zuschlags. Die Betonrezepturen wurden nur hinsichtlich des Ressourcenverbrauchs verbessert. Eine projektspezifische Anpassung der Zementart und -menge kann der Erhöhung des GWP entgegenwirken.

Tabelle 32 GWP der Betonsorten der Hersteller E bis G, Anhang 3.1 und (Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2022a)

Hersteller, Produkt	GWP [kg CO ₂ e / m ³] (A1-A3)			in Bezug auf die Standard- sorte desselben Herstellers			in Bezug auf die CSC- Branchenreferenzwerte		
	C25/30	C30/37	C35/45	C25/30	C30/37	C35/45	C25/30	C30/37	C35/45
E, CO ₂ -effizient	127,70	141,50	155,30	-21%	-21%	-20%	46%	46%	46%
F, CO ₂ -effizient.	143,06	154,25	-	-16%	-14%	-	40%	41%	-
G, CO ₂ -effizient.	140,18	147,74	-	-15%	-20%	-	41%	43%	-
E, R-Beton	166,60	184,80	-	+3%	+3%	-	30%	29%	-
F, R-Beton	172,04	180,14	192,29	+1%	+1%	+1%	27%	31%	33%
G, R-Beton	172,56	181,92	-	+5%	-2%	-	27%	30%	-
CSC-Branchen- referenzwerte	237,00	261,00	286,00						

Um eine negative Wechselwirkung der Ressourcenschonung durch den Einsatz rezyklierter Gesteinskörnung mit dem Treibhauspotential zu vermeiden, müssen die Transportentfernungen zwischen Abbruch, Aufbereitung (siehe Kapitel 5.3.2) und Einsatzort (vgl. Kapitel 6.2.4) kurz sein. Weil die Transportbetonhersteller der Umfrage das Sekundärmaterial regional beziehen oder selbst herstellen, ist das GWP der R-Betone in der Größenordnung der äquivalenten Standardsorten (siehe Tabelle 32).

Auch auf Tragwerksebene (vgl. Kapitel 6.2.3) zeigt sich, dass die Varianten 8 und 10 mit R-Beton im Vergleich zu den Varianten mit CO₂-effizientem Beton ein höheres Treibhauspotential aufweisen. Trotzdem liegen sie unter den für Deutschland typischen Werten (Variante 4) (siehe Abbildung 33). Die einzige Ausnahme ist die hypothetische Variante 5. Das GWP ist höher, weil generische Daten für Transportbeton mit ausschließlichem Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung angenommen werden. Dieser R-Beton ist nur für die Expositionsklasse X0 geeignet. Bei der Anpassung der Rezeptur an weitere Anforderungen ist aufgrund höherer Mindestzementgehalte (siehe Kapitel 3.3.3) mit einer Steigerung des GWP zu rechnen.

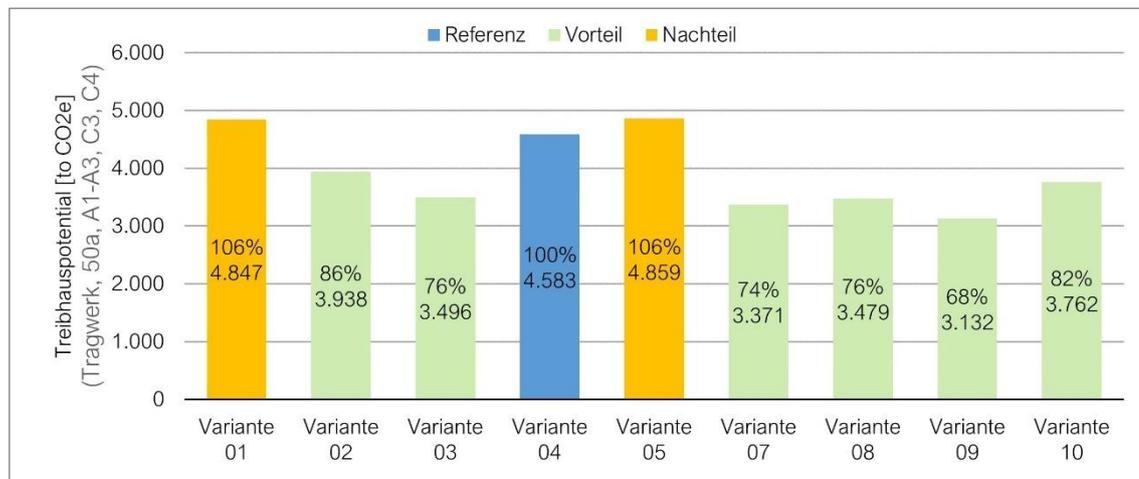


Abbildung 33 Treibhauspotential der Varianten des Tragwerks in Bezug auf Variante 4, Anhang 4.2

Zusammenfassend ist der Einsatz rezyklierter Gesteinskörnung im Sinne der THG-Reduktion mit klinkereffizientem Zement zu kombinieren, der Anteil des Sekundärmaterials zu begrenzen und die Transportwege der Module A2 und A4 kurz zu halten.

Auch Urban, Schade & Kiltz empfehlen nur ca. 20 bis 25 Prozent des Gesteinskörnungsvolumens mit rezyklirtem Material zu ersetzen und CO₂-effizienten Zement zu verwenden, um eine negative Auswirkung auf das Treibhauspotential zu vermeiden. Damit R-Beton nicht nur Ressourcen sondern auch das Klima schont, wird eine maximale Transportdistanz des Recyclingmaterials von 25 Kilometern angegeben. (2023).

Die Empfehlung passt zu den Ergebnissen dieser Masterarbeit und spricht für eine projektspezifische Betrachtung und eine Kombination von Maßnahmen zur THG-Reduktion und Ressourcenschonung.

Diese Maßnahmen können auch positive Wechselwirkungen haben. Wird ein späteres Nachweisalter als die übliche 28 Tage gewählt, um das Nacherhärtungspotenzial von Beton zur THG-Emissionsreduktion zu nutzen, hat der Beton eine langsame bis sehr langsame Festigkeitsentwicklung. Das geht mit einer geringeren Hydratationswärme einher, wodurch die Mindestbewehrung zur Rissbreitenbegrenzung infolge frühen Zwangs verringert werden kann. Dadurch können ca. 10% weniger Bewehrung nötig werden. (Fingerloos & Schachinger, 2022).

9.1.2. Reduktion des Treibhauspotentials und Dauerhaftigkeit

Bei der Reduktion des Treibhauspotentials von Beton darf dessen Dauerhaftigkeit nicht gefährdet werden. Im Sinne der Nachhaltigkeit ist die hohe Dauerhaftigkeit ein entscheidender Vorteil des Baustoffs (siehe Kapitel 3.1). Wird der Zementgehalt reduziert oder bestimmte klinkereffiziente Zemente zur THG-Reduktion eingesetzt, kann die Dauerhaftigkeit des Betons unter bestimmten Umgebungsbedingungen beeinträchtigt werden. Der aktuelle Ansatz zur Gewährleistung einer ausreichenden Dauerhaftigkeit ist deskriptiv. Anhand der Umweltbedingungen werden Expositionsklassen für ein Betonbauteil festgelegt aus denen der Mindestzementgehalt, die Mindestbetondruckfestigkeit, die Mindestbetondeckung und der maximale Wasserzementwert resultieren (vgl. Kapitel 3.3.3).

Für die in Deutschland üblichen Feuchtebedingungen unterscheiden sich die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten von Beton mit Hüttensand- und Portlandzement nicht signifikant (Müller, 2023).

Es ist üblich die Eignung einer Betonrezeptur, die von der normativen Grenzrezeptur abweicht, für eine Expositionsklasse mithilfe einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung nachzuweisen. In diesem Fall erfolgt der Nachweis der Dauerhaftigkeit nicht deskriptiv, sondern leistungsbezogen. So kann der Klinkergehalt in Beton deutlicher durch den Einsatz von Kalkstein gesenkt werden, weil Rezepturen mit einem niedrigerem Wasserzementwert geprüft werden können. (Müller, 2023).

Um die Dauerhaftigkeit mit einem deutlich reduziertem Klinkerfaktor beizubehalten, muss also die ganze Betonrezeptur optimiert und nicht nur eine andere Zementart verwendet werden.

Die „Exposure Resistance Classes (ERC)“ des nächsten Eurocode 2 dienen einem leistungsbezogenen Nachweis der Dauerhaftigkeit im üblichen Hochbau. Die deskriptiven Angaben des Mindestleimvolumens und einem Mindestklinkergehalt von 70 kg / m³ Beton werden nach DIN EN 1045-2:2023-08 als Einzige beibehalten. Dieser Ansatz dient Betonherstellern als Alternative zum deskriptiven Nachweis, um eine Betonrezeptur hinsichtlich der THG-Emissionen durch die Verringerung des Zementklinkergehalts zu optimieren, ohne die Dauerhaftigkeit zu gefährden. Weil Klinkerersatzstoffe wie Flugasche und Kalksteinmehl für das Mindestleimvolumen angerechnet werden

können, benötigen z.B. die CEM VI-Zemente nach DIN 197-5 (siehe Kapitel 3.3.4) keine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung mehr. (Müller, 2023).

Die Wechselwirkungen der THG-Reduktion mit der Ressourcenschonung und der Dauerhaftigkeit sprechen für eine weitere Diversifizierung der Betonsorten und somit ein deutlich erweitertes Sortenverzeichnis (vgl. Kapitel 7.2) mit passenden Rezepturen für verschiedene Anforderungen in einem Hochbauprojekt.

9.2. Entwicklung der Verfügbarkeit von Zementklinkerersatzstoffen und daraus resultierende Auswirkungen auf die Bauausführung

9.2.1. Zukünftige Verfügbarkeit von Ersatzstoffen für Zementklinker

Aktuell wird vor allem Hochofenzement zur Reduktion des Klinkerfaktors und folglich der THG-Emissionen der Betonherstellung verwendet (siehe Kapitel 5.2). Für eine Zementänderung zu CEM III/A werden ca. 3 bis 9,5 Euro je Kubikmeter Beton berechnet (vgl. Kapitel 5.4.1).

Hochofenzemente weisen gute Einsparpotentiale von ca. 50% im Vergleich zu Durchschnittszement in Deutschland auf, sind aber keine langfristige Lösung. Grund dafür ist, dass die Verfügbarkeit der Ersatzstoffe Hüttensand und Flugasche deutlich sinken wird. Diese sind Nebenprodukte aus der Stahlproduktion und aus Kohlekraftwerken. Die verfügbare Menge von Hüttensand ist begrenzt und wird bereits vollständig eingesetzt. (Bechmann & Weidner, 2023).

Im Zuge der Dekarbonisierung der Stahlindustrie und der Abschaltung der Kohlekraftwerke entfallen diese Ersatzstoffe. Die Primärrohstoffe Kalkstein und calcinierte Tone können ebenfalls als Substitutionsstoffe verwendet werden, um den Klinkerfaktor zu senken. (Umweltbundesamt, 2020). Dabei steigt der Ressourcenverbrauch.

Gemäß VDZ können durch die Reduktion des Klinkerfaktors und den Einsatz von Betonbrechsanden ca. 11 Millionen Tonnen Primärrohstoffe geschont werden, während der Entfall der Sekundärstoffe Hüttensand und Flugasche durch ca. 5 Millionen Tonnen Primärmaterialien ersetzt werden muss. Auf lange Sicht bleiben heimische Primärrohstoffe die Grundlage für Zement und Beton (Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2023).

Es ist mit einer Preissteigerung für Hochofenzement zu rechnen, bis dieser vollständig entfällt. Das Angebot an CEM II/C-M-Zementen wird steigen, während die Verfügbarkeit von CEM III sinkt. Auch alternative Bindemittel mit bisher unbestimmtem Potential werden weiterentwickelt (siehe Kapitel 3.3.5).

Die aktuelle Verfügbarkeit von Beton mit Portlandkompositzement CEM II/C-M ist deutlich geringer als von Beton mit Hochofenzement (siehe Kapitel 5.2). Bisher werden Aufpreise für den Einsatz von Zementen mit Kalkstein selten in Preislisten oder Produktverzeichnissen angegeben. Die Betonsorten mit CEM II/C-M eines Transportbetonlieferanten liegen preislich ca. 15 bis 20 Prozent über den Standardprodukten (siehe Tabelle 20). Nach E DIN EN 197-1:2018-11 kann die Hälfte des Klinkers der Normalzementart CEM II/C-M ersetzt und bis zu 20 Prozent Kalkstein verwendet werden. Die DIN 197-5:2021-07 begünstigt den Einsatz von Kalkstein in Zement, weil neben dem Klinker zwei weitere Hauptbestandteile für CEM II/C-M und CEM VI zugelassen werden. Portlandkompositzemente CEM II/C-M können in den Expositionsklassen des üblichen Hochbaus (Innenbauteile XC1, Außenbauteile XC4 XF1) eingesetzt werden. Für diesen Anwendungsbereich wird ca. 65 Prozent des Ortbetons in Deutschland verwendet. Mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung sind weitere Einsatzbereiche möglich (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), 2021). CEM VI-Zemente sind bisher für wenige Anwendungen geeignet. Diese werden mit steigenden Anforderungen an die Umweltwirkung Bedeutung gewinnen, da der Klinkergehalt auf bis zu 25 Prozent reduziert werden kann (Müller, 2023). Die Optimierung des Betons im Hochbau birgt großes Potential, weil darin zwei Drittel des Zements verwendet werden (Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2023a).

Die zu erwartende Veränderung der erhältlichen Klinkerersatzstoffe zeigt, dass eine regionale und projektspezifische Ermittlung der Verfügbarkeit von CO₂-effizientem Beton – wie in Kapitel 5.1.3 empfohlen – sinnvoll ist.

9.2.2. Auswirkungen auf die Bauausführung und fehlende Baustellenerfahrungen

Wie zuvor beschrieben werden sich die Marktanteile der Zementklinkerersatzstoffe verändern. Die langsame bis sehr langsame Festigkeitsentwicklung ist jedoch unabhängig von den verwendeten Ersatzstoffen typisch für Beton mit klinkereffizientem Zement (Müller, 2023). Auch bei alternativen Bindemitteln ist mit einer geringen Frühfestigkeit zu rechnen (Bechmann & Weidner, 2023). Mit den daraus resultierenden

Auswirkungen auf den Bauablauf, die Bauzeit (siehe Kapitel 7) und die Baukosten (siehe Kapitel 8) ist zu rechnen.

Wie am Beispiel des DonauTowers beschrieben, kann Beton mit klinkereffizientem Zement bereits eingesetzt werden. Es fehlen jedoch Baustellenerfahrungen, insbesondere mit stärker CO₂-reduzierten Betonen, z.B. mit klinkereffizientem CEM VI, und unter verschiedenen Baustellenrandbedingungen, z.B. kalten Umgebungstemperaturen (vgl. Kiltz & Meyer, 2022). Folglich fehlen auch Erfahrungswerte zu direkten und indirekten Mehrkosten, die aus dem Einsatz von CO₂-effizientem Beton mit langsamer Festigkeitsentwicklung entstehen.

Die Verantwortung die THG-Emissionen von Zement und Beton zu senken, liegt zunächst bei den Produzenten. Bauausführende wie die Ed. Züblin AG müssen diese Entwicklung unterstützen, indem sie optimierte Produkte nachfragen und Rückmeldung zu deren baupraktischer Eignung geben (vgl. Kiltz & Meyer, 2022). Für die Bauausführung sind robuste Eigenschaften des Frischbetons und eine praxistaugliche Festigkeitsentwicklung von besonderer Bedeutung. Außerdem sammeln Ausführende so bereits Erfahrung im Umgang mit Beton mit neuen klinkereffizienten Zementen, bevor sie aufgrund mangelnder Verfügbarkeit der Ersatzstoffe Hüttensand und Flugasche zum Einsatz entsprechender Produkte gezwungen sind.

Ziel ist es, Betone mit (neuen) klinkereffizienten Zementen zu entwickeln, die in der Breite anwendbar sind (Müller, 2023). Deswegen sollte die Betonrezeptur gemeinsam mit dem Bauablauf optimiert werden. Dasselbe gilt für die projektspezifische Optimierung. Ein möglichst frühzeitiger und regelmäßiger Austausch zwischen den Planenden, Ausführenden und der Betontechnologie ist notwendig, um negativen Auswirkungen auf Bauablauf, -zeit und -kosten entgegenzuwirken (vgl. Kapitel 7.3.4). Außerdem kann so verhindert werden, dass die Bauausführung aufgrund veränderter Baustellenrandbedingungen vom geplanten Einsatz des CO₂-effizienten Betons abweichen muss. Das war beispielweise beim DonauTower der Fall. Die Kommunikation zwischen den Beteiligten ist entscheidend und wird durch die gemäß DIN 1045-1000:2023-08 verpflichtenden BBQ-Ausführungsgespräche unterstützt. Trotzdem werden sich die Bauzeiten unter steigenden Anforderungen an die Umweltwirkungen und infolge des Einsatzes von klinkereffizienten Zementen voraussichtlich verlängern (Kiltz & Meyer, 2022).

9.3. Übertragung der Ergebnisse auf die Gebäudeebene

Im Vergleich zu den Einsparpotentialen auf Produktebene (siehe Kapitel 5), sind die auf Tragwerksebene (siehe Kapitel 6) geringer. Diese sind jedoch im Fall von R-Beton aussagekräftiger, weil verschiedene Anforderungen an Betonbauteile, insbesondere hinsichtlich der Dauerhaftigkeit, berücksichtigt werden. Der Anwendungsbereich und zulässige Anteil von Sekundärmaterial sind bei R-Beton durch die Umweltbedingungen begrenzt (siehe Tabelle 8 und Tabelle 9). Derzeit wird der Einsatzbereich von CO₂-effizientem Beton durch die Auswirkungen auf den Bauablauf, insbesondere die langsamere Festigkeitsentwicklung, aus baupraktischen Gründen eingeschränkt (siehe Kapitel 7). Die geringeren Einsparpotentiale resultieren im Fall des CO₂-effizienten Beton jedoch aus den unveränderten THG-Emissionen des Betonstahls.

Es stellt sich die Frage, wie groß das Treibhausgas-Einsparpotential auf Gebäudeebene ist.

Die Bauwerkskonstruktion verursacht bei Bürogebäuden durchschnittlich 35 Prozent der THG-Emissionen. Die anderen 65 Prozent resultieren aus der Nutzung. Unter der Annahme, dass 80 Prozent des Treibhauspotentials der Bauwerkskonstruktion aus dem Tragwerk resultiert, hat dieses einen Anteil von 28 Prozent am GWP eines gesamten Gebäudes und seiner Nutzung (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb), 2023).

Unter der Annahme dieser Verteilung der THG-Emissionen, ergibt sich für den geplanten teilweisen Einsatz von CO₂-effizientem Beton im Tragwerk des DonauTowers (Variante 2) auf Gebäudeebene ein THG-Einsparpotential von knapp vier Prozent. Die Varianten 8 und 10 mit R-Beton ermöglichen eine Reduktion des Treibhauspotentials des Gebäudes um mind. fünf Prozent. Für die Varianten 3, 7 und 9 mit ausschließlichen Einsatz von CO₂-effizientem Beton liegen die THG-Einsparpotentiale auf Gebäudeebene bei 6,7 bis 9,0 Prozent (siehe Tabelle 33).

Der Einsatz von CO₂-effizientem Beton bietet auch bei der Betrachtung des gesamten Gebäudes und seiner Nutzung relevante THG-Einsparpotentiale.

Tabelle 33 Gegenüberstellung des THG-Einsparpotentials in Bezug auf Variante 4 auf Tragwerks- und Gebäudeebene, auf Grundlage von Anhang 4.2 und (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb), 2023)

Variante		THG-Einsparpotential auf Tragwerksebene [%]	THG-Einsparpotential auf Gebäudeebene [%]
2	Teilweise CO ₂ -effizient - projektspezifisch	14	3,9
3	CO ₂ -effizient - projektspezifisch	24	6,7
4	Transportbeton – generisch (OBD 2023-I)	0	0
7	CO ₂ -effizient - spezifisch (ECOPact)	26	7,3
8	R-Beton – spezifisch (Hersteller F)	24	6,7
9	CO ₂ -effizient, spezifisch (Hersteller E)	32	9,0
10	R-Beton – spezifisch (Hersteller E)	18	5,0

9.4. Anreize zum Einsatz von CO₂-effizientem und R-Beton

Wie die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, existieren Maßnahmen und Produkte, um die Umweltwirkung von Transportbeton zu verringern. Deswegen werden im Folgenden Anreizsysteme zum Einsatz von CO₂-effizientem und R-Beton diskutiert.

9.4.1. Gebäudezertifizierung z.B. durch die DGNB

Das Gebäudezertifizierungssystem der DGNB beruht auf einem ganzheitlichen Nachhaltigkeitsansatz. Es berücksichtigt ökologische, ökonomische, soziokulturelle und funktionale Qualitäten, wobei auch die Prozess-, Standort- und technische Qualität betrachtet werden. Abhängig vom Erfüllungsgrad verschiedener Kriterien aus diesen Bereichen kann ein Neubau ein DGNB Zertifikat in Bronze, Silber, Gold oder Platin erhalten. (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen - DGNB e.V., 2024).

Beim DonauTower wird eine DGNB Gold Zertifizierung angestrebt (DonauTower, 2023).

Im DGNB-System können Punkte für den Einsatz von R-Beton vergeben werden, der durch das zusätzliche R-Modul des CSC zertifiziert ist. Dieser kann im Kriterium „Verantwortungsbewusste Ressourcengewinnung“ in die Qualitätsstufe 2.2 eingeordnet und als zertifizierter Sekundärrohstoff anerkannt werden. (Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2022b).

Das Kriterium ENV1.3 „Verantwortungsbewusste Ressourcengewinnung“ hat für den Neubau eines Bürogebäudes, wie den DonauTower, einen Anteil von 2,1 Prozent an der Gesamtbewertung (DGNB GmbH, 2023). Nimmt man an, dass zertifizierter R-Beton verwendet wird, und die maximal mögliche Punktzahl erreicht, so hat R-Beton einen Anteil von **maximal einem Prozent** der Gesamtbewertung.

CO₂-effizienter Beton kann im Kriterium ENV1.1 berücksichtigt werden. Das Kriterium hat beim Neubau eines Bürogebäudes einen Anteil von 10,4 Prozent an der Gesamtbewertung. Im Indikator 2.5.1 „CO₂-reduzierte Herstellungsphase“ wird das fossile GWP der Module A1 bis A3 des Bauwerks betrachtet. (DGNB GmbH, 2023). Hier hat der Einsatz von CO₂-effizientem Beton, insbesondere bei vollständiger Erstellung des Tragwerks in Stahlbetonbauweise, den größten Einfluss. Nimmt man an, dass die maximale Punktzahl in 2.5 erreicht wird, kann der CO₂-effiziente Beton einen Anteil von **maximal 1,6 Prozent** an der Gesamtbewertung ausmachen.

In Indikator 1.1.2 „Optimierung in der Planung“ kann der „Einsatz von CO₂-reduzierten Materialarten / Werkstoffen“ (DGNB GmbH, 2023) als eine von drei Varianten evaluiert werden, um Punkte zu erhalten. Indirekt können Punkte in den Indikatoren 2.5 und 3 gesammelt werden, weil der CO₂-effiziente Beton die Ökobilanz des Gebäudes positiv beeinflusst (siehe Kapitel 9.3). (vgl. DGNB GmbH, 2023).

Die Verbesserung der Punktzahl bei der Gebäudezertifizierung der DGNB durch den Einsatz von CO₂-effizientem Beton ist im Vergleich zur tatsächlichen Reduktion des Treibhauspotentials gering. Auch der Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnung in Beton kann berücksichtigt werden, macht aber keinen entscheidenden Anteil der Gesamtbewertung aus. Die Gebäudezertifizierung durch das DGNB-System bietet deswegen nur einen schwachen Anreiz zum Einsatz von ökologisch-nachhaltigem Beton.

9.4.2. Grenzwerte für THG-Emissionen des Tragwerks

Wie in Kapitel 5.4.2 beschrieben ist die CO₂-Bepreisung in Bezug auf Transportbeton aktuell ohne Lenkungswirkung. Die Gebäudezertifizierung durch die DGNB bietet, wie zuvor dargestellt, einen schwachen Anreiz zum Einsatz optimierter Betonsorten.

Gemäß Glock et al. können THG-Grenzwerte für Bauwerke oder Bauteile als Anreiz dienen, um die THG-Emissionen im Betonbau zu verringern (2023). Der Entwurf der DAfStb-Richtlinie zu treibhausgasreduzierten Tragwerken (siehe Kapitel 3.2.3) beinhaltet zulässige THG-Emissionen für Tragwerke und Tragwerksteile. Anhand der Ergebnisse des Variantenvergleichs auf Tragwerksebene (siehe Kapitel 6.2) wird die Eignung als Anreizsystem zum Einsatz von CO₂-effizientem Beton diskutiert.

Der ausschließliche Einsatz von verfügbarem CO₂-effizientem Beton beim DonauTowers bietet auf Tragwerksebene THG-Einsparpotentiale bis zu 32 Prozent (siehe Abbildung 33). Damit kann die Treibhausgasminderungsklasse TM₂₀₂₈ erreicht werden, was eine Verbesserung um zwei Klassen gegenüber der Referenzvariante 4 bedeutet (siehe Abbildung 23).

Die folgende Abbildung 34 ordnet die in Kapitel 4 betrachteten Tragwerke in die Treibhausgas-Minderungsklassen ein.

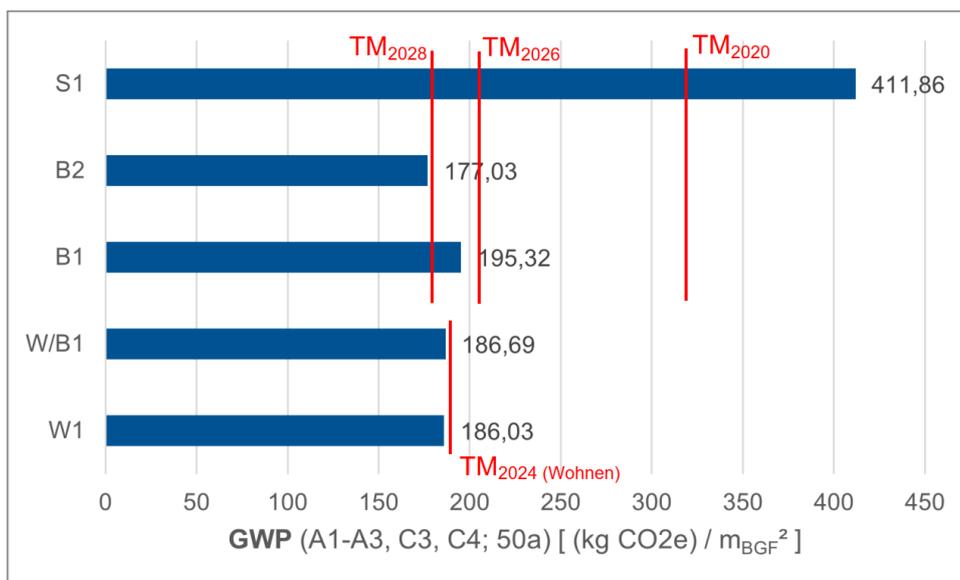


Abbildung 34 GWP der Tragwerke verschiedener Hochbauprojekte, Abbildung 12 ergänzt durch THG-Minderungsklassen für Wohn- bzw. Nichtwohngebäude nach (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb), 2023)

Um den Einfluss des vollständigen Einsatzes von verfügbarem CO₂-effizientem Beton auf das Erreichen höherer THG-Minderungsklassen einschätzen zu können, werden die THG-Einsparpotentiale aus Kapitel 6.2.1 (siehe auch Abbildung 33) verwendet.

Tabelle 34 Kombination der Ergebnisse aus Kapitel 4 und 6.2 und Einordnung in die THG-Minderungsklassen nach (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb), 2023)

Projekt	Abbildung 34	Beton teilweise CO ₂ -effizient *	Beton vollständig CO ₂ -effizient **
S1	keine	keine	TM ₂₀₂₀
B2	TM ₂₀₂₈	TM ₂₀₃₀	TM ₂₀₃₂
W/B1	TM ₂₀₂₄	TM ₂₀₂₆	TM ₂₀₂₈
W1	TM ₂₀₂₄	TM ₂₀₂₆	TM ₂₀₂₈

*THG-Einsparpotential Variante 2 in Bezug auf 4; ** THG-Einsparpotential Variante 9 in Bezug auf 4

Gemäß Tabelle 34 reicht der Einsatz von verfügbarem CO₂-effizientem Beton kurzfristig aus, um die Grenzwerte einzuhalten. Der teilweise Einsatz ermöglicht es, die zulässigen THG-Emissionen für zwei weitere Jahre einzuhalten. Wird ausschließlich CO₂-effizienter Beton eingebaut, sind es vier Jahre. Deswegen sind die Grenzwerte für das Tragwerk ein geeignetes Anreizsystem zur Nutzung von Beton, der hinsichtlich der THG-Emissionen in der Herstellung optimiert wurde.

Um die Anforderungen über das Jahr 2028 bzw. 2032 hinaus zu erfüllen, sind weitere Maßnahmen nötig. Dazu gehört eine größere Reduktion der THG-Emissionen von Beton, die bereits technologisch und normativ möglich ist (siehe Kapitel 3.3). Derartige Beton ist in Bayern nicht standardmäßig verfügbar, aber viele Transportbetonhersteller bieten projektspezifisch Optimierungen an (siehe Kapitel 5.2). Dadurch unterstützt die Richtlinie auch die weitere Optimierung von Produkten und dient als Anreiz diese zu verwenden.

Die Reduktion des Treibhauspotentials eines Tragwerks ausschließlich durch den Einsatz von CO₂-effizienten Betonsorten – wie in dieser Arbeit behandelt – ist begrenzt. Die Kombination der Maßnahmen in Kapitel 3.3 mit Tragwerksoptimierungen, beispielweise zur Verringerung des Materialeinsatzes, und dem Einsatz von THG-

emissionsärmerem Betonstahl ermöglicht eine weitere Reduktion des GWP eines Stahlbetontragwerks.

Im Entwurf der DAfStb-Richtlinie zu THG-reduzierten Tragwerken werden die zulässigen Emissionen ab 2040 linear nach dem Klimaschutzgesetz abgemindert. Zur Umsetzung des Reduktionspfads sind zusätzliche Maßnahmen wie CCS / CCU (vgl. Kapitel 3.3.2) notwendig. (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb), 2023).

Die Grenzwerte für Tragwerke aus Stahlbeton sind ein gutes Anreizsystem zum Einsatz von CO₂-effizientem Beton und für weitere Maßnahmen zur THG-Emissionsreduktion, zum Beispiel im Einflussbereich der Tragwerksplanung.

10. Fazit und Ausblick

CO₂-effiziente und R-Betone sind in Bayern von über 40 Transportbetonherstellern aus mehr als 160 Werken erhältlich. Die Treibhausgas- bzw. Ressourceneinsparpotentiale der verfügbaren Produkte variieren nicht nur zwischen den Unternehmen, sondern auch zwischen einzelnen Standorten desselben Herstellers. Insgesamt steigt die Verfügbarkeit von R-Beton. Diese schwankt aufgrund der Abhängigkeit davon, ob regional rezyklierte Gesteinskörnung in ausreichender Menge und Qualität vorhanden ist. Der Vergleich der Ergebnisse der Online-Recherche und der Umfrage zeigt, dass auf Anfrage mehr ökologisch-nachhaltige Betonsorten erhältlich sind, als aus den öffentlichen Preislisten hervorgeht. Die standardmäßig verfügbaren Produkte weisen zwar relevante THG-Einsparpotentiale (meist CO₂-Klasse Level 1 oder Level 2) bzw. Ressourceneinsparpotentiale (meist 20 bis 35 Vol.-% der gesamten Gesteinskörnung) auf, technologisch und normativ ist jedoch eine weitere Reduktion möglich. Im Fall von R-Beton werden durch die Begrenzung des Anteils der rezyklierten Gesteinskörnung negative Wechselwirkungen mit dem Treibhauspotential vermieden. Der Einsatz von R-Beton ist im Sinne der Nachhaltigkeit, wenn kurze Transportdistanzen zwischen dem Abbruch, der Aufbereitung und dem Einsatzort liegen. Insbesondere im Fall von CO₂-effizientem Beton sollten die Betonzusammensetzungen projektspezifisch optimiert werden. Das bieten die meisten Transportbetonhersteller an.

Die THG-Reduktion wird meistens durch den Einsatz von Hochofenzementen erreicht. Aufpreise für die Zementänderung zu CEM III/A liegen aktuell zwischen 3 und 9,5 Euro je Kubikmeter Transportbeton. Die Nettopreise anderer CO₂-effizienter oder R-Betone liegen derzeit 2 bis 20 Prozent über denen für äquivalenten Standardbeton desselben Herstellers. Es ist damit zu rechnen, dass die Preise für Beton mit Hochofenzement steigen werden. Grund dafür ist die Dekarbonisierung der Industrien, aus denen die Klinkerersatzstoffe Flugasche und Hüttensand stammen. Diese Sekundärmaterialien werden in deutlich geringeren Mengen anfallen. Folglich werden sich die Marktanteile verschiedener Zementarten verschieben. Die Verfügbarkeit von Zementen mit Kalkstein als Klinkerersatzstoff, z.B. CEM II/C-M und CEM VI, wird zunehmen. Alternative Bindemittel sind ebenfalls in Entwicklung.

Aufgrund der veränderlichen Verfügbarkeit von Ausgangsstoffen und Preise für CO₂-effizienten und R-Beton wird empfohlen die aktuelle, regionale Verfügbarkeit immer

projektspezifisch abzufragen. Der im Rahmen der Masterarbeit erstellte und optimierte Fragebogen und die Nutzung der Einkaufsplattform der STRABAG SE sind dafür gut geeignet. Außerdem sollten Bauausführende schon bei der Angebotsanfrage die Distanzen vom Werk zur Baustelle und im Fall von R-Beton zwischen Abbruch und Aufbereitung einholen.

Der Einsatzbereich und zulässige Anteil rezyklierter Gesteinskörnung von R-Beton wird nach der DAfStb-Richtlinie und DIN 1045-2:2023-08 abhängig von den Umgebungsbedingungen begrenzt. Deswegen ist das Einsparpotential auf Tragwerksebene niedriger als auf Produktebene. Zum Beispiel wäre im Tragwerk des DonauTowers der Ersatz von bis zu 20 Volumen-Prozent der gesamten Gesteinskörnung durch Sekundärmaterial möglich. Grundsätzlich sind CO₂-effiziente Betone für die Anwendung in den Expositionsklassen des üblichen Hochbaus geeignet. In diesem Bereich werden ca. zwei Drittel des Ortbetons in Deutschland verbaut. Der Einsatz von CO₂-effizientem Beton wird vor allem durch seine Auswirkungen auf den Bauablauf und die Bauzeit begrenzt. Den größten Einfluss haben ein verlängertes Prüfalter und die langsame Festigkeitsentwicklung. Daraus können längere Ausschal- und Rüstfristen sowie Nachbehandlungsdauern resultieren. Die geringe Hydratationswärme ist beim Einsatz in schlanken Bauteilen bei kalten Temperaturen besonders ungünstig. Bei R-Beton ist eine intensivere Nachbehandlung notwendig und die Frischbetoneigenschaften sind weniger robust als bei konventionellem Transportbeton. Diese Auswirkungen auf Bauablauf und -zeit verursachen - im Vergleich zu den Mehrkosten für den Beton selbst - einen größeren Teil der Mehrkosten des Einsatzes von ökologisch-nachhaltigem Beton. Diese sind stark abhängig von den gewählten Betonzusammensetzungen und häufig fehlt Baustellenerfahrung in deren Einsatz. Um Bauzeitverlängerungen und Mehrkosten entgegenzuwirken, muss der Bauablauf gemeinsam mit der Betonrezeptur optimiert werden. Insbesondere die Festigkeitsentwicklung und Nachbehandlungsdauern sind möglichst frühzeitig in der Takt- und Terminplanung zu berücksichtigen. Die Durchführung von Reifegradprüfungen an den Betonbauteilen kann Ausschalfristen, Ausrüstfristen und Nachbehandlungsdauern verkürzen. Beim DonauTower wurde bei kalten Temperaturen oder in schlanken Bauteilen kein CO₂-effizienter Beton verbaut. Dadurch wurden viele negativen Auswirkungen auf Bauablauf, -zeit und -kosten vermieden. Aufgrund der teilweisen Verwendung von herkömmlichem Transportbeton im Tragwerk des Beispielprojekts ist das Treibhausgas-Einsparpotential auch hier niedriger als auf Produktebene. Beim ausschließlichen Einsatz von CO₂-effizientem Beton kann eine Reduktion des Treibhauspotentials des Tragwerks um ca. ein Drittel

gegenüber der für Deutschland üblichen Situation erreicht werden. Auch wenn der Baustellentransport (Modul A4) in der THG-Bilanz berücksichtigt wird, lohnt es sich hinsichtlich der THG-Emissionen meist einen CO₂-effizienten Beton aus einem weiter entfernten Werk einem konventionellen Transportbeton vorzuziehen. Grund dafür ist die Begrenzung der Transportdistanz durch die Erhärtung des Betons. Überträgt man das THG-Einsparpotential auf das gesamte Gebäude inklusive seiner Nutzung, bleibt eine Verbesserung um neun Prozent. Auch das Treibhauspotential der Variante, in der teilweise konventioneller Beton genutzt wird, ist auf Gebäudeebene um fünf Prozent gegenüber der typischen Situation für Deutschland reduziert. Das zeigt, dass der Einsatz der verfügbaren CO₂-effizienten Betone THG-Einsparpotentiale in einer relevanten Größenordnung bietet. Die Treibhausgas-Minderungsklassen und zugehörigen Grenzwerte des Entwurfs der DAfStb-Richtlinie „Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton“ dienen als Anreizsystem zur THG-Emissionsreduktion. Durch die Verwendung von in Bayern verfügbaren CO₂-effizienten Betone können die Reduktionsziele kurzfristig erreicht werden. Die technologische und normative Situation ermöglicht weitere Optimierungen. Diese sind notwendig, um die Emissionsminderungsziele langfristig zu erreichen. Dabei darf die Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen als einer der größten Vorteile des Baustoffs nicht gefährdet werden. Auch mögliche Wechselwirkungen zwischen Ressourcenschonung und THG-Emissionsreduktion sind zu berücksichtigen. Die baupraktische Anwendbarkeit muss gewährleistet werden. Die regionale Verfügbarkeit von Ausgangsstoffen, insbesondere rezyklierter Gesteinskörnung und Klinkerersatzstoffen, schränkt die Optimierungsmöglichkeiten ein. Die Leistungsfähigkeit von Beton wird diverser, weshalb mehr an die Anforderungen des jeweiligen Bauteils angepassten Sorten verwendet werden müssen.

In dieser Arbeit wurde nur der Einsatz von ökologisch-nachhaltigem Beton betrachtet. Zur Ressourcenschonung und THG-Reduktion im Betonbau ist diese mit weiteren Maßnahmen zu kombinieren. Dazu gehören Tragwerksoptimierungen hinsichtlich des Materialeinsatzes, der Einsatz THG-emissionsärmeren Betonstahls und die CO₂-Abscheidung, -nutzung oder -speicherung bei der Zementherstellung. Die Forschung an hinsichtlich der Umweltwirkung optimierten Betonzusammensetzungen, z.B. mit CEM II/C-M, CEM VI oder rezyklierter Gesteinskörnung, sollte systematisch auf Baustellenbedingungen ausgeweitet werden. Erfahrungswerte für die Auswirkungen auf den Bauablauf, die Bauzeit und die Baukosten sind notwendig, um diese frühzeitig in der Arbeitsvorbereitung berücksichtigen und minimieren zu können.

Literaturverzeichnis

- BBSR. (2017). *Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)*.
- Bechmann, R., & Weidner, S. (2023). Graue Emissionen im Bauwesen - Bestandsaufnahme und Optimierungsstrategien. In *DBV-Heft 50: Nachhaltiges Bauen mit Beton - Band 1: Graue Emissionen und Lösungsansätze zum Klimaschutz* (S. 11-25). Berlin.
- Berger Beton SE. (2023a). *Preisliste 2023 - Gültig ab 1. Januar 2023 - Werk 1-12, 35,55*. Abgerufen am 21. November 2023 von <https://bergerholding.eu/de/deutschland/sparten/berger-beton/preislisten>
- Biscopio, M., Bosold, D., & Brunner, M. (November 2021). Zement-Merkblatt Betontechnik B 30 - Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung - R-Beton. (InformationsZentrum Beton GmbH, Hrsg.)
- BRE Global. (2022). *GreenBookLive*. Abgerufen am 2. Januar 2024 von <https://www.greenbooklive.com/search/advancedsearch.jsp>
- Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI). (Januar 2019). Leitfaden Nachhaltiges Bauen - Zukunftsfähiges Planen, Bauen und Betreiben von Gebäuden. (3).
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. (25. Juni 2021). *ÖKOBAUDAT - Informationsportal Nachhaltiges Bauen*. Abgerufen am 16. November 2023 von ÖKOBAUDAT gemäß EN 15804+A1: https://www.oekobaudat.de/no_cache/datenbank/suche/daten/db2.html#bereich2
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. (15. Juni 2023). *ÖKOBAUDAT - Informationsportal Nachhaltiges Bauen*. (S. u. Deutsche Bundesministerium für Wohnen, Herausgeber) Von ÖKOBAUDAT gemäß EN 15804+A2: https://www.oekobaudat.de/no_cache/datenbank/suche/daten/db1.html#bereich1 abgerufen
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. (kein Datum). *Startseite*. Abgerufen am 21. November 2023 von ÖKOBAUDAT: Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen
- Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. (8. Dezember 2021). *Concrete Sustainability Council - Hintergrundbericht CO2-Modul*. Abgerufen am 25. Oktober 2023 von www.csc-zertifizierung.de
- Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. (10. Januar 2022a). *Concrete Sustainability Council - Technisches Handbuch - CO2-Modul*. Abgerufen am 12. Juni 2023 von www.csc-zertifizierung.de
- Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. (24. Oktober 2022b). *Concrete Sustainability Council - Einführung in das CSC-Zertifizierungssystem*. Abgerufen am 21. September 2023 von CSC-Zertifizierung: <https://www.csc-zertifizierung.de/downloads/>
- CEMEX Deutschland AG. (2022). *Preisliste - Gebiet München - gültig ab 1. Januar 2023*. Abgerufen am 10. August 2023 von <https://www.cemex.de/downloadcenter>
- CEMEX Innovation Holding Ltd. (2021). *Weniger CO2- mehr CEMEX für Projekte mit Zukunft*. Abgerufen am 10. August 2023 von <https://www.cemex.de/produkte/beton/vertua>

- Concrete Sustainability Council. (22. März 2023). *CSC Musterausschreibung (Deutschland)*. Von <https://www.csc-zertifizierung.de/downloads/> abgerufen
- CSC. (24. November 2023). *CSC Toolbox*. Von Zertifikate: <https://toolbox.csc.eco/certifiedProjects> abgerufen
- Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen - DGNB e.V. (17. Januar 2024). *Über das DGNB System*. Von DGNB: <https://www.dgnb.de/de/zertifizierung/das-wichtigste-zur-dgnb-zertifizierung/ueber-das-dgnb-system> abgerufen
- Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb). (29. Oktober 2021). *Nachhaltig bauen mit Beton - Planungshilfe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb)*. (DAfStb, Hrsg.) Von DAfStb: https://dafstb.de/application/nachhaltigkeit/2021-10-29_DAfStb-Planungshilfe_Nachhaltig_Bauen_mit_Beton_final.pdf abgerufen
- Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. (2019). *1. Berichtigung zur DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb). (2010). *DAfStb-Richtlinie - Massive Bauteile aus Beton*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb). (2023). *DAfStb-Richtlinie - Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton - Entwurf August 2023*. (DAfStb, Hrsg.) Berlin.
- Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. (2013). *DBV-Merkblatt "Betonschalungen und Ausschalfristen"*. Berlin: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V.
- Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. (2019). *DBV-Merkblatt "Nachbehandlung von Beton"*. Berlin: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V.
- Deutsches Institut für Normung, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton . (2010). *DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DGNB GmbH. (1. Juli 2023). *DGNB System - Kriterienkatalog Gebäude Neubau - Version 2023 - 2.Auflage*. Von DGNB: <https://www.dgnb.de/de/zertifizierung/das-wichtigste-zur-dgnb-zertifizierung/nutzungsprofile> abgerufen
- DGNB GmbH. (kein Datum). *DGNB Navigator - Produktdatenbank*. Abgerufen am 3. Januar 2024 von <https://www.dgnb-navigator.de/produktdatenbank>
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. . (2021). *DIN EN 197-5 - Zement - Teil 5: Portlandkompositzement CEM II/C-M und Kompositzement CEM VI; Deutsche Fassung EN 197-5:2021*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2011). *DIN EN 13670 - Ausführung von Tragwerken aus Beton; Deutsche Fassung EN 13670:2009*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2018). *Entwurf DIN EN 197-1 - Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement; Deutsche und Englische Fassung prEN 197-1:2018*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2021a). *DIN EN 206 - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013+A2:2021*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2023). *DIN 1045-2 - Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2023a). *DIN 1045-3 - Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 3: Bauausführung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Doka GmbH. (2023). *Concremote - Doka*. Abgerufen am 14. Dezember 2023 von <https://www.doka.com/de/system-groups/doka-system-components/concremote-hardware/concremote>
- DonauTower. (2023). Abgerufen am 19. Dezember 2023 von <https://www.donautower.de/>
- EPD International AB. (kein Datum). *EPD - The international EPD system - EPD Library*. Abgerufen am 3. Januar 2024 von <https://www.environdec.com/library>
- Fingerloos, F., & Schachinger, I. (2022). Beton: Verlängerung des Nachweisalters. In *DBV-Heft 50: Nachhaltiges Bauen mit Beton - Band 2: Quick Wins für den Klimaschutz* (S. 17-20).
- Ganser Beton GmbH & Co. KG. (2023). *Beton-Preisliste 2023 - gültig ab 01. Januar 2023*. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.ganser-baustoffe.de/>
- Glock, C., Dernbach, A., Heckmann, M., Hondl, T., Kaufmann, F., & Schellen, M. (2023). Treibhausgas- und ressourcenreduzierter (Beton-)Bau - Herausforderungen, Lösungsansätze, Anreizsysteme. In *DBV-Heft 50: Nachhaltiges Bauen mit Beton - Band 1: Graue Emissionen und Lösungsansätze zum Klimaschutz* (S. 26-66). Berlin.
- Glonntaler Transportbeton GmbH & Co. Prod. KG. (2021). *Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung - R-Beton*. Abgerufen am 22. August 2023 von <https://www.glonntaler.de/recycling-beton/>
- Hans Humpenöder GmbH. (2023). *Transportbeton Preisliste Stand 01.01.2023*. Abgerufen am 15. August 2023 von <https://www.humpenoeder.de/transportbeton/>
- Hans Steidele GmbH. (kein Datum). *Transportbeton Sand, Kies, Splitt - Preisliste 2023*. Abgerufen am 11. August 2023 von <https://www.steidelegmbh.de/produkte/beton/beton-mit-kurzen-ausschaffristen-1>
- Heidelberger Beton GmbH. (d). EcoCrete - Mehr Zukunft mit weniger CO₂. [ecocrete.de](https://www.ecocrete.de). Abgerufen am 8. August 2023 von <https://www.heidelbergmaterials.de/de/beton-und-fliessestrich/produkte/nachhaltiger-beton-ecocrete>
- InformationsZentrum Beton GmbH. (20. Oktober 2023). *UMWELT-PRODUKTDEKLARATION nach ISO 14025 und EN 15804+A2 - Beton der Druckfestigkeitsklasse C30/37* InformationsZentrum Beton GmbH. (Institut Bauen und Umwelt e.V., Hrsg.) Abgerufen am 11. November 2023 von www.ibu-epd.com
- InformationsZentrum Beton GmbH. (kein Datum). *Beton - Umweltproduktdeklarationen (EPD)*. Abgerufen am 12. Dezember 2023 von <https://www.beton.org/betonbau/planungshilfen/umweltproduktdeklarationen/>
- ITB Isar Transportbeton GmbH. (2023). *Produkt- und Preisinformation*. Abgerufen am 12. August 2023 von <https://www.isar-transportbeton.de/#kontakt>
- Kiltz, D., & Fingerloos, F. (2022). Betonstahl: Entwurfsgrundsatz EGS-c als Standard für Risskonzepte. In *DBV-Heft 50: Nachhaltiges Bauen mit Beton - Band 2: Quick Wins für den Klimaschutz* (S. 27-34).
- Kiltz, D., & Meyer, L. (2022). Beton: Auswirkungen klinkereffizienter Zemente auf die Bauausführung. In *DBV-Heft 50: Nachhaltiges Bauen mit Beton - Band 2: Quick Wins für den Klimaschutz* (S. 11-16).
- Kiltz, D., & Voland, K. (2022). R-Beton: Hinweise für die Bauausführung. *DBV Rundschreiben, 272, 7-9*.

- Märker Gruppe. (b). *Preisliste Transportbeton Stand 1.1.2023 Region Süd*. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.maerker-gruppe.net/produkte/transportbeton/standorte-preislisten.html>
- Märker Gruppe. (kein Datum). *Preisliste Transportbeton Stand 1.1.2023 Region Mitte - Thannhausen*. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.maerker-gruppe.net/produkte/transportbeton/standorte-preislisten.html>
- Müller, C. (2023). Dekarbonisierung von Zement und Beton. In *DBV-Heft 50: Nachhaltiges Bauen mit Beton - Band 1: Graue Emissionen und Lösungsansätze zum Klimaschutz* (S. 67-89). Berlin.
- PS-Beton Piederstorfer Solnhofer Transportbeton GmbH & Co. KG. (2023). *Preisliste und Lieferprogramm 2023*. Abgerufen am 25. August 2023 von <https://www.ps-beton.de/downloads>
- Rennig Beton. (2023). *Preisliste 2023 gültig ab 01.04.2023*. Abgerufen am 5. September 2023 von <https://www.rennig-beton.de/transportbeton>
- Schwabach, E., & Filusch, S. (2022). Beton: zonierte Bauweise bei massigen Bauteilen. In *DBV-Heft 50: Nachhaltiges Bauen mit Beton - Band 2: Quick Wins für den Klimaschutz*.
- SCHWENK Beton Alb-Donau GmbH & Co. KG. (kein Datum). *Preisliste 2023 SCHWENK Beton Alb-Donau Gültig ab 01. Januar 2023*. Abgerufen am 11. August 2023 von <https://www.schwenk.de/betongesellschaft/schwenk-beton-alb-donau-gmbh-co-kg/>
- SCHWENK Beton Südbayern GmbH. (kein Datum). *Preisliste 2023 SCHWENK Beton Südbayern Gültig ab 01.01.2023*. Abgerufen am 11. August 2023 von <https://www.schwenk.de/betongesellschaft/schwenk-beton-suedbayern-gmbh/>
- SCHWENK Beton Vogtland GmbH & Co. KG. (kein Datum). *Preisliste 2023 SCHWENK Beton Vogtland Gültig ab 1. Januar 2023*. Abgerufen am 11. August 2023 von <https://www.schwenk.de/betongesellschaft/schwenk-beton-vogtland-gmbh-co-kg/>
- Sehring Beton GmbH & Co. KG. (2022). *Umweltproduktdeklaration gemäß ISO 14025 und EN 15804+A2 - Betonsorte 16345450*. (K.-E. Experts, Hrsg.) Abgerufen am Januar. 2 2024 von <https://www.kiwa.com/491d89/globalassets/germany/veroeffentlichte-epds/2022/10-1222/epd-sehring-250-de.pdf>
- Statista GmbH. (2. Januar 2024). *CO2-Emissionsrechte in der EU - Preisentwicklung*. Abgerufen am 18. Januar 2024 von Statista: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1304069/umfrage/preisentwicklung-von-co2-emissionsrechten-in-eu/>
- STRABAG SE. (2023a). *Geschäftsbericht 2022*. STRABAG SE.
- STRABAG SE. (2023b). *Home*. Abgerufen am 12. Juni 2023 von STRABAG WORK ON PROGRESS: <https://work-on-progress.strabag.com/>
- STRABAG SE. (2023c). *Recycling-Beton*. Abgerufen am 14. Juni 2023 von STRABAG WORK ON PROGRESS: <https://work-on-progress.strabag.com/de/material-kreislaufwirtschaft/recycling-beton#articleCarousel>
- STRABAG SE. (17. Juni 2023d). *Nachhaltigkeitsstrategie*. Von STRABAG WORK ON PROGRESS: <https://work-on-progress.strabag.com/de/strategie-2030/nachhaltigkeitsstrategie> abgerufen
- Transportbeton Glöckle. (2023). *Beton- und Pumpenpreisliste - gültig ab 01.04.2023*. Abgerufen am 10. August 2023 von <https://www.tb-gloeckle.de/r-beton.html>
- Transportbeton Roth GmbH & Co. KG. (kein Datum). *Transportbeton Preisliste Stand 01.01.2023*. Abgerufen am 25. August 2023 von <https://www.trg-betonwerk.de/#leistungen>

- Umweltbundesamt. (10. Februar 2020). Dekarbonisierung der Zementindustrie. (Umweltbundesamt, Hrsg.) Abgerufen am 22. August 2023 von https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/dokumente/factsheet_zementindustrie.pdf
- Urban, S., & Lindorf, A. (2022). Beton und Spannstahl: Deckensysteme mit Spannbetonhohlplatten. In *DBV-Heft 50: Nachhaltiges Bauen mit Beton - Band 2: Quick Wins für den Klimaschutz* (S. 51-61).
- Urban, S., Schade, T., & Kiltz, D. (September 2023). Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung: Kann R-Beton auch Klimaschutz? (DBV, Hrsg.) *DBV Rundschreiben*, 277, 13-17.
- Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ). (kein Datum). *Forschungs- und Kompetenzzentrum für Zement, Beton und Umweltschutz*. Abgerufen am 23. Januar 2024 von VDZ: <https://www.vdz-online.de/>
- Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2023). *Zementindustrie im Überblick 2023/2024*. Berlin. Abgerufen am 04. Dezember 2023 von https://www.vdz-online.de/wissensportal?tx_vdzknowledgebase_pi1%5Bcontroller%5D=Article&tx_vdzknowledgebase_pi1%5Bfilter%5D%5BcategoryArea%5D%5Bid%5D=3&tx_vdzknowledgebase_pi1%5Bfilter%5D%5BcategorySubject%5D%5Bid%5D=12&cHash=9e34144ec84d5d3fd74e69b4a4ea8
- Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Juli 2023a). *Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2022*. (VDZ, Hrsg.) Düsseldorf. Abgerufen am 04. Dezember 2023 von vdz Publikationen: https://www.vdz-online.de/wissensportal?tx_vdzknowledgebase_pi1%5Bcontroller%5D=Article&tx_vdzknowledgebase_pi1%5Bfilter%5D%5BcategoryArea%5D%5Bid%5D=3&tx_vdzknowledgebase_pi1%5Bfilter%5D%5BcategorySubject%5D%5Bid%5D=12&cHash=9e34144ec84d5d3fd74e69b4a4ea8
- Wilke, S. (8. Oktober 2023). *Gesellschaftliche Kosten von Umweltbelastungen*. Abgerufen am 15. Januar 2024 von Umweltbundesamt: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/gesellschaftliche-kosten-von-umweltbelastungen#gesamtwirtschaftliche-bedeutung-der-umweltkosten>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Überschrift des ersten Abschnitts, Anhang 2.1	23
Abbildung 2 Überschrift des zweiten Abschnitts, Anhang 2.1	24
Abbildung 3 Überschrift des dritten Abschnitts, Anhang 2.1	24
Abbildung 4 Überschrift des vierten Abschnitts, Anhang 2.1	25
Abbildung 5 Überschrift des letzten Abschnitts, Anhang 2.1	25
Abbildung 6 Anteile der Ausgangsstoffe am GWP der Betonproduktion und an der Masse eines für Deutschland typischen C30/37, erstellt nach (InformationsZentrum Beton GmbH, 2023).....	34
Abbildung 7 Karbonatisierung von Beton erstellt nach DIN EN 16757:2017-10; Bild 9 aus: (Bechmann & Weidner, 2023).....	37
Abbildung 8 CSC-Branchenreferenzwerte und Orientierungswerte für THG- Emissionen bei der Betonherstellung, erstellt nach: (Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2022a, S. 14; Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), 2021).....	42
Abbildung 9 Überblick über die normative Situation; erstellt nach: (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2021a; Biscopig, Bosold, & Brunner, 2021), ergänzt	45
Abbildung 10 Treibhauspotentiale der Produktion verschiedener Zementarten, erstellt nach: OBD 2023-I (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023).....	49
Abbildung 11 Anteile der Baustoffe am GWP des Rohbaus (A1-A3, C3, C4).....	56
Abbildung 12 Treibhauspotentiale je Brutto-Grundfläche	57
Abbildung 13 Überschrift des ersten Abschnitts, Anhang 2.1	61
Abbildung 14 GWP der Standardbetonsorten der Hersteller B bis G, Anhang 3.1.....	61
Abbildung 15 Überschrift des zweiten Abschnitts, Anhang 2.)	62
Abbildung 16 Einordnung der THG-Einsparpotentiale in Bezug auf Branchenreferenz- und Durchschnittswerte; Abbildung 8, ergänzt	72
Abbildung 17 Überschrift des dritten Abschnitts, Anhang 2.1	72
Abbildung 18 Überschrift des vierten Abschnitts, Anhang 2.1	77
Abbildung 19 Beispiele für CO ₂ -Zuschläge, Ausschnitte aus den Preislisten: oben (ITB Isar Transportbeton GmbH, 2023), Mitte (Märker Gruppe, b), unten (CEMEX Deutschland AG, 2022).....	85
Abbildung 20 DonauTower, (DonauTower, 2023)	89
Abbildung 21 Vergleich des Treibhauspotentials des Betons der Varianten 1 bis 4, 7, 9.....	94
Abbildung 22 Treibhauspotential des Tragwerks der Varianten 1 bis 4, 7, 9 nach Baustoff.....	94
Abbildung 23 GWP der Tragwerksvarianten je m ² BGF und Treibhausgasminderungsklassen, unter Verwendung von (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb), 2023).....	95

Abbildung 24 Vergleich des Treibhauspotentials des Betons der Varianten 1,4, 5, 8 und 10	98
Abbildung 25: Ausschnitt aus dem Leistungsverzeichnis des DonauTowers; Anhang 4.5, Ed. Züblin AG	101
Abbildung 26 Beispiel: Position im Leistungsverzeichnis für CO2-effizienten Beton, auf Grundlage von Anhang 4.5.....	102
Abbildung 27 Betonsorten für Wände, Brüstungen, Aufkantungen über GOK aus der Abrufliste des DonauTowers, Ausschnitt aus Abrufliste der Ed. Züblin AG	103
Abbildung 28 Anhaltswerte für Ausschalfristen, Tab. 3 aus: (Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V., 2013, S. 17), Markierung hinzugefügt.....	109
Abbildung 29 Mindestdauer der Nachbehandlung von Beton; Tabelle 7 aus (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2023a), Markierung hinzugefügt.....	111
Abbildung 30 Skizze der Takteinteilung eines Turmgeschosses des DonauTowers, Ausschnitt aus dem Taktplan der Ed. Züblin AG.....	113
Abbildung 31 Wandfläche im EG des DonauTowers aus CO2-effizientem Beton, Eigenes Foto	116
Abbildung 32 Ursachen möglicher Mehrkosten durch den Einsatz von CO2-effizienten Beton mit langsamer Festigkeitsentwicklung	118
Abbildung 33 Treibhauspotential der Varianten des Tragwerks in Bezug auf Variante 4, Anhang 4.2.....	123
Abbildung 34 GWP der Tragwerke verschiedener Hochbauprojekte, Abbildung 12 ergänzt durch THG-Minderungsklassen für Wohn- bzw. Nichtwohngebäude nach (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb), 2023)	131

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Betonmengen und Datentypen der verglichenen Varianten 1 bis 10	28
Tabelle 2 Orientierungswerte für Treibhausgasemissionen von Beton, Ausschnitt der Tabelle E5 aus (Breitenbücher, 2021)	33
Tabelle 3 Kategorien und zugehörige Kriterien des CSC-Zertifizierungssystems, (Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2022b, S. 12, 26).....	40
Tabelle 4 Ergänzende Module und zugehörige Kriterien des CSC-Zertifizierungssystems, (Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2022b, S. 8; Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2022a, S. 1)	41
Tabelle 5 Zulässige Emissionen des Tragwerks nach Treibhausgas-Minderungsklasse, Tabelle A.1 aus (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb), 2023)	44
Tabelle 6 Zusammensetzung der Normalzemente CEM V und CEM VI, Teil der Tabelle 1 der E DIN 197-1:2018-11 (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2018).....	48
Tabelle 7 Anwendungsbereiche für CEM-II-M-Zemente mit drei Hauptbestandteilen, Ausschnitt aus Tabelle F.4 der DIN 1045-2:2023-08 (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2023).....	49
Tabelle 8 Zulässige Anteile rezyklierter Gesteinskörnungen > 2mm, bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung (Vol.-%); Tabelle 5 aus (Deutsches Institut für Normung, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton , 2010).....	52
Tabelle 9 Zulässige Anteile grober rezyklierter Gesteinskörnungen in Bezug auf die gesamte Gesteinskörnung [Vol.-%], Tabelle E.5 aus DIN 1045-2:2023-08 (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2023).....	53
Tabelle 10 Beschreibung und Kennzahlen der betrachteten Projekte der Ed. Züblin AG	55
Tabelle 11 Beton- und Holzvolumen je BRI.....	56
Tabelle 12 Rücklauf des Fragebogens bis einschließlich 22. Dezember 2023	60
Tabelle 13 GWP der Standardbetonsorten der Hersteller B bis G und Bezug auf die CSC-Branchenreferenzwerte, Anhang 3.1 und (Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2022a).....	62
Tabelle 14 THG-Einsparpotentiale der Betonherstellung gemäß Hersteller; Anhang 1.1, Quellen: Anhang 1.3	71
Tabelle 15 GWP der CO2-effizienten Sorten der Hersteller E bis G und Bezug auf die CSC-Branchenreferenzwerte, Anhang 3.1 und (Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2022a).....	73
Tabelle 16 GWP der R-Betonsorten der Hersteller E bis G und Bezug auf die CSC-Branchenreferenzwerte, Anhang 3.1 und (Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2022a)	78

Tabelle 17 GWP und Anteil rezyklierter Gesteinskörnung der R-Betonsorten der Hersteller E bis G und Bezug auf die CSC-Branchenreferenzwerte, Anhang 3.1 und (Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2022a).....	79
Tabelle 18 Transportdistanz der Gesteinskörnung zum Betonwerk, Antworten auf den Fragebogen	79
Tabelle 19 Anteile rezyklierter Gesteinskörnung in Transportbetonen verschiedener Hersteller, vgl. Anhang 1.1	80
Tabelle 20 Vergleich der Nettopreise von Standard- und CO2-effizientem Beton für die Anforderungen C30/37, XC4 XF1 XA1, 16mm, F3; unter Verwendung von (Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2022a)	83
Tabelle 21 Vergleich der Nettopreise von Standard- und R-Beton für die Anforderungen C30/37, XC4 XF1 XA1, 16mm, F3	84
Tabelle 22 CO2-Zuschläge aus Preislisten verschiedener Hersteller von Transportbeton	85
Tabelle 23 CO2-Zuschläge und Aufpreise für CO2-effizienten Beton im Vergleich zu Klimakosten gem. UBA und Kosten für CO2-Zertifikate des EU-ETS	86
Tabelle 24 GWP der der projektspezifischen Betonsorten in Bezug auf die CSC-Branchenreferenzwerte – 1. Variante, unter Verwendung von (Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2022a)	90
Tabelle 25 GWP der der projektspezifischen Betonsorten in Bezug auf die CSC-Branchenreferenzwerte – 2. Variante, unter Verwendung von (Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2022a)	91
Tabelle 26 Verbaute Mengen bis einschließlich 13.12.23 und Eigenschaften der CO2-effizienten Sorten, auf Grundlage von Dokumenten der Ed. Züblin AG	92
Tabelle 27 Zulässige Anteile rezyklierter GK an der gesamten GK in Bezug auf die Anforderungen des DonauTowers, Anhang 4.1 und (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb), 2010)	96
Tabelle 28 Eignung von R-Beton für die Betonmengen des Leistungsverzeichnis des DonauTowers ab C30/37	97
Tabelle 29 Gegenüberstellung der Ressourceneinsparpotentiale und des GWP des Betons des DonauTowers, Anhang 4.2.....	99
Tabelle 30 Treibhauspotential (A4) je Kubikmeter und für das gesamte Betonvolumen des Variantenvergleichs, auf Grundlage von: (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023)	100
Tabelle 31 Tabellarische Ausschreibung von CO2-effizientem Beton gem. CSC: Beispiel einer Betonsorte des DonauTowers; (Concrete Sustainability Council, 2023), bearbeitet.....	102

Tabelle 32 GWP der Betonsorten der Hersteller E bis G, Anhang 3.1 und (Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., 2022a).....	122
Tabelle 33 Gegenüberstellung des THG-Einsparpotentials in Bezug auf Variante 4 auf Tragwerks- und Gebäudeebene, auf Grundlage von Anhang 4.2 und (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb), 2023)	129
Tabelle 34 Kombination der Ergebnisse aus Kapitel 4 und 6.2 und Einordnung in die THG-Minderungsklassen nach (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb), 2023)	132

Anhang

Anhang 1: Verfügbarkeit von CO₂-effizientem und R-Beton in Bayern gem. Preislisten, Produktverzeichnissen und Websites

Anhang 1.1: Übersicht: Alternative Betonsorten (PDF)

Die Übersichtstabelle ist aufgrund des großen Formats nur in der digitalen Version dieser Masterarbeit enthalten und umfasst vier Seiten.

Anhang 1.2: Quellenverzeichnis von Anhang 1.1

- Auerochs GmbH. (2023). *Preisliste Transportbeton 3/2023*. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.auerochs-gmbh.de/downloads.php>
- Bacher Beton Bau GmbH. (2023). *Preisliste Transportbeton Stand 01.01.2023*. Abgerufen am 12. August 2023 von <https://bacher-ingolstadt.de/unternehmen/#beton>
- BeHaGe Betonhandelsgesellschaft mbH & Co. KG. (kein Datum). *Preisliste 2023 gültig ab 1. Januar 2023 BeHaGe*. Abgerufen am 11. August 2023 von <https://www.schwenk.de/betongesellschaft/behage-betonhandelsgesellschaft-mbh-co-kg/>
- Berger Beton SE. (2023). *Preisliste 2023 - Gültig ab 1. Januar 2023 - Werk 40, 45, 52, 58*. Abgerufen am 1. August 2023 von <https://bergerholding.eu/de/deutschland/sparten/berger-beton/preislisten>
- Berger Beton SE. (2023a). *Preisliste 2023 - Gültig ab 1. Januar 2023 - Werk 1-12, 35, 55*. Abgerufen am 21. November 2023 von <https://bergerholding.eu/de/deutschland/sparten/berger-beton/preislisten>
- Berger Beton SE. (2023b). *Preisliste 2023 - Gültig ab 1. Januar 2023 - Werk 13, 14, 57, 81*. Abgerufen am 21. November 2023 von <https://bergerholding.eu/de/deutschland/sparten/berger-beton/preislisten>
- Berger Beton SE. (2023c). *Preisliste 2023 - Gültig ab 1. Januar 2023 - Werk 59, 65*. Abgerufen am 21. November 2023 von <https://bergerholding.eu/de/deutschland/sparten/berger-beton/preislisten>
- Berger Beton SE. (2023d). *Preisliste 2023 - Gültig ab 1. Januar 2023 - Werk 4, 15, 50*. Abgerufen am 21. November 2023 von <https://bergerholding.eu/de/deutschland/sparten/berger-beton/preislisten>
- BETONhotline Handels GmbH. (2023). *Produkt- und Preisinformationen - gültig ab 01.01.2023*. Abgerufen am 22. August 2023 von <https://www.betonhotline.de/beton/wohnungsbau>
- CEMEX Deutschland AG. (2022). *Preisliste - Gebiet München - gültig ab 1. Januar 2023*. Abgerufen am 10. August 2023 von <https://www.cemex.de/downloadcenter>
- CEMEX Deutschland AG. (2022a). *Preisliste - Gebiet Mittelfranken - gültig ab 1. Januar 2023*. Abgerufen am 10. August 2023 von <https://www.cemex.de/downloadcenter>
- CEMEX Deutschland AG. (2022b). *Preisliste - Gebiet Südostbayern, Werkgruppe Landshut, Regensburg und Oberpfalz - gültig ab 1. Januar 2023*. Abgerufen am 10. August 2023 von <https://www.cemex.de/downloadcenter>
- CEMEX Innovation Holding Ltd. (2021). *Weniger CO₂- mehr CEMEX für Projekte mit Zukunft*. Abgerufen am 10. August 2023 von <https://www.cemex.de/produkte/beton/vertua>
- CSC. (24. November 2023). *CSC Toolbox*. Von Zertifikate: <https://toolbox.csc.eco/certifiedProjects> abgerufen
- Fetzer GmbH & Co. KG Kies- und Betonwerke. (2023). *Eigenschaftsverzeichnis 23A - gültig ab 01. Januar 2023 gemäß EN 206-1 und DIN 1045-2*. Abgerufen am 25. August 2023 von <https://fetzerbeton.de/downloads/>
- Fetzer GmbH & Co. KG Kies- und Betonwerke. (2023a). *Eigenschaftsverzeichnis 23B - gültig ab 01. Januar 2023 gemäß EN 206-1 und DIN 1045-2*. Abgerufen am 25. August 2023 von <https://fetzerbeton.de/downloads/>
- Fetzer GmbH & Co. KG Kies- und Betonwerke. (2023b). *Eigenschaftsverzeichnis 23C - gültig ab 01. Januar 2023 Sondermischungen, ohne Normzuordnung*. Abgerufen am 25. August 2023 von <https://fetzerbeton.de/downloads/>

- Franz Zimmermann GmbH & Co. KG. (kein Datum). *Preisliste 2023 Gültig ab 01.01.2023*. Abgerufen am 15. August 2023 von <https://www.zimmermann-beton.de/download/>
- Ganser Beton. (2023). *Beton-Preisliste 2023 - gültig ab 01. Januar 2023*. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.ganser-baustoffe.de/>
- Gebr. Westenthanner GmbH. (11. November 2023). *Gebr. Westenthanner GmbH / Kies-Beton-Asphaltwerk*. Von <https://www.westenthanner-beton.de/index.php/leistungsspektrum/beton> abgerufen
- Geiger Baustoffe. (2023). *Preisblätter 2023 - Beton*. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.geigergruppe.com/de-de/leistungen/baustoffe/?showLayer=transportbeton>
- Glonntaler Transportbeton GmbH & Co. Prod. KG. (2021). *Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung - R-Beton*. Abgerufen am 22. August 2023 von <https://www.glonntaler.de/recycling-beton/>
- Glonntaler Transportbeton GmbH & Co. Prod. KG. (2023). *Preisliste 2023*. Abgerufen am 10. August 2023 von <https://www.glonntaler.de/service/>
- Glonntaler Transportbeton GmbH & Co. Prod. KG. (2023a). *Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung*. Abgerufen am August 2023 von <https://www.glonntaler.de/recycling-beton/>
- Guggenberger GmbH. (2023). *Preisliste - Beton - Kies - Splitt - gültig ab 01.01.2023*. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.guggenberger-bau.de/werke/#preislisten>
- Hans Humpenöder GmbH. (2023). *Transportbeton Preisliste Stand 01.01.2023*. Abgerufen am 15. August 2023 von <https://www.humpenoeder.de/transportbeton/>
- Hans Steidele GmbH. (kein Datum). *Transportbeton Sand, Kies, Splitt - Preisliste 2023*. Abgerufen am 11. August 2023 von <https://www.steidelegmbh.de/produkte/beton/beton-mit-kurzen-ausschalfri-1>
- Heidelberger Beton Donau-Iller GmbH & Co. KG. (kein Datum). *Preisliste 2023/1 Heidelberg Beton Donau-Iller GmbH & Co. KG*. Abgerufen am 10. August 2023 von <https://www.heidelbergmaterials.de/de/beton-und-fliessestrich/kontakt/heidelberg-beton-donau-iller>
- Heidelberger Beton Donau-Naab GmbH & Co. KG. (kein Datum). *Preisliste 2023/1 Heidelberg Beton Donau-Naab GmbH & Co. KG*. Abgerufen am 10. August 2023 von <https://www.heidelbergmaterials.de/de/beton-und-fliessestrich/kontakt/heidelberg-beton-donau-naab>
- Heidelberger Beton GmbH. (a). *Preisliste 2023/1 Heidelberg Beton GmbH Region Süd-West*. Abgerufen am 10. August 2023 von <https://www.heidelbergmaterials.de/de/beton-und-fliessestrich/kontakt/region-sued-west>
- Heidelberger Beton GmbH. (b). *Preisliste 2023/1 Heidelberg Beton GmbH Gebiet Franken*. Abgerufen am 10. August 2023 von <https://www.heidelbergmaterials.de/de/beton-und-fliessestrich/kontakt/gebiet-franken>
- Heidelberger Beton GmbH. (c). *Preisliste 2023/1 Heidelberg Beton GmbH Gebiet Niederbayern*. Abgerufen am 10. August 2023 von <https://www.heidelbergmaterials.de/de/beton-und-fliessestrich/kontakt/gebiet-niederbayern>
- Heidelberger Beton GmbH. (d). *EcoCrete - Mehr Zukunft mit weniger CO2*. [ecocrete.de](https://www.ecocrete.de). Abgerufen am 8. August 2023 von

<https://www.heidelbergmaterials.de/de/beton-und-fliessestrich/produkte/nachhaltiger-beton-ecocrete>
 Heidelberger Beton GmbH. (kein Datum). Preisliste 2023/1 Heidelberger Beton GmbH Gebiet München. Abgerufen am 10. August 2023 von <https://www.heidelbergmaterials.de/de/beton-und-fliessestrich/kontakt/gebiet-muenchen>

Heidelberger Beton Grenzland GmbH & Co. KG. (kein Datum). Preisliste 2023/1 Heidelberger Beton Grenzland GmbH & Co. KG. Abgerufen am 10. August 2023 von <https://www.heidelbergmaterials.de/de/beton-und-fliessestrich/kontakt/heidelberger-beton-grenzland>

Heidelberger Beton Inntal GmbH. (kein Datum). Preisliste 2023/1 Heidelberger Beton Inntal. Abgerufen am 10. August 2023 von <https://www.heidelbergmaterials.de/de/beton-und-fliessestrich/kontakt/heidelberger-beton-inntal>

Hochrein Beton GmbH. (2023). *Preisliste Transportbeton ab 15. März 2023*. Abgerufen am 10. September 2023 von <https://hochrein-beton.de/transportbeton/transportbeton>

Holcim (Deutschland) GmbH. (2021). *Holcim R-Pact I Ressourcenschonend und zertifiziert*. Abgerufen am 10. Oktober 2023 von <https://www.holcim.de/de/download>

Holcim (Deutschland) GmbH. (2021a). *Holcim ECOPact und ECOPact Zero I Klimafreundliche und klimaneutrale Betone*. Abgerufen am 10. Oktober 2023 von <https://www.holcim.de/de/download>

Holcim Beton und Betonwaren GmbH. (kein Datum). *Preisliste. Region Mitte I Beton und Betonförderung I Gültig ab 1. Januar 0223*. Abgerufen am 10. September 2023 von <https://www.holcim.de/de/download>

ITB Isar Transportbeton GmbH. (2023). *Produkt- und Preisinformation*. Abgerufen am 12. August 2023 von <https://www.isar-transportbeton.de/#kontakt>

J. Schmid GmbH. (25. August 2023). *J. Schmid - R-Beton*. Von <https://www.schmid-bauen.de/leistungen/lieferrn/transportbeton/r-beton/> abgerufen

Josef Meier GmbH & Co. KG. (kein Datum). *Preisliste 2023*. Abgerufen am 10. September 2023 von <https://www.meier-bau.com/werke/transportbetonwerk/>

Jura Beton GmbH & Co. KG. (a). *Preisliste Beton - gültig ab 01.01.2023 (1) I Amberg I Lauterhofen I Michelfeld I Eschenbach*. Abgerufen am 21. November 2023 von <https://jura-beton.de/produkte/preislisten/>

Jura Beton GmbH & Co. KG. (b). *Preisliste Beton - gültig ab 01.01.2023 (1) I Nürnberg I Markt Erlbach*. Abgerufen am 21. November 2023 von <https://jura-beton.de/produkte/preislisten/>

Jura Beton GmbH & Co. KG. (kein Datum). *Preisliste Beton - gültig ab 01.01.2023 (1) I Raum Regensburg*. Abgerufen am 21. November 2023 von <https://jura-beton.de/produkte/preislisten/>

KILIAN WILLIBALD GmbH. (kein Datum). *Preise Produktinformationen Baugewerbe und Baustoffe*. Abgerufen am 27. August 2023 von <https://www.kilian-willibald.de/downloads/>

Kinzigbeton GmbH & Co. KG. (kein Datum). *Preisliste 2023 Gültig ab 1. Januar 2023*. Abgerufen am 11. August 2023 von <https://www.schwenk.de/betongesellschaft/519/>

Kocher-Jagst Transportbeton GmbH & Co. KG; Beton Franken-Hohenlohe GmbH & Co. KG. (2023). *Preisliste PL2023-1*. Abgerufen am 26. August 2023 von <https://www.kocher-jagst-beton.de/preislisten>

- LTB Lindermayr Transportbeton GmbH & Co. KG. (kein Datum). *Preisliste Transportbeton - Stand 1.1.2023*. Abgerufen am 17. November 2023 von <https://www.lindermayr-bau.de/downloads/>
- Märker Gruppe. (a). *Preisliste Transportbeton Stand 1.1.2023 Region Nord*. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.maerker-gruppe.net/produkte/transportbeton/standorte-preislisten.html>
- Märker Gruppe. (b). *Preisliste Transportbeton Stand 1.1.2023 Region Süd*. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.maerker-gruppe.net/produkte/transportbeton/standorte-preislisten.html>
- Märker Gruppe. (c). *Preisliste Transportbeton Stand 1.1.2023 Region Mitte - Augsburg, Mühlfhausen*. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.maerker-gruppe.net/produkte/transportbeton/standorte-preislisten.html>
- Märker Gruppe. (d). *Preisliste Transportbeton Stand 1.1. 2023 Region Mitte - Asbach-Bäumenheim, Burgheim, Meitingen, Nördlingen, Wemding*. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.maerker-gruppe.net/produkte/transportbeton/standorte-preislisten.html>
- Märker Gruppe. (e). *Preisliste Transportbeton Stand 1.1.2023*. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.maerker-gruppe.net/produkte/transportbeton/standorte-preislisten.html>
- Märker Gruppe. (f). *Preisliste Transportbeton Stand 1.1.2023*. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.maerker-gruppe.net/produkte/transportbeton/standorte-preislisten.html>
- Märker Gruppe. (g). *Preisliste Transportbeton Stand 15.4.2023 Region Ost - Hof, Oelsnitz/Vogtland*. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.maerker-gruppe.net/produkte/transportbeton/standorte-preislisten.html>
- Märker Gruppe. (kein Datum). *Preisliste Transportbeton Stand 1.1.2023 Region Mitte - Thannhausen*. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.maerker-gruppe.net/produkte/transportbeton/standorte-preislisten.html>
- MOOSLEITNER GmbH. (kein Datum). *Beton nach EN 206-1 / DIN 1045-2*. Abgerufen am 12. August 2023 von <https://www.moosleitner.eu/kompetenzen/beton/>
- PS-Beton Piederstorfer Solnhofer Transportbeton GmbH & Co. KG. (2023). *Preisliste und Lieferprogramm 2023*. Abgerufen am 25. August 2023 von <https://www.ps-beton.de/downloads>
- Rennig Beton. (2023). *Preisliste 2023 gültig ab 01.04.2023*. Abgerufen am 5. September 2023 von <https://www.rennig-beton.de/transportbeton>
- Saale-Beton GmbH & Co. KG. (kein Datum). *Preisliste 2023 Saale-Beton Gültig ab 1. Januar 2023*. Abgerufen am 11. August 2023 von <https://www.schwenk.de/betongesellschaft/saale-beton-gmbh-co-kg/>
- S-Beton GmbH & Co. KG. (kein Datum). *Preisliste S-Beton GmbH & Co. KG*. Abgerufen am 12. August 2023 von <https://www.s-beton.de/>
- Schmid Kies- und Betonwerk GmbH. (2023). *Auszug aus unserer Preisliste - gültig ab 01. Juni 2023*. Abgerufen am 25. August 2023 von <https://www.schmid-bauen.de/leistungen/liefiern/transportbeton/downloads-transportbeton/>
- SCHWENK Beton Alb-Donau GmbH & Co. KG. (kein Datum). *Preisliste 2023 SCHWENK Beton Alb-Donau Gültig ab 01. Januar 2023*. Abgerufen am 11. August 2023 von <https://www.schwenk.de/betongesellschaft/schwenk-beton-alb-donau-gmbh-co-kg/>
- SCHWENK Beton Bamberg GmbH & Co. KG. (kein Datum). *Preisliste 2023 SCHWENK Beton Bamberg Gültig ab 1. Januar 2023*. Abgerufen am 11. August 2023 von <https://www.schwenk.de/betongesellschaft/schwenk-beton-bamberg-gmbh-co-kg/>

- SCHWENK Beton Gelnhausen GmbH. (kein Datum). *Preisliste 2023 SCHWENK Beton Gelnhausen Gültig ab 1. Januar 2023*. Abgerufen am 11. August 2023 von <https://www.schwenk.de/betongesellschaft/schwenk-beton-gelnhausen-gmbh/>
- SCHWENK Beton Mainfranken GmbH & Co. KG. (kein Datum). *Preisliste 2023 SCHWENK Beton Mainfranken Gültig ab 1. Januar 2023*. Abgerufen am 11. August 2023 von <https://www.schwenk.de/betongesellschaft/schwenk-beton-mainfranken-gmbh-co-kg/>
- SCHWENK Beton Schwaben GmbH & Co. KG, SCHWENK Beton Allgäu GmbH & Co. KG. (kein Datum). *Preisliste 2023 Schwaben / Allgäu Gültig ab 1. Januar 2023*. Abgerufen am 11. August 2023 von <https://www.schwenk.de/betongesellschaft/schwenk-beton-allgaeu-gmbh-co-kg/>
- SCHWENK Beton Südbayern GmbH. (kein Datum). *Preisliste 2023 SCHWENK Beton Südbayern Gültig ab 01.01.2023*. Abgerufen am 11. August 2023 von <https://www.schwenk.de/betongesellschaft/schwenk-beton-suedbayern-gmbh/>
- SCHWENK Beton Untermain GmbH & Co. KG. (kein Datum). *SCHWENK Beton Untermain Gültig ab 1. Januar 2023*. Abgerufen am 11. August 2023 von <https://www.schwenk.de/betongesellschaft/schwenk-beton-untermain-gmbh-co-kg/>
- SCHWENK Beton Vogtland GmbH & Co. KG. (kein Datum). *Preisliste 2023 SCHWENK Beton Vogtland Gültig ab 1. Januar 2023*. Abgerufen am 11. August 2023 von <https://www.schwenk.de/betongesellschaft/schwenk-beton-vogtland-gmbh-co-kg/>
- SCWENK Beton Heidenheim GmbH & Co. KG. (kein Datum). *Preisliste 2023 SCHWENK Beton Heidenheim Gültig ab 1. Januar 2023*. Abgerufen am 15. August 2023 von <https://www.schwenk.de/betongesellschaft/schwenk-beton-heidenheim-gmbh-co-kg/>
- TB Landsberg GmbH & Co. KG. (kein Datum). *Preisliste Transportbeton Stand 1.1.2023*. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.maerker-gruppe.net/produkte/transportbeton/standorte-preislisten.html>
- TB Transportbeton Glöckle GmbH & Co. KG. (2023). *Transportbeton Glöckle*. Abgerufen am 25. August 2023 von R-Beton: <https://www.tb-gloeckle.de/r-beton.html>
- TBE Transportbeton Eichstätt GmbH & Co. KG. (kein Datum). *Preisliste Transportbeton*. Abgerufen am 10. August 2023 von <https://www.maerker-gruppe.net/produkte/transportbeton/standorte-preislisten.html>
- TBE Transportbeton Eichstätt GmbH & Co. KG. (kein Datum). *Preisliste Transportbeton Stand 1.1. 2023*. Abgerufen am 8. September 2023 von <http://www.tb-eichstaett.de/>
- TBG Bayerwald Transportbeton GmbH. (kein Datum). *Preisliste 2023/1 TBG Bayerwald Transportbeton GmbH*. Abgerufen am 10. August 2023 von <https://www.heidelbergmaterials.de/de/beton-und-fliessestrich/kontakt/tbg-bayerwald>
- TBG Deggendorfer Transportbeton GmbH. (kein Datum). *Preisliste 2023/1 TBG Deggendorfer Transportbeton GmbH*. Abgerufen am 10. August 2023 von <https://www.heidelbergmaterials.de/de/beton-und-fliessestrich/kontakt/tbg-deggendorf>
- TBG Rott Kies u. Transportbeton GmbH. (a). *Klimafreundlich Bauen und mit Recyclingbeton KfW-Förderung sichern*. Abgerufen am 12. August 2023 von <https://www.tbrott.de/#Nachhaltigkeit>

- TBG Rott Kies u. Transportbeton GmbH. (b). *Die grüne Bodenplatte*. Abgerufen am 12. August 2023 von <https://www.tbgrott.de/#Nachhaltigkeit>
- TBG Rott Kies u. Transportbeton GmbH. (kein Datum). *Preisliste Gültig ab 1. Januar 2023*. Abgerufen am 22. August 2023 von <https://www.tbgrott.de/#Preise>
- TBG Transportbeton GmbH & Co. KG Naabbeton. (kein Datum). *Preisliste 2023/1*. Abgerufen am 10. August 2023 von <https://www.heidelbergmaterials.de/de/beton-und-fliessestrich/kontakt/tbg-naabbeton>
- TBG Transportbeton Haidenaab GmbH & Co. KG. (kein Datum). *Preisliste Beton - Gültig ab 01.01.2023 (1) | Erbdorf | Weiden*. Abgerufen am 12. August 2023 von <https://tbg-haidenaab.de/produkte/preislisten/>
- TBG Transportbeton Haidenaab GmbH & Co. KG. (kein Datum). *Preisliste Beton gültig ab. 01.01.2023 (1) Erbdorf Weiden*. Abgerufen am 12. September 2023 von <https://tbg-haidenaab.de/produkte/preislisten/>
- TBG Transportbeton Werner GmbH & Co. KG. (kein Datum). *Preisliste 2023/1 TBG Transportbeton Werner GmbH & Co. KG*. Abgerufen am 11. November 2023 von <https://www.heidelbergmaterials.de/de/beton-und-fliessestrich/kontakt/tbg-werner>
- th-beton GmbH & Co. KG. (b). *Preisliste 01/2022 Allgemeine Geschäftsbedingungen th-beton GmbH & Co. KG - Werk Amerang*. Abgerufen am 11. August 2023 von <https://www.thomas-gruppe.de/downloads/>
- th-beton GmbH & Co. KG. (kein Datum). *Preisliste 01/2023 Allgemeine Geschäftsbedingungen th-beton GmbH & Co. KG - Werk Hohenkammer*. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.thomas-gruppe.de/beton/>
- Transportbeton Beuschlein GmbH & Co. KG. (2023). *Preisliste 2023*. Abgerufen am 22. August 2023 von <https://www.schwenk.de/betongesellschaft/transportbeton-beuschlein-gmbh-co-kg/>
- Transportbeton Beuschlein GmbH & Co. KG. (kein Datum). *Preisliste 2023 Transportbeton Beuschlein Gültig ab 1. Januar 2023*. Abgerufen am 11. August 2023 von <https://www.schwenk.de/betongesellschaft/transportbeton-beuschlein-gmbh-co-kg/>
- Transportbeton Glöckle. (2023). *Beton- und Pumpenpreisliste - gültig ab 01.04.2023*. Abgerufen am 10. August 2023 von <https://www.tb-gloeckle.de/r-beton.html>
- Transport-Beton Ingolstadt GmbH & Co. KG. (kein Datum). *Preisliste 2023 Lieferprogramm gültig ab 1. Januar 2023*. Abgerufen am 12. August 2023 von <https://www.transportbeton-ingolstadt.de/preislisten-agb/>
- Transportbeton Roth GmbH & Co. KG. (kein Datum). *Transportbeton Preisliste Stand 01.01.2023*. Abgerufen am 25. August 2023 von <https://www.trg-betonwerk.de/#leistungen>
- XAVER SCHMID GmbH & Co. Bauunternehmen KG. (2023). *Preisliste 2023 gültig ab 1. März 2023*. Abgerufen am 17. August 2023 von <https://www.xaverschmid.de/downloads.html>

Anhang 2: Fragebogen zu Transportbeton in Bayern– umweltrelevante Daten und alternative Sorten

Anhang 2.1: Druckansicht des Fragebogens aus der Einkaufsplattform SPS

[1] Umweltwirkung

[1.1] THG-Emissionen von Standard-Produktsorten

Bitte laden Sie die angefügte Excel-Datei herunter und füllen sie aus. Die Anleitung im Reiter "THG-Emissionen Beton" hilft Ihnen dabei. Bitte laden Sie die ausgefüllte Datei anschließend hier als Antwort hoch.

 CO2-Fragebogen_Beton_ExcelTool_Standardsorten.xlsx

Antwort

[1.2] Wie wurden die Werte ermittelt?

Bitte laden Sie entsprechende Nachweise (EPD, etc.) hoch, falls die Berechnung nicht mit dem Formular der STRABAG durchgeführt wurde.

Antwort

- verifizierte Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804 bzw. ISO 21930
- Berechnung nach ISO 14025 und EN 15804 bzw. ISO 21930
- Eigene Berechnung (Anhang aus Formular STRABAG)

Angehängte Datei

[1.3] Auf welche Angaben beziehen sich die Werte?

Antwort

- Hauptwerk (bitte Adresse angeben)
- Standort (bitte Adresse angeben)
- Branchenverband (bitte Namen angeben)
- Mittelwert über alle Werke
- Sonstige (bitte beschreiben)

Kommentar

[1.4] Sind die Ausgangsstoffe einer bestimmten Betonsorte und deren Herkunft an allen Standorten identisch?

Antwort

[2] Ökologisch-nachhaltige Alternativen in der Produktgruppe Beton

[3.0] Bieten Sie CO2-reduzierte Produkte in der Produktgruppe Beton an?

Antwort

- Ja
 Nein

[4.0] Bieten Sie Recycling-Produkte in der Produktgruppe Beton an?

Antwort

- Ja
 Nein

[2.1] Bieten Sie sonstige ökologisch-nachhaltigen Alternativen in der Produktgruppe Beton an?

Antwort

- Klimaneutrale Produkte
 Sonstige
 Keine

Kommentar

[2.2] Welche ökologisch-nachhaltige Entwicklung in der Produktgruppe Beton fördern Sie in Ihrem Unternehmen?

Antwort

- CO2-reduzierte Produkte
 Klimaneutrale Produkte
 Recycling-Produkte
 Sonstige
 Keine

Kommentar

[2.3] Welche Maßnahmen zur Reduzierung der THG-Emissionen für die Produktgruppe Beton werden umgesetzt?

Antwort

- Kompensation durch Zertifikate
- CO₂-Abscheidung und -Speicherung
- Steigerung der Energieeffizienz
- Einsatz von Recycling-Material
- Alternative Energieträger
- Einsatz neuer Technologien
- Sonstige
- Keine

Kommentar

[2.4] Wie hoch ist der aktuelle Aufpreis [Euro / m³] für eine Zementänderung z.B. CEM III ?

Antwort

[3] CO₂-reduzierter Beton

THG-Emissionen

[3.1] THG-Emissionen von CO₂-reduzierten Sorten

Bitte laden Sie die angefügte Excel-Datei herunter und füllen sie aus. Die Anleitung im Reiter "THG-Emissionen Beton" hilft Ihnen dabei. Bitte laden Sie die ausgefüllte Datei anschließend hier als Antwort hoch.

 CO2-Fragebogen_Beton_ExcelTool_CO2redSorten.xlsx

Antwort

Kommentar

[3.2] Wie wurden die Werte ermittelt?

Bitte laden Sie entsprechende Nachweise (EPD, etc.) hoch, falls die Berechnung nicht mit dem Formular der STRABAG durchgeführt wurde.

Antwort

- verifizierte Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804 bzw. ISO 21930
- Berechnung nach ISO 14025 und EN 15804 bzw. ISO 21930
- Eigene Berechnung (Anhang aus Formular STRABAG)

Angehängte Datei

[3.3] Auf welche Angaben beziehen sich die Werte?

Antwort

- Hauptwerk (bitte Adresse angeben)
- Standort (bitte Adresse angeben)
- Branchenverband (bitte Namen angeben)
- Mittelwert über alle Werke
- Sonstige (bitte beschreiben)

Kommentar

Produkteigenschaften, Verfügbarkeit

[3.4] Gibt es Besonderheiten bezüglich der Ausschallfrist der CO2-reduzierten Produkte im Vergleich zu Ihren Standard-Produkten zu beachten?

Antwort

[3.5] Gibt es Besonderheiten bezüglich der Verarbeitbarkeit der CO2-reduzierten Produkte im Vergleich zu Ihren Standard-Produkten zu beachten?

Antwort

[3.6] Tabelle zu Produkteigenschaften, Verfügbarkeit und Aufpreis

Bitte laden Sie die angefügte EXCEL-Datei herunter und füllen die Tabelle im Reiter "Allgemein" aus. Falls die Verfügbarkeit, Aufpreise etc. zwischen Ihren Werken variieren, geben Sie diese jeweils in einer Zeile an. Andernfalls reicht ein einmaliges Ausfüllen der Tabelle je Produkt. Bitte beachten Sie auch den Reiter "Je Sorte", falls CO2-reduzierte Sorten in Ihrer Preisliste oder Ihrem Produktverzeichnis zu finden sind.

 Fragebogen_Eigenschaften_CO2redBeton.xlsx

Antwort

[3.7] Wie viel Vorlauf zur Lieferung CO2-reduzierter Produkte sollte eingeplant werden?

Antwort

[3.8] Unterliegen die Preise für CO2-reduzierte Produkte starken Schwankungen? Falls ja, wodurch werden diese bedingt?

Antwort

[4] R-Beton

THG-Emissionen

[4.1] THG-Emissionen von R-Betonsorten

Bitte laden Sie die angefügte Excel-Datei herunter und füllen sie aus. Die Anleitung im Reiter "THG-Emissionen Beton" hilft Ihnen dabei. Bitte laden Sie die ausgefüllte Datei anschließend hier als Antwort hoch.

 CO2-Fragebogen_Beton_ExcelTool_RSorten.xlsx

Antwort

[4.2] Wie wurden die Werte ermittelt?

Bitte laden Sie entsprechende Nachweise (EPD, etc.) hoch, falls die Berechnung nicht mit dem Formular der STRABAG durchgeführt wurde.

Antwort

- verifizierte Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804 bzw. ISO 21930
- Berechnung nach ISO 14025 und EN 15804 bzw. ISO 21930
- Eigene Berechnung (Anhang aus Formular STRABAG)

Angehängte Datei

[4.3] Auf welche Angaben beziehen sich die Werte?

Antwort

- Hauptwerk (bitte Adresse angeben)
- Standort (bitte Adresse angeben)
- Branchenverband (bitte Namen angeben)
- Mittelwert über alle Werke
- Sonstige (bitte beschreiben)

Kommentar

Produkteigenschaften, Verfügbarkeit

[4.4] Gibt es Besonderheiten bezüglich der Verarbeitbarkeit von R-Betone im Vergleich zu Ihren Standard-Produkten zu beachten?

Antwort

[4.5] Gibt es Besonderheiten bezüglich der Ausschallfrist der R-Betone im Vergleich zu Ihren Standard-Produkten zu beachten?

Antwort

[4.6] Tabelle zu Produkteigenschaften, Verfügbarkeit und Aufpreis

Bitte laden Sie die angefügte EXCEL-Datei herunter und füllen die Tabelle im Reiter "Allgemein" aus. Falls die Verfügbarkeit, Aufpreise etc. zwischen Ihren Werken variieren, geben Sie diese jeweils in einer Zeile an. Andernfalls reicht ein einmaliges Ausfüllen der Tabelle je Produkt. Bitte beachten Sie auch den Reiter "Je Sorte", falls R-Betone in Ihrer Preisliste oder Ihrem Produktverzeichnis zu finden sind.

 Fragebogen_Eigenschaften_RBeton.xlsx

Antwort

[4.7] Wie viel Vorlauf zur Lieferung von R-Beton sollte eingeplant werden?

Antwort

[4.8] Woher beziehen Sie rezyklierte Gesteinskörnung?

Antwort

[4.9] Unterliegen die Preise für R-Betone starken Schwankungen? Falls ja, wodurch werden diese bedingt?

Antwort

[5] CSC-Zertifizierung

[5.1] Falls eines oder mehrere Ihrer Werke durch das CSC zertifiziert wurden, laden Sie bitte hier entsprechende Nachweise hoch.

Antwort

Anhang 2.2: EXCEL-Tool zur Berechnung der THG-Emissionen von drei Standardsorten; Tool der STRABAG SE, bearbeitet

Reiter 1: „THG-Emissionen Beton“ - Übersicht

THG-Emissionen Beton

Wir möchten die THG-Emissionen der folgenden **Standard-Produktsorten** ermitteln.

Bitte geben Sie die Werte (Einheit CO₂-Äquivalente) Ihrer konventionellen Produktsorten an (d.h. keine CO₂-reduzierten oder andere alternative Varianten). Für den Fall, dass Ihnen keine THG-Werte vorliegen, stellen wir Ihnen unser Excel-Tool zur Verfügung.

Anleitung Excel-Tool:

- 1) Bitte tragen Sie die Informationen im Reiter "Berechnung" ein, um eine manuelle Berechnung durchzuführen.
- 2) Laden Sie anschließend dieses ausgefüllte Dokument in Frage 1.1 im Abschnitt "Umweltwirkung" hoch.
- 3) Ggf. laden Sie weitere Nachweise zur Berechnungsgrundlage in Frage 1.2 im Abschnitt "Umweltwirkung" hoch.

Ergebnis der berechneten CO₂-Emissionen für Phase A1-A3:

	A1 Rohstoff-gewinnung	A2 Transport der Rohstoffe	A3 Produktion	A1-A3 Gesamt	Einheit	Sortennummer (alternativ: Produktname)
C25/30, Expositions-klasse XC4 XF1 XA1, Größtkorn 16mm, Konsistenzklasse F3	0,000	0,000	0,000	0,000	kg CO ₂ e / m ³	bitte ergänzen
C30/37, Expositions-klasse XC4 XF1 XA1, Größtkorn 16mm, Konsistenzklasse F3	0,000	0,000	0,000	0,000	kg CO ₂ e / m ³	bitte ergänzen
C35/45, Expositions-klasse XC4 XF2+XF3 XA2 XD2, Größtkorn 16mm, Konsistenzklasse F3	0,000	0,000	0,000	0,000	kg CO ₂ e / m ³	bitte ergänzen

Reiter 2: „Berechnung“ - Eingabemaske

C25/30, Expositionsklasse XC4 XF1 XA1, Größtkorn 16mm, Konsistenzklasse F3										
Produktion der Materialien										
	Zement	Gesteinskörnung grob	Gesteinskörnung fein	Füller	Gesteinskörnung recyclet	Zusatzstoffe	Einheit			
A1	Bezeichnung/Hersteller									
	THG-Emissionen pro prod. Tonne Material						kg CO ₂ e / t			
	Menge zur Produktion von 1 m ³ Beton						kg/m ³			
Gesamt-THG-Emissionen aus der Produktion der Materialien										
0,000										
Transport der Materialien										
durchschnittlicher Transportweg bis Betonwerk										
A2	Zement	Gesteinskörnung grob	Gesteinskörnung fein	Füller	Gesteinskörnung recyclet	Zusatzstoffe	Einheit			
	LKW						km			
	Bahn						km			
	Binnenschiff						km			
	Gesamt-THG-Emissionen aus dem Transport der Materialien							kg CO ₂ e / m ³	0,000	
Produktion Beton										
A3	Energieverbrauch pro prod. m ³ Beton	Strom	Ökostrom	Erdgas	Diesel	Heizöl leicht	Heizöl schwer	Braunkohlestaub (BKS)		
	Einheit	KWh/m ³	KWh/m ³	KWh/m ³	l/m ³	l/m ³	l/m ³	kg/lm ³		
	Gesamt-THG-Emissionen aus der Betonproduktion									
0,000										
A1-A3		TOTAL THG-EMISSIONEN						0,000	kg CO ₂ e / m ³	

Für die Sorten C30/37, Expositionsklasse XC4 XF1 XA1, Größtkorn 16mm, Konsistenzklasse F3 und C35/45, Expositionsklasse XC4 XF2+XF3 XA2 XD2, Größtkorn 16mm, Konsistenzklasse F3 sind die Eingabemasken analog.

Anhang 2.3: EXCEL-Tool zur Berechnung der THG-Emissionen von drei CO2-reduzierten Betonsorten; Tool der STRABAG SE, bearbeitet

Reiter 1: „THG-Emissionen Beton“ - Übersicht

THG-Emissionen Beton

Wir möchten die THG-Emissionen Ihrer CO2-reduzierten Produktsorten ermitteln.

Bitte geben Sie die Werte (Einheit CO2-Äquivalente) Ihrer CO2-reduzierten Varianten an. Für den Fall, dass Ihnen keine THG-Werte vorliegen, stellen wir Ihnen unser Excel-Tool zur Verfügung.

Anleitung Excel-Tool:

- 1) Bitte tragen Sie die Informationen im Reiter "Berechnung" ein, um eine manuelle Berechnung durchzuführen.
- 2) Laden Sie anschließend dieses ausgefüllte Dokument in Frage 3.1 im Abschnitt "CO2-reduzierter Beton - Umweltwirkung" hoch.
- 3) Ggf. laden Sie weitere Nachweise zur Berechnungsgrundlage in Frage 3.2 im Abschnitt "CO2-reduzierter Beton - Umweltwirkung" hoch.

Ergebnis der berechneten THG-Emissionen für Phase A1-A3:

	A1 Rohstoff-gewinnung	A2 Transport der Rohstoffe	A3 Produktion	A1-A3 Gesamt	Einheit	Sortennummer (alternativ: Produktname)
C25/30, Expositionsklasse XC4 XF1 XA1, Größtkorn 16mm, Konsistenzklasse F3	0,000	0,000	0,000	0,000	kg CO2e / m³	bitte ergänzen
C30/37, Expositionsklasse XC4 XF1 XA1, Größtkorn 16mm, Konsistenzklasse F3	0,000	0,000	0,000	0,000	kg CO2e / m³	bitte ergänzen
C35/45, Expositionsklasse XC4 XF2+XF3 XA2 XD2, Größtkorn 16mm, Konsistenzklasse F3	0,000	0,000	0,000	0,000	kg CO2e / m³	bitte ergänzen

Reiter 2 zur Berechnung entspricht Anhang 2.2

Anhang 2.4: EXCEL-Tool zur Berechnung der THG-Emissionen von drei R-Betonsorten; Tool der STRABAG SE, bearbeitet

Reiter 1: THG-Emissionen Beton

THG-Emissionen Beton

Wir möchten die THG-Emissionen Ihrer ressourcenschonenden Produktarten ermitteln.

Bitte geben Sie die Werte (Einheit CO₂-Äquivalente) Ihrer ressourcenschonenden Varianten an. Für den Fall, dass Ihnen keine THG-Werte vorliegen, stellen wir Ihnen unser Excel-Tool zur Verfügung.

Anleitung Excel-Tool:

- 1) Bitte tragen Sie die Informationen im Reiter "Berechnung" ein, um eine manuelle Berechnung durchzuführen.
- 2) Laden Sie anschließend dieses ausgefüllte Dokument in Frage 4.1 im Abschnitt "R-Beton - Umweltwirkung" hoch.
- 3) Ggf. laden Sie weitere Nachweise zur Berechnungsrundlage in Frage 4.2 im Abschnitt "R-Beton - Umweltwirkung" hoch.

Ergebnis der berechneten THG-Emissionen für Phase A1-A3:

	A1 Rohstoff-gewinnung	A2 Transport der Rohstoffe	A3 Produktion	A1-A3 Gesamt	Einheit	Sortennummer (alternativ: Produktname)
C25/30, Expositionsklasse XC4 XF1 XA1, Größtkorn 16mm, Konsistenzklasse F3	0,000	0,000	0,000	0,000	kg CO _{2e} / m ³	bitte ergänzen
C30/37, Expositionsklasse XC4 XF1 XA1, Größtkorn 16mm, Konsistenzklasse F3	0,000	0,000	0,000	0,000	kg CO _{2e} / m ³	bitte ergänzen
C35/45, Expositionsklasse XC4 XF2+XF3 XA2 XD2, Größtkorn 16mm, Konsistenzklasse F3	0,000	0,000	0,000	0,000	kg CO _{2e} / m ³	bitte ergänzen

Reiter 2 zur Berechnung entspricht Anhang 2.2

Anhang 2.5: Excel-Tabelle zu Eigenschaften von CO2-reduziertem Beton

Reiter „Allgemein“ – ähnlicher Aufbau wie Anhang 1.1

Reiter „Je Sorte“

			Bitte auswählen und vorhandene EPDs hochladen. Falls Emissionsfaktoren vorliegen, geben Sie diese bitte an.		
Sorte			Umweltwirkung		Preis
Sortennummer	Zementorte	Zusatzstoffe	EPD	Emissionsfaktor [kg CO2e / to]	Aktueller Netto-Aufpreis [Euro/m³]
			Bitte auswählen.		
			Bitte auswählen.		
			Bitte auswählen.		

Anhang 2.6: Excel-Tabelle zu Eigenschaften von R- Beton

Reiter „Allgemein“ – ähnlicher Aufbau wie Anhang 1.1

Reiter „Je Sorte“

						Bitte auswählen und vorhandene EPDs hochladen. Falls Emissionsfaktoren vorliegen, geben Sie diese bitte an.		
Sorte						Umweltwirkung		Preis
Sortennummer	Zementorte	Zusatzstoffe	Anteil rezyklierter Gesteinskörnung [%]	Typ der RC-Gesteinskörnung	durch rezyklierte GK ersetzte Korngruppe(n)	EPD	Emissionsfaktor [kg CO2e / to]	Aktueller Netto-Aufpreis [Euro/m³]
						Bitte auswählen.		
						Bitte auswählen.		
						Bitte auswählen.		

Anhang 2.7: Anschreiben an Transportbetonhersteller

Sehr geehrte Damen und Herren,

auf gewohntem Weg erhalten Sie heute eine andere Anfrage. Wir bitten Sie den Fragebogen mit Fokus auf Umweltdaten vollständig auszufüllen und die angefragten Dokumente hochzuladen, sofern sie Ihnen vorliegen. Im Folgenden zeigen wir die Relevanz und Vorteile Ihrer Mitarbeit und bedanken uns für Ihr Engagement.

Das Ziel der STRABAG SE ist klar formuliert: „Wir werden klimaneutral bis 2040“. Dabei stehen Dekarbonisierung und Kreislaufwirtschaft im Fokus. Die Teilziele reichen von einer klimaneutralen Verwaltung 2025 über Bauprojekte und Gebäudebetrieb bis hin zu klimaneutralen Baustoffen und Infrastruktur im Jahr 2040. Die STRABAG SE möchte mit ihrem aktiven Beitrag Verantwortung übernehmen und sich von anderen Bautechnologiekonzernen abheben.

Da Beton sowohl in großen Mengen verbaut wird als auch besonders ressourcen- und emissionsintensiv ist, ist die Reduktion der THG-Emissionen durch Beton ein wichtiger Schritt auf dem Weg zur Klimaneutralität der STRABAG SE. Auch der Einsatz von Sekundärbaustoffen ist Teil der Nachhaltigkeitsstrategie des Konzerns. Dabei ist R-Beton ein Schlüssel zum kreisgerechten Bauen und zur Ressourcenschonung.

Die STRABAG SE kann ihre Ziele nur gemeinsam mit Ihnen als Lieferant erreichen. Der verlinkte Informationsfilm erklärt Ihnen wie die STRABAG SE Lieferketten nachhaltig gestaltet.

Nachhaltige Lieferketten bei STRABAG: [Nachhaltige Lieferketten bei STRABAG: Unser Management- und Auditsystem - YouTube](#)

Wie Sie gesehen haben, gewinnen auch ökologische Kriterien an Relevanz in der Auftragsvergabe. Indem Sie die Fragebögen mit Fokus auf Umweltdaten und alternative Betonsorten ausfüllen, können Sie sich von Mitbewerbern abheben.

Zusätzlich wird Ihre Rückmeldung anonymisiert für die Masterarbeit „Reduktion des Treibhauspotentials und Ressourcenverbrauchs von Hochbauprojekten durch den Einsatz von CO₂-reduzierten und R-Betonen in Bayern – Verfügbarkeit, Einsparpoten-

tial, Auswirkungen auf Bauablauf und -kosten“ von Frau Hauschulz an der TU München in Kooperation mit der Ed. Züblin AG – Direktion München (Teil der STRABAG SE) verwendet. Ziel der Arbeit ist es die Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit von ressourcenschonendem und emissionsarmen Beton und die entsprechenden Einsparpotentiale im Vergleich zu konventionellem Beton darzustellen. Die Ergebnisse sollen den Einsatz von CO2-reduzierten und R-Betonen in zukünftigen Projekten fördern.

Bei Fragen erstellen Sie gerne eine Nachricht im SPS-Portal oder wenden sich direkt an:

Chiara Hauschulz

████████████████████

████████████████

Mehr Informationen finden Sie unter: [Startseite | STRABAG WORK ON PROGRESS](#)

Anhang 3: Rücklauf des Fragebogens

Anhang 3.1: Zusammenfassung der Antworten

[1] Umweltwirkung

[1.1] THG-Emissionen von Standard-Produktsorten

Bitte laden Sie die angefügte Excel-Datei herunter und füllen sie aus. Die Anleitung im Reiter "THG-Emissionen Beton" hilft Ihnen dabei. Bitte laden Sie die ausgefüllte Datei anschließend hier als Antwort hoch.

 CO2-Fragebogen_Beton_ExcelTool_Standardsorten.xlsx

Antwort

A: Leere Datei
B: vollständig ausgefüllt
C: Selbstdeklaration C25/30
D: vollständig ausgefüllt
E: vollständig ausgefüllt
F: vollständig ausgefüllt
G: vollständig ausgefüllt

[1.2] Wie wurden die Werte ermittelt?

Bitte laden Sie entsprechende Nachweise (EPD, etc.) hoch, falls die Berechnung nicht mit dem Formular der STRABAG durchgeführt wurde.

Antwort

- verifizierte Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804 bzw. ISO 21930
- Berechnung nach ISO 14025 und EN 15804 bzw. ISO 21930
- Eigene Berechnung (Anhang aus Formular STRABAG)

Angehängte Datei

C: kann im Auftragsfall für fast alle Produkte spezifische Selbstdeklarationen erstellen, wg. aktueller Anstrengungen zur CO2-Einsparung ändern sich die Berechnungsgrundlagen häufig (gem. Mail)

A: -
B: Formular STRABAG
C: Selbstdeklaration C25/30
D: Formular STRABAG
E: Selbstdeklarationen
F: nur Selbstdeklaration für C35/45
G: Formular STRABAG

[1.3] Auf welche Angaben beziehen sich die Werte?

Antwort

- Hauptwerk (bitte Adresse angeben)
- Standort (bitte Adresse angeben)
- Branchenverband (bitte Namen angeben)
- Mittelwert über alle Werke
- Sonstige (bitte beschreiben)

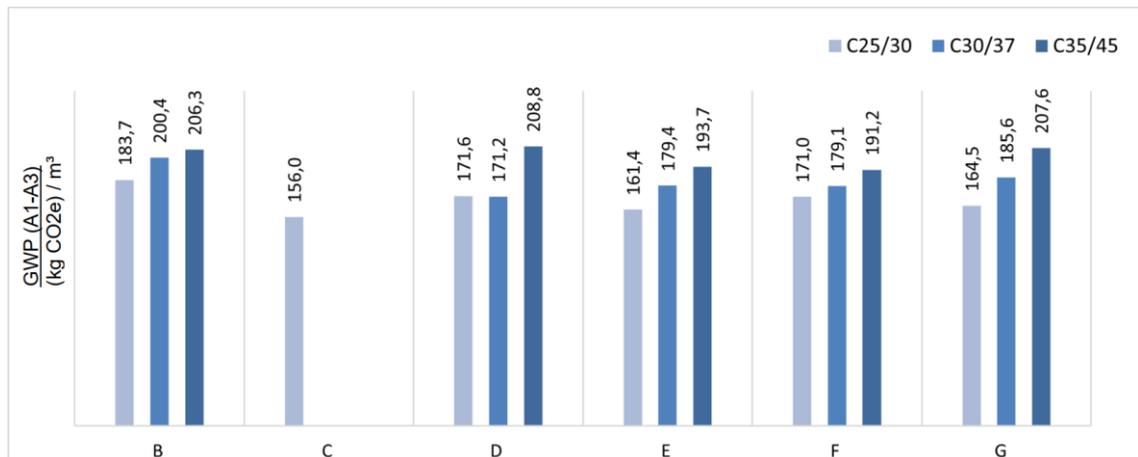
Kommentar

A: -
B: Mittelwert über alle Werke
C: Mittelwert über 3 Werke
D: 1 Standort
E: 1 Standort
F: Hauptwerk
G: Mittelwert über alle Werke

[1.4] Sind die Ausgangsstoffe einer bestimmten Betonsorte und deren Herkunft an allen Standorten identisch?

Antwort

- A: "Ja"
- B: "Ja"
- C: "nein, aber vergleichbar"
- D: "sind nicht identisch, da wir verschiedene Lieferanten haben zum Beispiel bei Gesteinskörnung"
- E: -
- F: Nein
- G: "nein"



[2] Ökologisch-nachhaltige Alternativen in der Produktgruppe Beton

[3.0] Bieten Sie CO2-reduzierte Produkte in der Produktgruppe Beton an?

Antwort

- Ja
- Nein

- A: Ja
- B: Ja
- C: Ja
- D: Nein
- E: Ja
- F: Ja
- G: Ja

[4.0] Bieten Sie Recycling-Produkte in der Produktgruppe Beton an?

Antwort

- Ja
 Nein

A: Ja
B: Nein
C: Ja
D: Ja
E: Ja
F: Ja
G: Ja

[2.1] Bieten Sie sonstige ökologisch-nachhaltigen Alternativen in der Produktgruppe Beton an?

Antwort

- klimaneutrale Produkte
 Sonstige
 Keine

Kommentar

A: Sonstige; "Auf Anfrage"
B: Keine
C: Sonstige; "derzeit in Entwicklung"
D: Keine
E: -
F: Keine
G: Keine

[2.2] Welche ökologisch-nachhaltige Entwicklung in der Produktgruppe Beton fördern Sie in Ihrem Unternehmen?

Antwort

- CO2-reduzierte Produkte
 klimaneutrale Produkte
 Recycling-Produkte
 Sonstige
 Keine

A: CO2-reduzierte
B: CO2-reduzierte
C: CO2-reduzierte, klimaneutrale, Recycling-Produkte, Sonstige
D: Recycling-Produkte
E: -
F: CO2-reduzierte, Recycling-Produkte
G: CO2-reduzierte, Recycling-Produkte

[2.3] Welche Maßnahmen zur Reduzierung der THG-Emissionen für die Produktgruppe Beton werden umgesetzt?

Antwort

- Kompensation durch Zertifikate
- CO2-Abscheidung und -Speicherung
- Steigerung der Energieeffizienz
- Einsatz von Recycling-Material
- Alternative Energieträger
- Einsatz neuer Technologien
- Sonstige
- Keine

Kommentar

A: Einsatz von Recycling-Material, Alternative Energieträger
B: Einsatz neuer Technologien
C: Steigerung der Energieeffizienz, Einsatz von Recycling-Material, Alternative Energieträger, Einsatz neuer Technologien, Sonstige"
D: Einsatz von Recyclingmaterial
E: -
F: Steigerung der Energieeffizienz, Einsatz von Recycling-Material
G: Einsatz von Recyclingmaterial, Alternative Energieträger, Einsatz neuer Technologien

[2.4] Wie hoch ist der aktuelle Aufpreis [Euro / m³] für eine Zementänderung z.B. CEM III ?

Antwort

A: "Gem. Preisliste bzw. auf Anfrage"
B: "ca. 7,00 EUR/cbm"
C: "Kann nicht pauschaliert werden, je nach Betonsorte unterschiedlich"
D: -
E: -
F: "3,-"
G: "9,50€/m³"

[3] CO2-reduzierter Beton

THG-Emissionen

[3.1] THG-Emissionen von CO2-reduzierten Sorten

Bitte laden Sie die angefügte Excel-Datei herunter und füllen sie aus. Die Anleitung im Reiter "THG-Emissionen Beton" hilft Ihnen dabei. Bitte laden Sie die ausgefüllte Datei anschließend hier als Antwort hoch.

 CO2-Fragebogen_Beton_ExcelTool_CO2redSorten.xlsx

Antwort

Kommentar

A: -
B: "Der Unterschied wäre hier nur vom CEM II auf einen CEM III zu wechseln."
C: -
D:-
E: ausgefüllt
F: C25/30 und C30/37 ausgefüllt
G: C25/30 und C30/37 ausgefüllt

[3.2] Wie wurden die Werte ermittelt?

Bitte laden Sie entsprechende Nachweise (EPD, etc.) hoch, falls die Berechnung nicht mit dem Formular der STRABAG durchgeführt wurde.

Antwort

- verifizierte Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804 bzw. ISO 21930
- Berechnung nach ISO 14025 und EN 15804 bzw. ISO 21930
- Eigene Berechnung (Anhang aus Formular STRABAG)

C: kann im Auftragsfall für fast alle Produkte spezifische Selbstdeklarationen erstellen, wg. aktueller Anstrengungen zur CO2-Einsparung ändern sich die Berechnungsgrundlagen häufig (gem. Mail)

Angehängte Datei

A, B, C, D: -
E: Selbstdeklaration
F: nur Selbstdeklaration für C25/30
G: Formular STRABAG

[3.3] Auf welche Angaben beziehen sich die Werte?

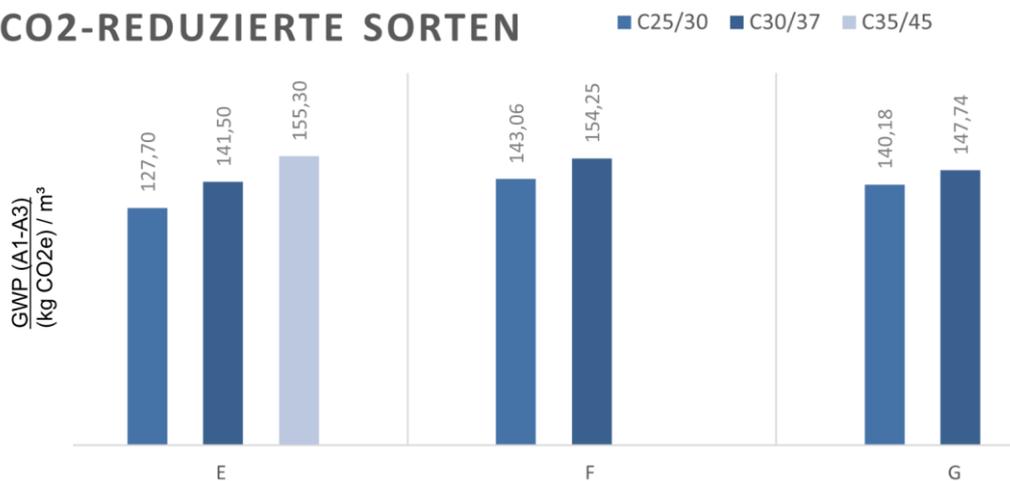
Antwort

- Hauptwerk (bitte Adresse angeben)
- Standort (bitte Adresse angeben)
- Branchenverband (bitte Namen angeben)
- Mittelwert über alle Werke
- Sonstige (bitte beschreiben)

Kommentar

A: -
B: -
C: -
D: -
E: 1 Standort
F: Hauptwerk
G: Mittelwert

CO2-REDUZIERTER SORTEN



Produkteigenschaften, Verfügbarkeit

[3.4] Gibt es Besonderheiten bezüglich der Ausschallfrist der CO2-reduzierten Produkte im Vergleich zu Ihren Standard-Produkten zu beachten?

Antwort

A: "Ja -> 56d aufgrund CEM III"
B: "Beim CEM III muss mit erheblich längeren Ausschallfristen gerechnet werden"
C: "Bei Verwendung von CO2-Reduzierten Zementen verlängert sich die Ausschallfrist i.d.R."
D, E, G: -
F: "Die CO2-reduzierten Betone werden mit einem CEM III Zement hergestellt. Die Festigkeitsentwicklung ist im Gegensatz zu unserem Standardzement (mittlere Festigkeitsentwicklung) langsam."

[3.5] Gibt es Besonderheiten bezüglich der Verarbeitbarkeit der CO2-reduzierten Produkte im Vergleich zu Ihren Standard-Produkten zu beachten?

Antwort

A: "Möglichst frühzeitige und ausreichende Nachbehandlungszeit nach Norm; Prüfdauer: 56 d beim CEM III"
B: "Das Wasserrückhaltevermögen ist beim CEM III schlechter (bluten)."
C: "nein"
D, E, G: -
F: "Nein"

[3.6] Tabelle zu Produkteigenschaften, Verfügbarkeit und Aufpreis

Bitte laden Sie die angefügte EXCEL-Datei herunter und füllen die Tabelle im Reiter "**Allgemein**" aus. Falls die Verfügbarkeit, Aufpreise etc. zwischen Ihren Werken variieren, geben Sie diese jeweils in einer Zeile an. Andernfalls reicht ein einmaliges Ausfüllen der Tabelle je Produkt. Bitte beachten Sie auch den Reiter "**Je Sorte**", falls CO2-reduzierte Sorten in Ihrer Preisliste oder Ihrem Produktverzeichnis zu finden sind.

 Fragebogen_Eigenschaften_CO2redBeton.xlsx

Antwort

A: -
B: -
C: -
D: -
E: -
F: teilweise ausgefüllt, Aufpreise 3 bzw. 8 Euro / m³ abh. von Zementsorte
G: ausgefüllt

[3.7] Wie viel Vorlauf zur Lieferung CO2-reduzierter Produkte sollte eingeplant werden?

Antwort

A: "nach Rücksprache"
B: "2 Wochen"
C, D, E: -
F: "Je nach Werk bis zu 1 Woche"
G: -

[3.8] Unterliegen die Preise für CO2-reduzierte Produkte starken Schwankungen? Falls ja, wodurch werden diese bedingt?

Antwort

A: -
B: "Eigentlich nicht"
C, D, E: -
F: "Nein"
G: -

[4] R-Beton

THG-Emissionen

[4.1] THG-Emissionen von R-Betonsorten

Bitte laden Sie die angefügte Excel-Datei herunter und füllen sie aus. Die Anleitung im Reiter "THG-Emissionen Beton" hilft Ihnen dabei. Bitte laden Sie die ausgefüllte Datei anschließend hier als Antwort hoch.

 CO2-Fragebogen_Beton_ExcelTool_RSorten.xlsx

Antwort

A: -
B: -
C: -
D: C25/30
E: C25/30; C30/37
F: vollständig ausgefüllt
G: C25/30; C30/37

[4.2] Wie wurden die Werte ermittelt?

Bitte laden Sie entsprechende Nachweise (EPD, etc.) hoch, falls die Berechnung nicht mit dem Formular der STRABAG durchgeführt wurde.

Antwort

- verifizierte Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804 bzw. ISO 21930
- Berechnung nach ISO 14025 und EN 15804 bzw. ISO 21930
- Eigene Berechnung (Anhang aus Formular STRABAG)

Angehängte Datei

C: kann im Auftragsfall für fast alle Produkte spezifische Selbstdeklarationen erstellen, wg. aktueller Anstrengungen zur CO2-Einsparung ändern sich die Berechnungsgrundlagen häufig (gem. Mail)

A, B, C: -
D: Formular der STRABAG
E: Selbstdeklaration
F: nur Selbstdeklaration für C30/37
G: Formular der STRABAG

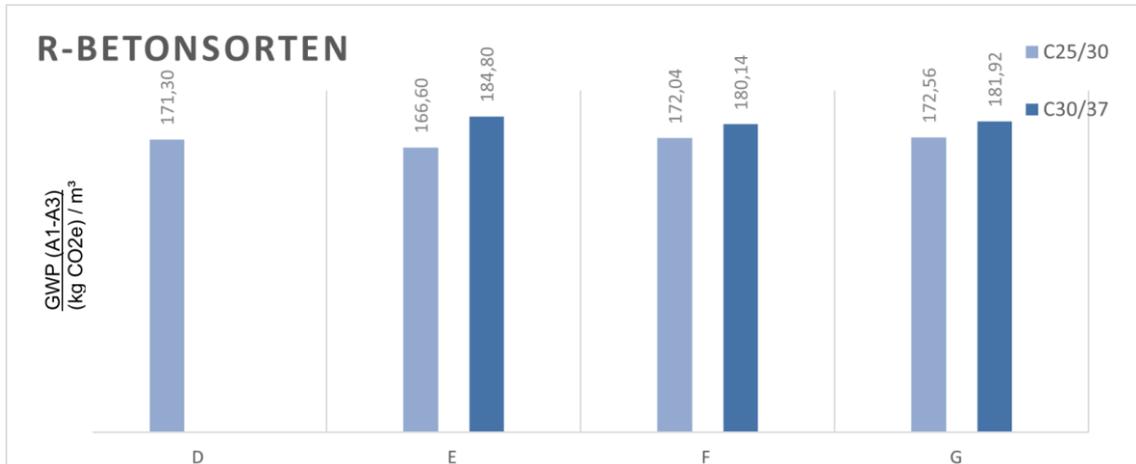
[4.3] Auf welche Angaben beziehen sich die Werte?

Antwort

- Hauptwerk (bitte Adresse angeben)
- Standort (bitte Adresse angeben)
- Branchenverband (bitte Namen angeben)
- Mittelwert über alle Werke
- Sonstige (bitte beschreiben)

Kommentar

A: -
B: -
C: -
D: 1 Standort
E: 1 Standort
F: Hauptwerk
G: Mittelwert



Produkteigenschaften, Verfügbarkeit

[4.4] Gibt es Besonderheiten bezüglich der Verarbeitbarkeit von R-Betone im Vergleich zu Ihren Standard-Produkten zu beachten?

Antwort

A: "Möglichst frühzeitige und ausreichende Nachbehandlungszeit nach Norm; Prüfalter: 56 d beim CEM III; Einbaukonsistenz nicht über F3; Max. bis C25/30 XC4, XF1, XA1
 B, D, E: -
 C: "nein", F: "Nein", G: "nein"

[4.5] Gibt es Besonderheiten bezüglich der Ausschallfrist der R-Betone im Vergleich zu Ihren Standard-Produkten zu beachten?

Antwort

A: "Prüfalter: 56 d beim CEM III"
 B, E, G: -
 C: "in Kombination mit CO2-reduzierten Zementen verlängert sich die Ausschallfrist"
 D: "Nein"
 F: "Nein"

[4.6] Tabelle zu Produkteigenschaften, Verfügbarkeit und Aufpreis

Bitte laden Sie die angefügte EXCEL-Datei herunter und füllen die Tabelle im Reiter "Allgemein" aus. Falls die Verfügbarkeit, Aufpreise etc. zwischen Ihren Werken variieren, geben Sie diese jeweils in einer Zeile an. Andernfalls reicht ein einmaliges Ausfüllen der Tabelle je Produkt. Bitte beachten Sie auch den Reiter "Je Sorte", falls R-Betone in Ihrer Preisliste oder Ihrem Produktverzeichnis zu finden sind.

Fragebogen_Eigenschaften_RBeton.xlsx

Antwort

A: -
 B: -
 C: -
 D: -
 E: -
 F: teilweise ausgefüllt, Anteil der RC-Gesteinskörnung 20 Prozent in allen angegebenen Sorten
 G: ausgefüllt, Anteil RC-GK: 25 (XA1) bis 35% Typ 1

[4.7] Wie viel Vorlauf zur Lieferung von R-Beton sollte eingeplant werden?

Antwort

A: "nach Rücksprache"
 B, E: -
 C: "je nach Menge unterschiedlich, Kleinmengen kurzfristig, große Mengen ggf. längerer Vorlauf (je nach Verfügbarkeit von RC-Zuschlagstoffen"
 D: "3-5 Werkstage", F: "1 Woche", G: "Nach Absprache"

[4.8] Woher beziehen Sie rezyklierte Gesteinskörnung?

Antwort

A: "Aus der Region"
B: -
C: "Zum Teil aus eigener Produktion, zum Teil von örtlichen Lieferanten"
D: regionalen Lieferanten benannt
E: -
F: Stadt in der Region
G: Kieslieferanten

[4.9] Unterliegen die Preise für R-Betone starken Schwankungen? Falls ja, wodurch werden diese bedingt?

Antwort

A: "In der Regel nicht"
B, C, D, E, G: -
F: "Nein"

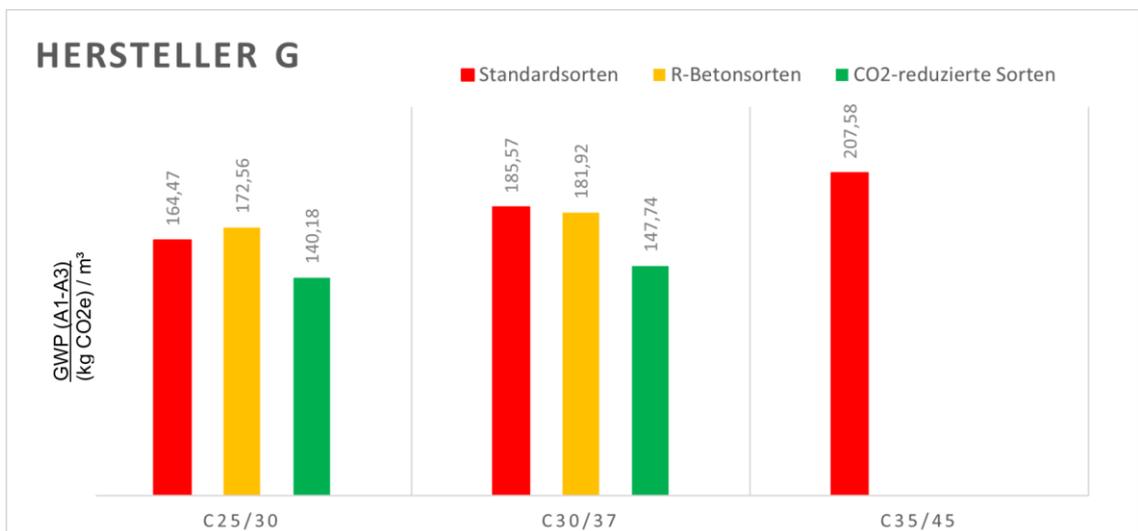
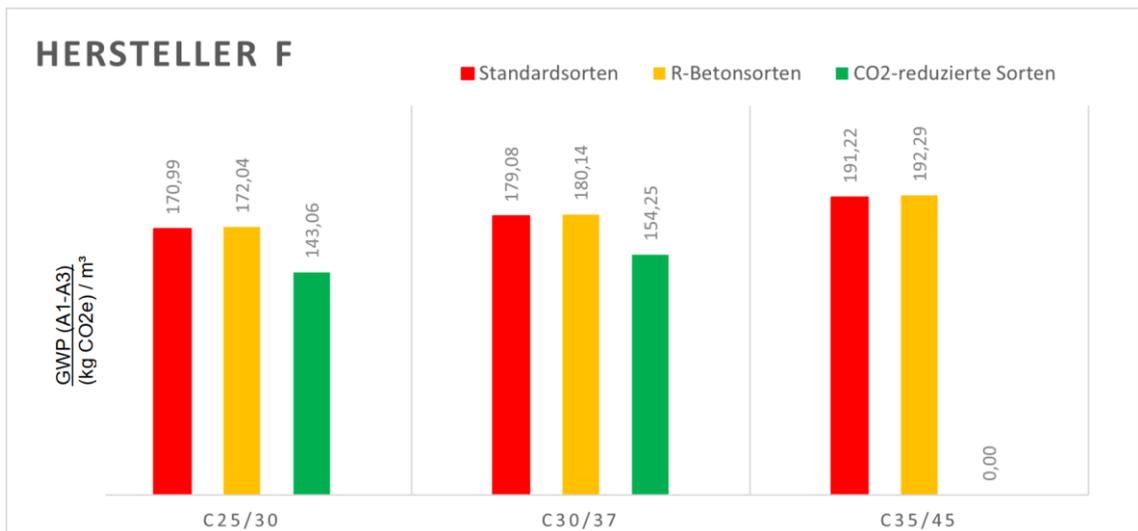
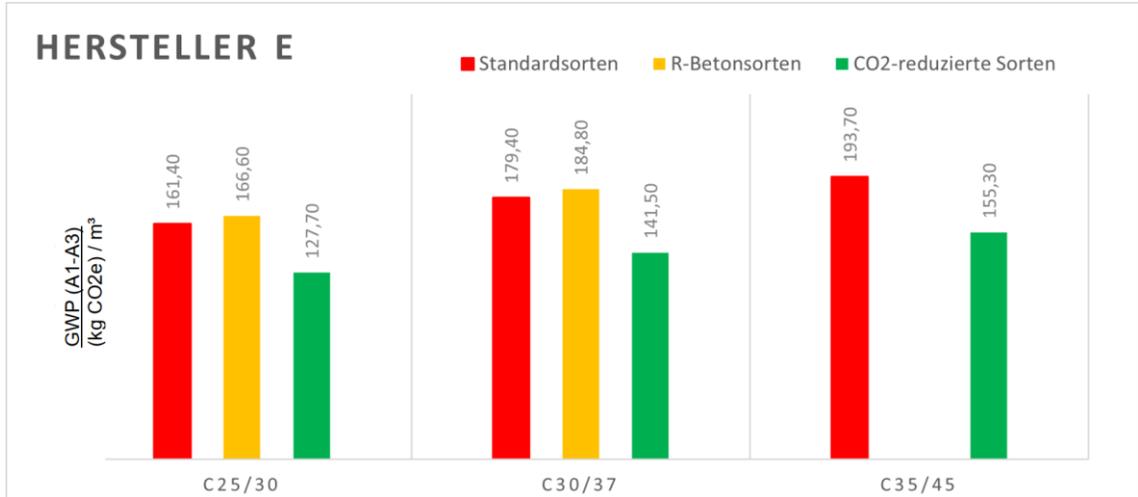
[5] CSC-Zertifizierung

[5.1] Falls eines oder mehrere Ihrer Werke durch das CSC zertifiziert wurden, laden Sie bitte hier entsprechende Nachweise hoch.

Antwort

A, B, D, G: -
C: 4 CSC-Zertifikate in Gold, davon 3 für Beton, 1 für Gesteinskörnung
E: gem. CSC-Toolbox: 3 Werke CSC-Zertifikat Beton in Gold, 2 inkl. CO2-Modul
F: CSC-Zertifikat Silber für Hauptwerk (gem. CSC-Toolbox 3 weitere Silber)

Treibhauspotential gem. [1.1], [3.1] und [4.1]:



Anhang 4: Beispielprojekt DonauTower

Anhang 4.1: Betonmengen - Ausschnitt aus dem Leistungsverzeichnis; Dokument der Ed. Züblin AG, bearbeitet

OZ	Kurztext	Langtext	VA Menge	ME	EP	WE	GB	WE
3	5		8		10	11	20	21
04.	Betonarbeiten - Transportbeton						0,00	EUR
04.01.	Betonsorten						0,00	EUR
04.01.01.	Grundpreis Normalbeton nach DIN EN 206-1, DIN 1045-2						0,00	EUR
04.01.01.0010	C08/10	.....	243,00	m3		EUR		EUR
04.01.01.0020	C12/15 X0, WF	.....	243,00	m3		EUR		EUR
04.01.01.0030	C20/25	.....	149,00	m3		EUR		EUR
04.01.01.0040	C25/30	.....	2,00	m3		EUR		EUR
04.01.01.0050	C30/37 XC4, XF1, XA1	.....	6.971,00	m3		EUR		EUR
04.01.01.0060	C30/37 XC3, XD1, XF1, XA1, WU	.....	3.497,00	m3		EUR		EUR
04.01.01.0070	C35/45 XC4, XD1, XF1, XA2, WU	.....	1.124,00	m3		EUR		EUR
04.01.01.0080	C35/45 XC4, XD1, XF2, XA2, WU	.....	67,00	m3		EUR		EUR
04.01.01.0090	C40/50 XC4, XD3, XF3, XA2	.....	77,00	m3		EUR		EUR
04.01.01.0100	C45/55 XC4, XD3, XF3, XA2	.....	34,00	m3		EUR		EUR
04.01.01.0110	C50/60 XC4, XD3, XF3, XA2	.....	36,00	m3		EUR		EUR
04.01.01.0120	Anpumpmischung Schlämpe	.....	50,00	m3		EUR		EUR
04.02.	Zulage							EUR
04.02.01.	Körnung							EUR
04.02.02.	Konsistenz							EUR
04.02.03.	Festigkeitsentwicklung							EUR
04.02.03.0010	Zulage langsame Festigkeitsentwicklung Bodenplatte	CEM III/A LH 'Bauteil Bodenplatte' Menge überschläglich ermittelt	2.964,00	m3		EUR	0,00	EUR
04.02.03.0011	Zulage langsame Festigkeitsentwicklung	alle weiteren Bauteile Menge überschläglich ermittelt	9.165,00	m3		EUR	Nur Einh.-Pr.	EUR
04.02.03.0020	Zulage schnelle Festigkeitsentwicklung		5.094,00	m3		EUR	0,00	EUR
04.02.03.0040	Verzögerer bis 3 h		1,00	m3		EUR	Nur Einh.-Pr.	EUR
04.02.04.	Saisonzuschlag							EUR
04.02.05.	Frachtzuschlag							EUR
04.02.06.	Preiserhöhung							EUR
04.02.0	Sonstige Zuschläge							EUR

Anhang 4.2: THG-Bilanzen der 10 Varianten

Variante 1

Projektdaten				Umrechnung/Zuordnung			
Sortennummer	Beton	Menge*	ME	Faktor	Kategorie	Menge*Faktor	Sortennummer / UUID
Summenprodukt							
13224	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F3 (m)	1141	m3	1,00	Beton	1.141,00	13224
13234	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F3 (s)	812	m3	1,00	Beton	812,00	13234
13324	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F3 (s)	750	m3	1,00	Beton	750,00	13324
13334	C30/37 XC1-3, XD1, XF1 WF F3 (s)	813	m3	1,00	Beton	813,00	13334
14134	C30/37 XC3, XD1, XF1, XA1 WA F4 (s) WU	40	m3	1,00	Beton	40,00	14134
14224	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F4 (m)	4593	m3	1,00	Beton	4.593,00	14224
14234	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1, XM1 WA F4 (s) W	1492	m3	1,00	Beton	1.492,00	14234
14324	C30/37 (k.A.)	2031	m3	1,00	Beton	2.031,00	14324
24234	C35/45 XC1-3, XF1, WO, F4 (m-l)	60	m3	1,00	Beton	60,00	24234
24224	C35/45 (k.A.)	199	m3	1,00	Beton	199,00	24224
BETON-STAHL	Betonstahl	2.139,00	to	1.000,00	Betonstahl	2.139.000,00	8565038f-5c21-48d7-94cb-958498ba9dd3

Sortennummer / UUID	Daten aus Datenbank Baustoff [Bezugsmenge] (Referenzjahr/Gültigkeit)	Herstellung		Entsorgung		Summenprodukt
		A1-A3		C3	C4	
		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		4.775,244		71,586	-	4.846,830
13224	projektspezifisch [CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N]	293,40		6,00	-	341,615
13234	projektspezifisch [CEM II/A-LL 42,5 R]	283,30		6,00	-	234,912
13324	projektspezifisch [CEM II/A-LL 32,5 R]	270,20		6,00	-	207,150
13334	projektspezifisch [k.A.]	275,20		6,00	-	228,616
14134	projektspezifisch [k.A.]	310,50		6,00	-	12,660
14224	projektspezifisch [CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N]	295,40		6,00	-	1.384,330
14234	projektspezifisch [CEM II/A-LL 42,5 R]	300,40		6,00	-	457,149
14324	projektspezifisch [k.A.]	280,30		6,00	-	581,475
24234	projektspezifisch [k.A.]	318,60		6,00	-	19,476
24224	projektspezifisch [k.A.]	311,60		6,00	-	63,202
8565038f-5c21-48d7-94cb-958498ba9dd3	Bewehrungsstahl [1kg] (2022/2024)	0,62		-	-	1.316,245

Variante 2

Projektdaten				Umrechnung/Zuordnung			
Sortennummer	Beton	Menge*	ME	Faktor	Kategorie	Menge*Faktor	Sortennummer /UUID
Summenprodukt							
13241	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F3 (m-l)	840	m3	1,00	Beton	840,00	13241
13341	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F3 (m-l)	750	m3	1,00	Beton	750,00	13341
14240	C30/37 XC2 WF F4 WU (l)	870	m3	1,00	Beton	870,00	14240
13234	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F3 (s)	1113	m3	1,00	Beton	1.113,00	13234
13334	C30/37 XC1-3, XD1, XF1 WF F3 (s)	813	m3	1,00	Beton	813,00	13334
14134	C30/37 XC3, XD1, XF1, XA1 WA F4 (s) WU	40	m3	1,00	Beton	40,00	14134
14234	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1, XM1 WA F4 (s) V	1944	m3	1,00	Beton	1.944,00	14234
14241	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F4 (m-l)	3271	m3	1,00	Beton	3.271,00	14241
14340	C30/37 XC2 WF F4 (l)	2031	m3	1,00	Beton	2.031,00	14340
24240	C35/45 XC4, XD2, XF3 XF2, XA1 WA F4 (m-l)	199	m3	1,00	Beton	199,00	24240
24234	C35/45 XC1-3, XF1, WO, F4 (m-l)	60	m3	1,00	Beton	60,00	24234
BETON STAHL	Betonstahl	#####	to	1.000,00	Betonstahl	2.139.000,00	8565038f-5c21-48d7-94cb-958498ba9dd3

Sortennummer /UUID	Daten aus Datenbank				Summen- produkt
	Baustoff [Bezugsmenge] (Referenzjahr/Gültigkeit)	Herstellung	Entsorgung		
		A1-A3 <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	C3 <input checked="" type="checkbox"/>	C4 <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
		3.866,034	71,586	-	3.937,620
13241	projektspezifisch [CEM III/A 42,5 N]	179,00	6	-	155,400
13341	projektspezifisch [CEM III/A 42,5 N]	169,90	6	-	131,925
14240	projektspezifisch [CEM III/A 42,5 N]	175,60	6	-	157,992
13234	projektspezifisch [CEM II/A-LL 42,5 R]	283,30	6	-	321,991
13334	projektspezifisch [k.A.]	275,20	6	-	228,616
14134	projektspezifisch [k.A.]	310,50	6	-	12,660
14234	projektspezifisch [CEM III/A-LL 42,5 R]	300,40	6	-	595,642
14241	projektspezifisch [CEM III/A 42,5 N]	180,00	6	-	608,406
14340	projektspezifisch [CEM III/A 42,5 N]	166,40	6	-	350,144
24240	projektspezifisch [CEM III/A 42,5 N]	190,60	6	-	39,123
24234	projektspezifisch [k.A.]	318,60	6	-	19,476
8565038f-5c21-48d7-94cb-958498ba9dd3	Bewehrungsstahl [1kg] (2022/2024)	0,62	-	-	1.316,245

Variante 3

Projektdaten				Umrechnung/Zuordnung		
Pos.	Baustoff	Menge*	ME	Faktor	Kategorie	Menge*Faktor
Summenprodukt						
1	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F3 (m-l)	840	m3	1,00	Beton	840,00
2	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F3 (m-l)	750	m3	1,00	Beton	750,00
3	C30/37 XC2 WF F4 WU (l)	870	m3	1,00	Beton	870,00
4	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F3 (s) Ersatz: (m-l)	1113	m3	1,00	Beton	1.113,00
5	C30/37 XC1-3, XD1, XF1 WF F3 (s) Ersatz: (l) [geeignet gem. aktueller Abrufliste]	813	m3	1,00	Beton	813,00
6	C30/37 XC3, XD1, XF1, XA1 WA F4 (s) WU Ersatz: (l)	40	m3	1,00	Beton	40,00
7	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1, XM1 WA F4 (s) WU Annahme: (m)	1944	m3	1,00	Beton	1.944,00
8	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F4 (m-l)	3271	m3	1,00	Beton	3.271,00
9	C30/37 XC2 WF F4 (l)	2031	m3	1,00	Beton	2.031,00
10	C35/45 XC4, XD2, XF3 XF2, XA1 WA F4 (m-l)	199	m3	1,00	Beton	199,00
11	C35/45 XC1-3, XF1, WO, F4 (m-l) Ersatz: höherwertig	60	m3	1,00	Beton	60,00
BETON-STAHL	Betonstahl	2.139,00	to	#####	Betonstahl	2.139.000,00

Daten aus Datenbank		
Pos.	UUID / Sortennummer	Baustoff [Bezugsmenge] (Referenzjahr/Gültigkeit)
Summenprodukt		
1	13241	projektspezifisch [CEM III/A 42,5 N]
2	13341	projektspezifisch [CEM III/A 42,5 N]
3	14240	projektspezifisch [CEM III/A 42,5 N]
4	13234 ersetzt durch: 13241	projektspezifisch [CEM II/A-LL 42,5 R] ersetzt durch [CEM III/A 42,5 N]
5	13334 ersetzt durch: 13241	projektspezifisch [k.A.], ersetzt durch [CEM III/A 42,5 N]
6	14134 ersetzt durch: 14240	projektspezifisch [k.A.], ersetzt durch [CEM III/A 42,5 N]
7	Anmerkung (a), Emissionfaktoren von 14241	projektspezifisch [CEM II/A-LL 42,5 R], Annahme: [CEM III/A 42,5 N]
8	14241	projektspezifisch [CEM III/A 42,5 N]
9	14340	projektspezifisch [CEM III/A 42,5 N]
10	24240	projektspezifisch [CEM III/A 42,5 N]
11	24234 ersetzt durch: 24240	projektspezifisch [k.A.] ersetzt durch [CEM III/A 42,5]
BETON-STAHL	8565038f-5c21-48d7-94cb-958498ba9dd3	Bewehrungsstahl [1kg] (2022/2024)

Pos.	Herstellung	Entsorgung			Summenprodukt
	A1-A3	C3	C4		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Summer	3.424.604	71.586	-	-	3.496.190
1	179,00	6	-	-	155.400
2	169,90	6	-	-	131.925
3	175,60	6	-	-	157.992
4	179,00	6	-	-	205.905
5	179,00	6	-	-	150.405
6	175,60	6	-	-	7.264
7	180,00	6	-	-	361.584
8	180,00	6	-	-	608.406
9	166,40	6	-	-	350.144
10	190,60	6	-	-	39.123
11	190,60	6	-	-	11.796
BETON-STAHL	0,62	-	-	-	1.316.245

Anmerkung (a):

- gem. DIN1045-1:2023:08 Tabelle F.3 ist CEM III/A auch für XM1-3 zugelassen
- im projektspezifischen Sortenverzeichnis liegt keine weitere Sorte für die Expositions-kategorie XM1 vor
- Annahme: Emissionswerte der CO₂-reduzierten Sorte 14241, weil diese das höchste Treibhauspotential der CO₂-reduzierten Sorten hat und bis auf XM1 und WU die gleichen Anforderungen abdeckt.

Variante 4

Projektdaten				Umrechnung/Zuordnung		
Pos.	Baustoff	Menge*	ME	Faktor	Kategorie	Menge*Faktor
Summenprodukt						
1	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F3 (m-l)	840	m3	1,00	Beton	840,00
2	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F3 (m-l)	750	m3	1,00	Beton	750,00
3	C30/37 XC2 WF F4 WU (l)	870	m3	1,00	Beton	870,00
4	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F3 (s)	1113	m3	1,00	Beton	1.113,00
5	C30/37 XC1-3, XD1, XF1 WF F3 (s)	813	m3	1,00	Beton	813,00
6	C30/37 XC3, XD1, XF1, XA1 WA F4 (s) WU	40	m3	1,00	Beton	40,00
7	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1, XM1 WA F4 (s) W	1944	m3	1,00	Beton	1.944,00
8	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F4 (m-l)	3271	m3	1,00	Beton	3.271,00
9	C30/37 XC2 WF F4 (l)	2031	m3	1,00	Beton	2.031,00
10	C35/45 XC4, XD2, XF3 XF2, XA1 WA F4 (m-l)	199	m3	1,00	Beton	199,00
11	C35/45 XC1-3, XF1, WO, F4 (m-l)	60	m3	1,00	Beton	60,00
BETON-STAHL	Betonstahl	2.139,00	to	#####	Betonstahl	2.139.000,00

		Daten aus Datenbank
Pos.	UUID	Baustoff [Bezugsmenge] (Referenzjahr/Gültigkeit)
Summenprodukt		
1	258b377e-ec3b-4e8c-b3fd-dda1eb370f7d	Transportbeton C30/37 [1m3] (2022/2024)
2	258b377e-ec3b-4e8c-b3fd-dda1eb370f7d	Transportbeton C30/37 [1m3] (2022/2024)
3	258b377e-ec3b-4e8c-b3fd-dda1eb370f7d	Transportbeton C30/37 [1m3] (2022/2024)
4	258b377e-ec3b-4e8c-b3fd-dda1eb370f7d	Transportbeton C30/37 [1m3] (2022/2024)
5	258b377e-ec3b-4e8c-b3fd-dda1eb370f7d	Transportbeton C30/37 [1m3] (2022/2024)
6	258b377e-ec3b-4e8c-b3fd-dda1eb370f7d	Transportbeton C30/37 [1m3] (2022/2024)
7	258b377e-ec3b-4e8c-b3fd-dda1eb370f7d	Transportbeton C30/37 [1m3] (2022/2024)
8	258b377e-ec3b-4e8c-b3fd-dda1eb370f7d	Transportbeton C30/37 [1m3] (2022/2024)
9	258b377e-ec3b-4e8c-b3fd-dda1eb370f7d	Transportbeton C30/37 [1m3] (2022/2024)
10	interpoliert (siehe Favoriten OB2023-I)	Transportbeton C30/37 und C50/60 [1m3] (2022/2024)
11	interpoliert (siehe Favoriten OB2023-I)	Transportbeton C30/37 und C50/60 [1m3] (2022/2024)
BETON STAHL	8565038f-5c21-48d7-94cb-958498ba9dd3	Bewehrungsstahl [1kg] (2022/2024)

Pos.	Herstellung		Entsorgung			Summen- produkt
	A1-A3		C3		C4	
	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Summe	4.414.384		168.921		-	4.583.305
1	259,30		14,16		-	229.705
2	259,30		14,16		-	205.094
3	259,30		14,16		-	237.909
4	259,30		14,16		-	304.360
5	259,30		14,16		-	222.322
6	259,30		14,16		-	10.938
7	259,30		14,16		-	531.604
8	259,30		14,16		-	894.483
9	259,30		14,16		-	555.395
10	276,37		14,17		-	57.817
11	276,37		14,17		-	17.432
BETON STAHL	0,62		-		-	1.316.245

Variante 5

Projektdaten				Umrechnung/Zuordnung		
Pos.	Baustoff	Menge*	ME	Faktor	Kategorie	Menge*Faktor
Summenprodukt						
1	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F3 (m-l)	840	m3	1,00	Beton	840,00
2	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F3 (m-l)	750	m3	1,00	Beton	750,00
3	C30/37 XC2 WF F4 WU (l)	870	m3	1,00	Beton	870,00
4	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F3 (s)	1113	m3	1,00	Beton	1.113,00
5	C30/37 XC1-3, XD1, XF1 WF F3 (s)	813	m3	1,00	Beton	813,00
6	C30/37 XC3, XD1, XF1, XA1 WA F4 (s) WU	40	m3	1,00	Beton	40,00
7	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1, XM1 WA F4 (s) W	1944	m3	1,00	Beton	1.944,00
8	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F4 (m-l)	3271	m3	1,00	Beton	3.271,00
9	C30/37 XC2 WF F4 (l)	2031	m3	1,00	Beton	2.031,00
10	C35/45 XC4, XD2, XF3 XF2, XA1 WA F4 (m-l)	199	m3	1,00	Beton	199,00
11	C35/45 XC1-3, XF1, WO, F4 (m-l)	60	m3	1,00	Beton	60,00
BETON- STAHL	Betonstahl	2.139,00	to	1.000,00	Betonstahl	2.139.000,00

		Daten aus Datenbank
Pos.	UUID	Baustoff [Bezugsmenge] (Referenzjahr/Gültigkeit)
Summenprodukt		
1	b38f2dac-fa08-4a9c-ae8d-017f6e2f169f	Recycling Transportbeton C30/37 [1m3] (2022/2024)
2	b38f2dac-fa08-4a9c-ae8d-017f6e2f169f	Recycling Transportbeton C30/37 [1m3] (2022/2024)
3	b38f2dac-fa08-4a9c-ae8d-017f6e2f169f	Recycling Transportbeton C30/37 [1m3] (2022/2024)
4	b38f2dac-fa08-4a9c-ae8d-017f6e2f169f	Recycling Transportbeton C30/37 [1m3] (2022/2024)
5	b38f2dac-fa08-4a9c-ae8d-017f6e2f169f	Recycling Transportbeton C30/37 [1m3] (2022/2024)
6	b38f2dac-fa08-4a9c-ae8d-017f6e2f169f	Recycling Transportbeton C30/37 [1m3] (2022/2024)
7	b38f2dac-fa08-4a9c-ae8d-017f6e2f169f	Recycling Transportbeton C30/37 [1m3] (2022/2024)
8	b38f2dac-fa08-4a9c-ae8d-017f6e2f169f	Recycling Transportbeton C30/37 [1m3] (2022/2024)
9	b38f2dac-fa08-4a9c-ae8d-017f6e2f169f	Recycling Transportbeton C30/37 [1m3] (2022/2024)
10	Interpoliert zwischen: b38f2dac-fa08-4a9c-ae8d-017f6e2f169f ; 5c89cce2-688c-4fed-aa02-eda80ffa5f7	Recycling Transportbeton C30/37 [1m3] (2022/2024) und Recycling Transportbeton C50/60 [1m3] (2022/2024)
11	Interpoliert zwischen: b38f2dac-fa08-4a9c-ae8d-017f6e2f169f ; 5c89cce2-688c-4fed-aa02-eda80ffa5f7	Recycling Transportbeton C30/37 [1m3] (2022/2024) und Recycling Transportbeton C50/60 [1m3] (2022/2024)
BETON-STAHL	8565038f-5c21-48d7-94cb-958498ba9dc	Bewehrungsstahl [1kg] (2022/2024)

Pos.	Herstellung	Entsorgung			Summenprodukt
	A1-A3	C3	C4		
	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Summenp	4.672.519	186.053	-		4.858.572
1	281,07	15,60	-		249.207
2	281,07	15,60	-		222.507
3	281,07	15,60	-		258.108
4	281,07	15,60	-		330.200
5	281,07	15,60	-		241.197
6	281,07	15,60	-		11.867
7	281,07	15,60	-		576.737
8	281,07	15,60	-		970.425
9	281,07	15,60	-		602.548
10	291,81	15,26	-		61.107
11	291,81	15,26	-		18.424
BETON-STAHL	0,62	-	-		1.316.245

Variante 6

Projektdaten				Umrechnung/Zuordnung		
Pos.	Baustoff	Menge*	ME	Faktor	Kategorie	Menge*Faktor
Summenprodukt						
34241	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F4 (l)	1.614,00	m3	1,00	Beton	1.614,00
34141	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F4 (l)	156,00	m3	1,00	Beton	156,00
14240	C30/37 XC2 WF F4 WU (l)	2.703,50	m3	1,00	Beton	2.703,50
34141	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F4 (l)	137,00	m3	1,00	Beton	137,00
14241	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F4 (m-l)	312,00	m3	1,00	Beton	312,00
23240	C35/45 XC4, XD2, XF3, XF2, XA1 WA F3 (l)	65,00	m3	1,00	Beton	65,00
24121	C35/45 XC4, XD3, XA2 WA F4 (m)	47,50	m3	1,00	Beton	47,50
24240	C35/45 XC4, XD2, XF3 XF2, XA1 WA F4 (m-l)	942,75	m3	1,00	Beton	942,75
13240	C30/37 XC2-3, XD1, XF1, XA1, WA F3 (l) WU	122,50	m3	1,00	Beton	122,50
13234	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F3 (s)	112,50	m3	1,00	Beton	112,50
24234	C35/45 XC1-3, XF1, WO, F4 (m-l)	111,25	m3	1,00	Beton	111,25
14234	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1, XM1 WA F4 (s) WU	2.225,75	m3	1,00	Beton	2.225,75
70000	C50/60 XC3 XF1 WF F4 (s)	13,50	m3	1,00	Beton	13,50
14134	C30/37 XC3, XD1, XF1, XA1 WA F4 (s) WU	60,50	m3	1,00	Beton	60,50
28400	C50/60 XC1-3 XD1 XF1 WF F4 (s)	47,00	m3	1,00	Beton	47,00
28300	C50/60 XC1-3 XD1 XF1 WF F3 (s)	7,50	m3	1,00	Beton	7,50
28420	C50/60 XC1-3 XD1 XF1 WF F4 (s)	160,50	m3	1,00	Beton	160,50
71000	C50/60 XC1-4 XF1 WF F4 (s)	36,00	m3	1,00	Beton	36,00
18231	C40/50 XC1-3 XF1 WF F4 (s)	98,75	m3	1,00	Beton	98,75
27740	C35/45 XC1-3 XF1 WO F4 (m)	42,50	m3	1,00	Beton	42,50
BETON-STAHL	Betonstahl bis 13.12. verbaut	1.705,00	to	1.000,00	Betonstahl	1.705.000,00

Anmerkungen:

[1] Für die Betonsorten der Festigkeitsklasse C40/50 und C50/60 liegen keine projektspezifischen Daten vor. Da es sich um Standardprodukte handelt, werden generische Daten der OBD 2023-I verwendet.

[2] Angaben zu den Emissionen dieser Sorte fehlen. Auf Basis der Angaben zum Zement (320 kg/m³ CEM III/A 42,5 N) werden die Emissionen einer ähnlichen Sorte angenommen. Diese enthält zusätzlich Flugasche.

		Daten aus Datenbank
Pos.	Sortennummer / UUID	Baustoff [Bezugsmenge] (Referenzjahr/C
Summenprodukt		
34241	[2] ; 14241	projektspezifisch [CEM III/A 42,5 N]
34141	[3] ; 24240	projektspezifisch [CEM III/A 42,5 N]
14240	14240	projektspezifisch [CEM III/A 42,5 N]
34141	[3] ; 24240	projektspezifisch [CEM III/A 42,5 N]
14241	14241	projektspezifisch [CEM III/A 42,5 N]
23240	[3] ; 24240	projektspezifisch [CEM III/A 42,5 N]
24121	[4] ; 24234	projektspezifisch [CEM IV/A-LL 42,5 R, CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N]
24240	24240	projektspezifisch [CEM III/A 42,5 N]
13240	[5] ; 13241	projektspezifisch [CEM III/A 42,5 N]
13234	13234	projektspezifisch [CEM II/A-LL 42,5 R]
24234	24234	projektspezifisch [k.A.]
14234	14234	projektspezifisch [CEM II/A-LL 42,5 R]
70000	[1] ; 079ed601-8b92-49cd-9c09-ab8e067366cf	Transportbeton C50/60 [1m3] (2022/2024)
14134	14134	projektspezifisch [k.A.]
28400	[1] ; 079ed601-8b92-49cd-9c09-ab8e067366cf	Transportbeton C50/60 [1m3] (2022/2024)
28300	[1] ; 079ed601-8b92-49cd-9c09-ab8e067366cf	Transportbeton C50/60 [1m3] (2022/2024)
28420	[1] ; 079ed601-8b92-49cd-9c09-ab8e067366cf	Transportbeton C50/60 [1m3] (2022/2024)
71000	[1] ; 079ed601-8b92-49cd-9c09-ab8e067366cf	Transportbeton C50/60 [1m3] (2022/2024)
18231	[1] ; Interpoliert zwischen: 258b377e-ec3b-4e8c-b3fd-dda1eb370f7d ; 079ed601-8b92-49cd-9c09-ab8e067366cf	
27740	[6] ; 24234	projektspezifisch [CEM III/A 42,5 N , CEM II/ A-LL 42,5 R]
BETON-STAHL	8565038f-5c21-48d7-94cb-958498ba9dd3	Bewehrungsstahl [1kg] (2022/2024)

Anmerkungen:

[3] Angaben zu den Emissionen dieser Sorte fehlen. Auf Basis der Angaben zum Zement (Sorte und Menge) wird eine ähnliche Sorte gewählt, zu der projektspezifische Daten vorliegen. Die Wahl erfolgt aufgrund der größeren Zementmenge auf der sicheren Seite.

[4] Angaben zu den Emissionen dieser Sorte fehlen. Auf Basis der Angaben zum Zement (Sorte und Menge) wird eine ähnliche Sorte gewählt, zu der projektspezifische Daten vorliegen. Aufgrund der geringen verbauten Menge ist die Annahme in Ordnung.

Pos.	Herstellung		Entsorgung		Summen- produkt
	A1-A3		C3	C4	
	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Summen	3.039.452		57.080	-	3.096.532
34241	180,00		6	-	300.204
34141	190,60		6	-	30.670
14240	175,60		6	-	490.956
34141	190,60		6	-	26.934
14241	180,00		6	-	58.032
23240	190,60		6	-	12.779
24121	318,60		6	-	15.419
24240	190,60		6	-	185.345
13240	179,00		6	-	22.663
13234	283,30		6	-	32.546
24234	318,60		6	-	36.112
14234	300,40	6,00		-	681.970
70000	327,56	14,22		-	4.614
14134	310,50	6,00		-	19.148
28400	327,56	14,22		-	16.064
28300	327,56	14,22		-	2.563
28420	327,56	14,22		-	54.856
71000	327,56	14,22		-	12.304
18231	293,43	14,19		-	30.377
27740	318,60	6		-	13.796
BETON- STAHL	0,62	-		-	1.049.181

Anmerkungen:

[5] Angaben zu den Emissionen dieser Sorte fehlen. Auf Basis der Angaben zum Zement (Sorte und Menge) wird eine ähnliche Sorte gewählt, zu der projektspezifische Daten vorliegen. Aufgrund der geringen verbauten Menge ist die Annahme in Ordnung.

[6] Angaben zu den Emissionen dieser oder einer ähnlichen Sorte fehlen. Deswegen werden auf der sicheren Seite die projektspezifisch höchsten Werte eines Betons der Festigkeitsklasse C35/45 verwendet. Aufgrund der geringen verbauten Menge ist diese Annahme in Ordnung.

Variante 7

Projektdaten				Umrechnung/Zuordnung		
Pos.	Baustoff	Menge*	ME	Faktor	Kategorie	Menge*Faktor
Summenprodukt						
1	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F3 (m-l)	840	m3	1,00	Beton	840,00
2	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F3 (m-l)	750	m3	1,00	Beton	750,00
3	C30/37 XC2 WF F4 WU (l)	870	m3	1,00	Beton	870,00
4	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F3 (s)	1113	m3	1,00	Beton	1.113,00
5	C30/37 XC1-3, XD1, XF1 WF F3 (s)	813	m3	1,00	Beton	813,00
6	C30/37 XC3, XD1, XF1, XA1 WA F4 (s) WU	40	m3	1,00	Beton	40,00
7	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1, XM1 WA F4 (s) \	1944	m3	1,00	Beton	1.944,00
8	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F4 (m-l)	3271	m3	1,00	Beton	3.271,00
9	C30/37 XC2 WF F4 (l)	2031	m3	1,00	Beton	2.031,00
10	C35/45 XC4, XD2, XF3 XF2, XA1 WA F4 (m-l)	199	m3	1,00	Beton	199,00
11	C35/45 XC1-3, XF1, WO, F4 (m-l)	60	m3	1,00	Beton	60,00
BETON-STAHL	Betonstahl	2.139,00	to	1.000,00	Betonstahl	2.139.000,00

Daten aus Datenbank		
Pos.	UUID	Baustoff [Bezugsmenge] (Referenzjahr/Gültigkeit)
Summenprodukt		
1	320adc1f-02d1-4968-8f92-0886e617a807	Beton C30/37 XC4 XF1 XA1 F3 16 M ECOPact , Rezept Nummer DA5234-DSFS Version 1, Transportbetonwerk Frankfurt [1m3] (2023/2028)
2	320adc1f-02d1-4968-8f92-0886e617a807	
3	320adc1f-02d1-4968-8f92-0886e617a807	
4	320adc1f-02d1-4968-8f92-0886e617a807	
5	320adc1f-02d1-4968-8f92-0886e617a807	
6	320adc1f-02d1-4968-8f92-0886e617a807	
7	320adc1f-02d1-4968-8f92-0886e617a807	
8	320adc1f-02d1-4968-8f92-0886e617a807	
9	320adc1f-02d1-4968-8f92-0886e617a807	
10	bb694d91-46f5-44f1-9693-6a9e56ea10d3	Beton C35/45 X(C4 D2 S2 F2 F3 A2*) F3 16 L ECOPact , Rezept Nummer DA6232-GSFS Version 1, Transportbetonwerk Frankfurt [1m3] (2023/2028)
11	bb694d91-46f5-44f1-9693-6a9e56ea10d3	
BETON-STAHL	8565038f-5c21-48d7-94cb-958498ba9dd3	Bewehrungsstahl [1kg] (2022/2024)

Pos.	Herstellung		Entsorgung		Summenprodukt
	A1-A3	C3	C3	C4	
Summer	3.325.375	46.043	-	-	3.371.419
1	168,50	3,85	-	-	144.771
2	168,50	3,85	-	-	129.260
3	168,50	3,85	-	-	149.942
4	168,50	3,85	-	-	191.822
5	168,50	3,85	-	-	140.118
6	168,50	3,85	-	-	6.894
7	168,50	3,85	-	-	335.043
8	168,50	3,85	-	-	563.747
9	168,50	3,85	-	-	350.037
10	163,70	4,41	-	-	33.453
11	163,70	4,41	-	-	10.086
BETON-STAHL	0,62	-	-	-	1.316.245

Anmerkung: Die Datensätze gelten für die Konsistenzklasse F3. Die Annahme der einen Betonsorte je Festigkeitsklasse, für die es Daten in der OBD 2023-I gibt, ist ausreichend, um das THG-Einsparpotential zu ermitteln. Die projektspezifischen Daten haben gezeigt, dass die THG-Emissionen zwischen den, aber nicht innerhalb der Festigkeitsklassen deutlich variieren.

Variante 8

Projektdaten				Umrechnung/Zuordnung		
Pos.	Baustoff	Menge*	ME	Faktor	Kategorie	Menge*Faktor
Summenprodukt						
1	C30/37 XC4, XF1, XA1	6971	m3	1,1150172	Beton	7.772,78
2	C30/37 XC3, XD1, XF1, XA1, WU	3497	m3	1,1150172	Beton	3.899,22
3	C35/45 XC4, XD2, XF3 XF2, XA1 WA F4 (m-l)	199	m3	1,00	Beton	199,00
4	C35/45 XC1-3, XF1, WO, F4 (m-l)	60	m3	1,00	Beton	60,00
BETON-STAHL	Betonstahl	2.139,00	to	1.000,00	Betonstahl	2.139.000,00

Pos.	Antwort auf Fragebogen	Datenherkunft	Daten aus Datenbank			Summenprodukt
			Herstellung A1-A3	Entsorgung C3	C4	
			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Summenprodukt			3.464.196	-	15.236	3.479.431
1	Hersteller F - R-Beton	Selbstdeklaration C30/37 FR2	180,14	-	1,27	1.410.061
2	Hersteller F - Standardbeton	Angaben zur Sorte C30/37 FS2	179,08	-	1,29	703.301
3	Hersteller F - Standardbeton	Selbstdeklaration C35/45 FS3	191,08	-	1,29	38.282
4	Hersteller F - Standardbeton	Selbstdeklaration C35/45 FS3	191,08	-	1,29	11.542
BETON-STAHL	8565038f-5c21-48d7-94cb-958498ba9dd3	Bewehrungsstahl [1kg] (2022/2024)	0,62	-	-	1.316.245

Anmerkung: Werte der Module C3 und C4 für die Betonsorte FS2 wurden aus der Selbstdeklaration für FS3 übernommen.

Variante 9

				Umrechnung/Zuordnung		
Pos.	Baustoff	Menge*	ME	Faktor	Kategorie	Menge*Faktor
Summenprodukt						
1	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F3 (m-l)	840	m3	1,00	Beton	840,00
2	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F3 (m-l)	750	m3	1,00	Beton	750,00
3	C30/37 XC2 WF F4 WU (l)	870	m3	1,00	Beton	870,00
4	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F3 (s)	1113	m3	1,00	Beton	1.113,00
5	C30/37 XC1-3, XD1, XF1 WF F3 (s)	813	m3	1,00	Beton	813,00
6	C30/37 XC3, XD1, XF1, XA1 WA F4 (s) WU	40	m3	1,00	Beton	40,00
7	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1, XM1 WA F4 (s) W	1944	m3	1,00	Beton	1.944,00
8	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F4 (m-l)	3271	m3	1,00	Beton	3.271,00
9	C30/37 XC2 WF F4 (l)	2031	m3	1,00	Beton	2.031,00
10	C35/45 XC4, XD2, XF3 XF2, XA1 WA F4 (m-l)	199	m3	1,00	Beton	199,00
11	C35/45 XC1-3, XF1, WO, F4 (m-l)	60	m3	1,00	Beton	60,00
BETON-STAHL	Betonstahl	2.139,00	to	1.000,00	Betonstahl	2.139.000,00

Pos.	Antwort auf Fragebogen	Datenherkunft	Daten aus Datenbank				Summenprodukt
			Herstellung A1-A3		Entsorgung C3 C4		
			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Summenprodukt			3.116.522			15.515	3.132.037
1	Hersteller E	Selbstdeklaration C30/37 16 CEM III/A 42,5 N EC2	150,60			1,30	127.596
2	Hersteller E	Selbstdeklaration C30/37 16 CEM III/A 42,5 N EC2	150,60			1,30	113.925
3	Hersteller E	Selbstdeklaration C30/37 16 CEM III/A 42,5 N EC2	150,60			1,30	132.153
4	Hersteller E	Selbstdeklaration C30/37 16 CEM III/A 42,5 N EC2	150,60			1,30	169.065
5	Hersteller E	Selbstdeklaration C30/37 16 CEM III/A 42,5 N EC2	150,60			1,30	123.495
6	Hersteller E	Selbstdeklaration C30/37 16 CEM III/A 42,5 N EC2	150,60			1,30	6.076
7	Hersteller E	Selbstdeklaration C30/37 16 CEM III/A 42,5 N EC2	150,60			1,30	295.294
8	Hersteller E	Selbstdeklaration C30/37 16 CEM III/A 42,5 N EC2	150,60			1,30	496.865
9	Hersteller E	Selbstdeklaration C30/37 16 CEM III/A 42,5 N EC2	150,60			1,30	308.509
10	Hersteller E	Selbstdeklaration C35/45 16 CEM III/A 42,5 N EC3	163,99			1,32	32.897
11	Hersteller E	Selbstdeklaration C35/45 16 CEM III/A 42,5 N EC3	163,99			1,32	9.919
BETON-STAHL	8565038f-5c21-48d7-94cb-958498ba9dd3	Bewehrungsstahl [1kg] (2022/2024)	0,62			-	1.316.245

Variante 10

Projektdaten				Umrechnung/Zuordnung		
Pos.	Baustoff	Menge*	ME	Faktor	Kategorie	Menge*Faktor
Summenprodukt						
1	C30/37 XC4, XF1, XA1	6971	m3	1,1150172	Beton	7.772,78
2	C30/37 XC3, XD1, XF1, XA1, WU	3497	m3	1,1150172	Beton	3.899,22
3	C35/45 XC4, XD2, XF3 XF2, XA1	199	m3	1,00	Beton	199,00
4	C35/45 XC1-3, XF1, WO, F4 (m-l)	60	m3	1,00	Beton	60,00
BETON-STAHL	Betonstahl	2.139,00	to	1.000,00	Betonstahl	2.139.000,00

Pos.	Antwort auf Fragebogen	Datenherkunft	Daten aus Datenbank			
Summenprodukt						
1	Hersteller E - R-Beton	Selbstdeklaration C30/37 16 CEM II/A-LL 42,5 N ER2				
2	Hersteller E - Standardbeton	Selbstdeklaration C30/37 16 CEM II/A-LL 42,5 N ES2				
3	Hersteller E - Standardbeton	Selbstdeklaration C35/45 16 CEM II/A-LL 42,5 N ES3				
4	Hersteller E - Standardbeton	Selbstdeklaration C35/45 16 CEM II/A-LL 42,5 N ES3				
BETON-STAHL	8565038f-5c21-48d7-94cb-958498ba9dd3	Bewehrungsstahl [1kg] (2022/2024)				

Pos.	Herstellung A1-A3		Entsorgung C3 C4		Summenprodukt
	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Summen	3.607.844		153.990		3.761.835
1	193,93		12,80		1.606.868
2	187,64		13,10		782.728
3	202,99		13,20		43.022
4	202,99		13,20		12.971
BETON-STAHL	0,62		-		1.316.245

Anhang 4.5: Interviewprotokoll – Gespräch mit der Bauleitung des DonauTowers

Interviewprotokoll

Termin: 13.12.23, 10:00 bis 11:30

Ort: Besprechungsraum / Baustelle DonauTower in Ingolstadt

Teilnehmende: [REDACTED] (Bauleitung DonauTower, Interviewter), Chiara Hauschulz

Anhang: Einwilligungserklärung zur Erhebung und Verarbeitung personenbezogener Interviewdaten

Thema: Erfahrungen mit CO2-reduziertem Beton während der Bauausführung des DonauTowers

1. Erfahrungen hinsichtlich der/des

- **Verarbeitbarkeit**

Keine relevanten Unterschiede zu herkömmlichen Betonsorten, solange die Umgebungstemperatur mehr als 5 Grad beträgt ✓

- **Ausschallfrist**

Es wurde immer fristgerecht ausgeschalt. Teilweise wurde deshalb präventiv auf den Einsatz von CO2-reduzierten Sorten verzichtet. ✓

- **Sichtbetonqualität**

SB3 wurde für die Stützen und Treppenkerne gefordert. Betonkosmetik nötig, aber im üblichen Bereich und vor allem an den Fassadenstützen, die jedoch mit Standardbeton erstellt wurden. ✓

Es ist keine Tendenz einer schlechteren Sichtbetonqualität aufgrund der CO2-reduzierten Sorten erkennbar. ✓

Bisher wurde mehr an Bauteilen aus Standardbeton nachgebessert. (ausgenommen Treppenhauskerne) → Kosmetisierung folgt nach ✓

Farbliche Unterschiede aufgrund unterschiedlicher Rezepturen entstehen auch bei Standardprodukten verschiedener Festigkeitsklassen. Bei den CO2-reduzierten Betonen sind die farblichen Unterschiede vergleichbar und gering. ✓

- **Mehraufwand (Stunden, Material) für die Nachbehandlung**

Der Beton wurde wie üblich nachbehandelt. ✓

- **WU-Bauteile**

WU-Bauteile wurden aus CO2-reduziertem Beton erstellt. Aufgrund von drückendem Wasser wurden Fugenbänder und Frischbetonverbundfolie verwendet. Das ist eine übliche Vorgehensweise, jedoch wird auf Frischbetonverbundfolie manchmal verzichtet. ✓

→ FBV nur verwendet in Bereichen des Wassertanks und weiterer prioritärer Räumlichkeiten (Archiv)

2. Bisheriger Beotneinsatz (Mengen, Sorten, Bauteile)

Die bisher verbauten Betonmengen je Sorte können dem Betoniertagebuch entnommen werden. ✓

Einsatz von CO2-reduziertem Beton in den meisten Decken und Wänden ab 1.UG ✓

Obergeschoße: Skelettbauweise (Decken vorwiegend CO2-red., Stützen vorwiegend Standardbeton) ✓

3. Mehrkosten des CO2-reduzierten Betons

Dazu können der zuständige Betontechnologe und Ansprechpartner bei Transportbetonlieferanten ggf. eine Aussage treffen. ✓

4. Aus welchen Gründen wurde davon abgewichen wie geplant CO2-reduzierten Beton zu verwenden?

Niedrige Temperaturen (seit Mitte Oktober vor allem Standardbeton verbaut) ✓

Auf die Verwendung von CO2-reduziertem Beton in Stützen wurde größtenteils verzichtet. ✓
Gründe: geringe Entwicklung von Hydratationswärme (besonders bei niedrigen Außenlufttemperaturen kritisch), langsame Festigkeitsentwicklung -> negative Auswirkungen auf Bauablauf möglich, eine schlechte Erfahrung mit der Betonage einer Stütze aufgrund des höheren Prüfalalters von 56 Tagen ✓

5. Einfluss auf Schalungsmenge und Bauzeit

Sehr viele Faktoren, z.B. Behinderungen wie Lieferschwierigkeiten von Rohren für die Haustechnik in der Bodenplatte (und Verzögerungen bei der Vergabe des Rohrleitungsbaus) beeinflussen die Bauzeit. Selbes gilt für die Schalungsmenge. Es wurde wie üblich und gem. Angabe des Tragwerkplaners durchgesteift.

Es kam zu keiner direkten Verzögerung des Bauablaufs, weil Bauteile noch nicht ausgeschalt werden konnten.

Grund dafür ist wahrscheinlich auch die Ausführung in 4 Takten (im Turm voraussichtlich 2 Takte). ✓

6. Hauptbesonderheiten

Betonage bei Kälte, Bauzeit hat sich in die Wintermonate verschoben (geringere Hydratationswärme und langsamere Festigkeitsentwicklung kritischer) ✓

Reaktion auf Zusatzstoffänderung/geringeren Anteil an Flugasche: Zwischenzeitlich gab es Lieferschwierigkeiten der Flugasche. Deswegen wurden Betonrezepturen geändert und Flugasche aus anderer Herkunft eingesetzt. Kurzfristig wurden Betone mit schlechterer Qualität geliefert. Die Probleme wurden behoben. ✓

7. Allgemeines zur Baustelle:

Die Baustelle wendet Lean-Methoden an.

Aufgrund der 4 Takte lassen sich Kapazitäten gut harmonisieren.

Deckentische wurden frühestens nach ca. 5 Tagen versetzt.

In Einzelfällen musste Beton zurückgeschickt werden. Das gilt für die verwendeten Standardsorten und CO2-reduzierten Sorten gleichermaßen. ✓

Gesamte Betonstahlmenge: 2139 t

bisher gelieferte Betonstahlmenge: 1705 t ✓

Unterschrift der Teilnehmenden:

15.12.23. *C. Hauschulz*

Chiara Hauschulz, Protokollantin

15.01.2024

Interviewer

Anhang 5: Projektvergleich hinsichtlich des Treibhauspotentials des Tragwerks

Im Folgenden sind je Projekt drei Tabellen dargestellt:

1. GWP nach Baustoff
2. Kennwerte
3. THG-Bilanz (mehrteilig)

Projekt W1

Kategorie	GWP	ME
Beton	211280,1	kg CO ₂ eq
Betonstahl	127920,1	kg CO ₂ eq
Baustahl	6900,6	kg CO ₂ eq
Sonstiges	98318,7	kg CO ₂ eq

Kennwert	GWP	ME
GWP/BRI	48,7	kg CO ₂ eq/m ³
GWP/BGF	186,0	kg CO ₂ eq/m ²
GWP/a	8888,4	kg CO ₂ eq/a

Projektdaten		Umrechnung/Zuordnung				
Pos.	Baustoff	Menge* ME	Faktor	Kategorie	Menge*Faktor	UUID / EPD
Summenprodukt						
1	Baustahl	2,40 t	1.000,00	Baustahl	2.400,00	8b1ac41c-10ab-453f-a761-edf1a603aea6
2	Betonstahl	207,88 t	1.000,00	Betonstahl	207.880,00	8565038f-5c21-48d7-94cb-958498ba9dd3
3	Beton C20/25	813,78 m ³	1,00	Beton	813,78	EPD-IZB-20230420-IBA1-DE
4	Aufbeton und Füllbeton C20/25	490,02 m ³	1,00	Beton	490,02	EPD-IZB-20230420-IBA1-DE
5	Elementdecken (Halbfertigteile)	1.754,28 m ²	0,40	Sonstiges	701,71	6575f9dd-8a50-440c-90df-30608167c739
6	Elementwände (Hohlwände)	917,18 m ²	1,00	Sonstiges	917,18	4ee14334-d724-44ec-a819-92b35500453b

Pos.	Daten aus Datenbank			Herstellung			Entsorgung			Summenprodukt	
	Baustoff [Bezugsmenge] (Referenzjahr/Gültigkeit)	A1-A3			C3			C4			
		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
Summenprodukt											
1	Stahlprofil verzinkt (Hochofenroute, geringer Schrottanteil) [1kg] (2022/2024)	433,406	2,88	-	-	-	11,014	-	-	6,901	
2	Bewehrungsstahl [1kg] (2022/2024)	0,62	-	-	-	-	-	-	-	127,920	
3	C20/25 [1m ³] (2021/2028)	157,00	5,05	-	-	-	-	-	-	131,872	
4	C20/25 [1m ³] (2021/2028)	157,00	5,05	-	-	-	-	-	-	79,408	
5	Betonfertigteile Decke, Dicke 20cm [1m ²] (2022/2024)	85,83	3,55	-	-	-	-	-	-	62,720	
6	Betonfertigteile Wand, Dicke 12cm [1m ²] (2022/2024)	36,70	2,12	-	-	-	-	-	-	35,599	

Projekt W/B1

Kennwert	GWP	ME
GWP/BRI	52,9	kg CO2eq/m³
GWP/BGF	186,7	kg CO2eq/m²
GWP/a	75797,3	kg CO2eq/a

Kategorie	GWP	ME
Beton	2700424,7	kg CO2eq
Betonstahl	948253,4	kg CO2eq
Baustahl	59842,8	kg CO2eq
Holz	81344,8	kg CO2eq

Projektdaten				Umrechnung/Zuordnung			
Pos.	Baustoff	Menge*	ME	Faktor	Kategorie	Menge*Faktor	UUID / EPD
Summenprodukt							
1	Baustahlmatten	548.575,00	kg		Betonstahl	548.575,00	8565038f-5c21-48d7-94cb-958498ba9dd3
2	Stabstahl, Bewehrung	992.410,00	kg		Betonstahl	992.410,00	8565038f-5c21-48d7-94cb-958498ba9dd3
3	Beton C12/15	72,63	m3		Beton	72,63	EPD-IZB-20230418-IBA1-DE
4	Beton C20/25	367,29	m3		Beton	367,29	EPD-IZB-20230420-IBA1-DE
5	Beton C30/37	5.273,80	m3		Beton	5.273,80	EPD-IZB-20230328-IBG1-DE
6	Beton C35/45	6.980,10	m3		Beton	6.980,10	EPD-IZB-20230422-IBA1-DE
7	Bauschnittholz	72,00	m3		Holz	72,00	98fe03e2-385d-4b49-924c-624165c724b0
8	Brettschichtholz	7,00	m3		Holz	7,00	78bfe151-3cf3-46cb-a1a5-61a79bbd5476
9	Massivholz	83,10	m3		Holz	83,10	7aba3603-0689-4da5-8d24-fd92ae398d07
10	Unterzüge	282,50	m3		Holz	282,50	78bfe151-3cf3-46cb-a1a5-61a79bbd5476
11	Randunterzüge	44,50	m3		Holz	44,50	78bfe151-3cf3-46cb-a1a5-61a79bbd5476
12	Deckenschalung OSB	2.413,00	m2	0,02	Holz	48,26	aab0ed28-e5b0-43d6-a932-4cdc4770c518
13	Offenes Walzprofil	5,12	to	1.000,00	Baustahl	5.120,00	8b1ac41c-10ab-453f-a761-edf1a603aea6
14		11,78	to	1.000,00	Baustahl	11.783,00	8b1ac41c-10ab-453f-a761-edf1a603aea6
15		3,91	to	1.000,00	Baustahl	3.910,00	8b1ac41c-10ab-453f-a761-edf1a603aea6

Daten aus Datenbank		Herstellung		Entsorgung		Summenprodukt	
Pos.	Baustoff [Bezugsmenge] (Referenzjahr/Gültigkeit)*	A1-A3	C3	C4			
Summenprodukt		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3.789.866
1	Bewehrungsstahl [1kg] (2022/2024)	<input checked="" type="checkbox"/>	0,62	<input type="checkbox"/>	-	<input type="checkbox"/>	337.569
2	Bewehrungsstahl [1kg] (2022/2024)	<input checked="" type="checkbox"/>	0,62	<input type="checkbox"/>	-	<input type="checkbox"/>	610.685
3	C12/15 [1m³] (2021/2028)	<input checked="" type="checkbox"/>	129,00	5,05	-	<input type="checkbox"/>	9.736
4	C20/25 [1m³] (2021/2028)	<input checked="" type="checkbox"/>	157,00	5,05	-	<input type="checkbox"/>	59.520
5	C30/37 [1m³] (2021/2028)	<input checked="" type="checkbox"/>	196,00	5,05	-	<input type="checkbox"/>	1.060.297
6	C35/45 [1m³] (2021/2028)	<input checked="" type="checkbox"/>	220,00	5,05	-	<input type="checkbox"/>	1.570.872
7	Nadelschnittholz - getrocknet (Durchschnitt DE) [1m³] (2021/2026)	<input checked="" type="checkbox"/>	-739,04	805,22	-	<input type="checkbox"/>	4.765
8	Brettschichtholz (Durchschnitt DE) [1m³] (2023/2028)	<input checked="" type="checkbox"/>	-668,18	825,63	-	<input type="checkbox"/>	1.102
9	Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE) [1m³] (2023/2028)	<input checked="" type="checkbox"/>	-726,98	815,98	-	<input type="checkbox"/>	7.396
10	Brettschichtholz (Durchschnitt DE) [1m³] (2023/2028)	<input checked="" type="checkbox"/>	-668,18	825,63	-	<input type="checkbox"/>	44.478
11	Brettschichtholz (Durchschnitt DE) [1m³] (2023/2028)	<input checked="" type="checkbox"/>	-668,18	825,63	-	<input type="checkbox"/>	7.006
12	Oriented Strand Board (Durchschnitt DE) [1m³] (2023/2028)	<input checked="" type="checkbox"/>	-639,29	983,20	-	<input type="checkbox"/>	16.597
13	Stahlprofil verzinkt (Hochofenroute, geringer Schrottanteil) [1kg] (2022/2024)	<input checked="" type="checkbox"/>	2,88	-	-	<input type="checkbox"/>	14.721
14	Stahlprofil verzinkt (Hochofenroute, geringer Schrottanteil) [1kg] (2022/2024)	<input checked="" type="checkbox"/>	2,88	-	-	<input type="checkbox"/>	33.879
15	Stahlprofil verzinkt (Hochofenroute, geringer Schrottanteil) [1kg] (2022/2024)	<input checked="" type="checkbox"/>	2,88	-	-	<input type="checkbox"/>	11.242

Projekt B1

Kategorie	GWP	ME
Beton	2621374,9	kg CO2eq
Betonstahl	1316245,1	kg CO2eq

Kennwert	GWP	ME
GWP/BRI	46,1	kg CO2eq/m³
GWP/BGF	195,3	kg CO2eq/m²
GWP/a	78752,4	kg CO2eq/a

Projektdaten				Umrechnung/Zuordnung		
Pos.	Baustoff	Menge*	ME	Faktor	Kategorie	Menge*Faktor
Summenprodukt						
1	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F3 (m-l)	840	m3	1,00	Beton	840,00
2	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F3 (m-l)	750	m3	1,00	Beton	750,00
3	C30/37 XC2 WF F4 WU (l)	870	m3	1,00	Beton	870,00
4	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F3 (s)	1113	m3	1,00	Beton	1.113,00
5	C30/37 XC1-3, XD1, XF1 WF F3 (s)	813	m3	1,00	Beton	813,00
6	C30/37 XC3, XD1, XF1, XA1 WA F4 (s) WU	40	m3	1,00	Beton	40,00
7	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1, XM1 WA F4 (s)	1944	m3	1,00	Beton	1.944,00
8	C30/37 XC4, XD1, XF1, XA1 WA F4 (m-l)	3271	m3	1,00	Beton	3.271,00
9	C30/37 XC2 WF F4 (l)	2031	m3	1,00	Beton	2.031,00
10	C35/45 XC4, XD2, XF3 XF2, XA1 WA F4 (m-l)	199	m3	1,00	Beton	199,00
11	C35/45 XC1-3, XF1, WO, F4 (m-l)	60	m3	1,00	Beton	60,00
12	Betonstahl	2.139,00	to	1.000,00	Betonstahl	2.139.000,00

Pos.	UUID / Sortennummer	Baustoff [Bezugsmenge] {Referenzjahr/Gültigkeit}*	Herstellung		Entsorgung			Summen- produkt
			A1-A3		C3	C4		
Summenprodukt			3.866.034		71.586			3.937.620
1	13241	projektspezifisch [CEM III/A 42,5 N]	179,00		6			155.400
2	13341	projektspezifisch [CEM III/A 42,5 N]	169,90		6			131.925
3	14240	projektspezifisch [CEM III/A 42,5 N]	175,60		6			157.992
4	13234	projektspezifisch [CEM II/A-LL 42,5 R]	283,30		6			321.991
5	13334	projektspezifisch [k.A.]	275,20		6			228.616
6	14134	projektspezifisch [k.A.]	310,50		6			12.660
7	14234	projektspezifisch [CEM II/A-LL 42,5 R]	300,40		6			595.642
8	14241	projektspezifisch [CEM III/A 42,5 N]	180,00		6			608.406
9	14340	projektspezifisch [CEM III/A 42,5 N]	166,40		6			350.144
10	24240	projektspezifisch [CEM III/A 42,5 N]	190,60		6			39.123
11	24234	projektspezifisch [k.A.]	318,60		6			19.476
12	8565038f-5c21-48d7-94cb-958498ba9dd3	Bewehrungsstahl [1kg] (2022/2024)	0,62		-			1.316.245

Projekt B2

Kategorie	GWP	ME
Beton	7388449,7	kg CO ₂ eq
Betonstahl	3870677,5	kg CO ₂ eq

Kennwert	GWP	ME
GWP/BRI		kg CO ₂ eq/m ³
GWP/BGF	177,0	kg CO ₂ eq/m ²
GWP/a	225182,5	kg CO ₂ eq/a

Projektdaten				Umrechnung/Zuordnung		
Pos.	Baustoff	Menge*	ME	Faktor	Kategorie	Menge*Faktor
Summenprodukt						
1	C 08/10, F3, 0/32 X0	364,00	m3	1,00	Beton	364,00
2	C 12/15, F3, 0/32, X0, WF	897,94	m3	1,00	Beton	897,94
3	C 20/25, F3, 0/32 XC3	150,09	m3	1,00	Beton	150,09
4	C 30/37, XC3, XD1 WU, WF	921,68	m3	1,00	Beton	921,68
5	C 30/37, XC1, WO	13.324,52	m3	1,00	Beton	13.324,52
6	C 30/37, XC3, WO	613,28	m3	1,00	Beton	613,28
7	C 30/37, XC3, WU, WF	549,54	m3	1,00	Beton	549,54
8	C 30/37, XC1, WO	4.688,12	m3	1,00	Beton	4.688,12
9	C 35/45, F3, 0/32, XC3, WU, WF	8.117,27	m3	1,00	Beton	8.117,27
10	C 35/45, F3, 0/32, XC3, XD1, XF2, WA	3.881,42	m3	1,00	Beton	3.881,42
11	C 35/45, F3, 0/32, XC3, XD3, XF2, WA	67,04	m3	1,00	Beton	67,04
12	C 35/45, F3, 0/32, XC1, XD1, WO	26,22	m3	1,00	Beton	26,22
13	C 35/45, F3, 0/32, XC3, XD1, XF2 WU	1.362,35	m3	1,00	Beton	1.362,35
14	C40/50, F3, 0/32, XC1, WO	128,78	m3	1,00	Beton	128,78
15	C 45/55, F3, 0/32, XC3, XD1, XF2, WA	165,57	m3	1,00	Beton	165,57
16	C 50/60, F3, 0/32, XC3, XD1, XF2, WA	111,36	m3	1,00	Beton	111,36
19	FT- Betonstahl B500 A+B in Elementwänden	10,00	to	1.000,00	Betonstahl	10.000,00
20	FT- Elementwände C35/45, d = 2 x 5 cm	609,00	m2	0,83	Beton	507,50
21	BST 500S D*, Grundpreis	6.280,15	to	1.000,00	Betonstahl	6.280.150,00
22	Verbundträger	14,10	m		Baustahl	14,10
23	Verbundträger	8,90	m		Baustahl	8,90
24	Verbundträger	16,20	m		Baustahl	16,20

Pos	UUID / EPD	Baustoff [Bezugsmenge] (Referenzjahr/Gültigkeit)	Herstellung		Entsorgung		Summen- produkt
			A1-A3 <input checked="" type="checkbox"/> WA <input checked="" type="checkbox"/> Hk	<input type="checkbox"/> WA <input type="checkbox"/> Hk	C3 <input checked="" type="checkbox"/> WA <input checked="" type="checkbox"/> Hk	C4 <input type="checkbox"/> WA <input type="checkbox"/> Hk	
Summenprodukt			11.079,439	179,688	-	11.259,127	
1	EPD-IZB-20230417-IBA1-DE	C8/10 [1m³] (2021/2028)	112,00	5,05	-	42.606	
2	EPD-IZB-20230418-IBA1-DE	C12/15 [1m³] (2021/2028)	129,00	5,05	-	120.368	
3	EPD-IZB-20230420-IBA1-DE	C20/25 [1m³] (2021/2028)	157,00	5,05	-	24.323	
4	EPD-IZB-20230328-IBG1-DE	C30/37 [1m³] (2021/2028)	196,00	5,05	-	185.303	
5	EPD-IZB-20230328-IBG1-DE	C30/37 [1m³] (2021/2028)	196,00	5,05	-	2.678.895	
6	EPD-IZB-20230328-IBG1-DE	C30/37 [1m³] (2021/2028)	196,00	5,05	-	123.301	
7	EPD-IZB-20230328-IBG1-DE	C30/37 [1m³] (2021/2028)	196,00	5,05	-	110.486	
8	EPD-IZB-20230328-IBG1-DE	C30/37 [1m³] (2021/2028)	196,00	5,05	-	942.547	
9	EPD-IZB-20230422-IBA1-DE	C35/45 [1m³] (2021/2028)	220,00	5,05	-	1.826.792	
10	EPD-IZB-20230422-IBA1-DE	C35/45 [1m³] (2021/2028)	220,00	5,05	-	873.514	
11	EPD-IZB-20230422-IBA1-DE	C35/45 [1m³] (2021/2028)	220,00	5,05	-	15.088	
12	EPD-IZB-20230422-IBA1-DE	C35/45 [1m³] (2021/2028)	220,00	5,05	-	5.900	
13	EPD-IZB-20230422-IBA1-DE	C35/45 [1m³] (2021/2028)	220,00	5,05	-	306.597	
14	EPD-IZB-20230423-IBA1-DE	C45/55 [1m³] (2021/2028)	273,00	5,05	-	35.807	
15	EPD-IZB-20230423-IBA1-DE	C45/55 [1m³] (2021/2028)	273,00	5,05	-	46.038	
16	EPD-IZB-20230424-IBA1-DE	C50/60 [1m³] (2021/2028)	275,00	5,05	-	31.187	
19	8565038f-5c21-48d7-94cb-958498ba9dd3	Bewehrungsstahl [1kg] (2022/2024)	0,62	-	-	6.154	
20	4ee14334-d724-44ec-a819-92b35500453b	Betonfertigteile Wand, Dicke 12cm [1m²] (2022/2024)	36,70	2,12	-	19.698	
21	8565038f-5c21-48d7-94cb-958498ba9dd3	Bewehrungsstahl [1kg] (2022/2024)	0,62	-	-	3.864.524	
22	wg. Geringer Menge nicht berücksichtigt					0	
23	wg. Geringer Menge nicht berücksichtigt					0	
24	wg. Geringer Menge nicht berücksichtigt					0	

Projekt S1

Kategorie	GWP	ME
Beton	379083,8 kg CO2eq	
Betonstahl	230883,2 kg CO2eq	

Kennwert	GWP	ME
GWP/BRI	78,9 kg CO2eq/m³	
GWP/BGF	411,9 kg CO2eq/m²	
GWP/a	12199,3 kg CO2eq/a	

Projektdaten				Umrechnung/Zuordnung			
Pos.	Baustoff	Menge*	ME	Faktor	Kategorie	Menge*Faktor	UUID / EPD
Summenprodukt							
1	Betonstahl	375,20	to	1.000,00	Betonstahl	375.203,00	8565038f-5c21-48d7-94cb-958498ba9dd3
2	Transportbeton C08/10	65,58	m3		Beton	65,58	EPD-IZB-20230417-IBA1-DE
3	Transportbeton C35/45	1.650,33	m3		Beton	1.650,33	EPD-IZB-20230422-IBA1-DE

Baustoff [Bezugsmenge] (Referenzjahr/Gültigkeit)	Herstellung		Entsorgung		Summen- produkt
	A1-A3 <input checked="" type="checkbox"/> WA <input checked="" type="checkbox"/> Hk	<input type="checkbox"/> WA <input type="checkbox"/> Hk	C3 <input checked="" type="checkbox"/> WA <input checked="" type="checkbox"/> Hk	C4 <input type="checkbox"/> WA <input type="checkbox"/> Hk	
Bewehrungsstahl [1kg] (2022/2024)	601,302	8,665	-	-	609,967
C8/10 [1m³] (2021/2028)	112,00	5,05	-	-	7.677
C35/45 [1m³] (2021/2028)	220,00	5,05	-	-	371.407