

Optimierung der CO₂-Bilanz im Zuge der Herstellung von Betonbauwerken des konstruktiven Ingenieurbaus

Marc-Patrick Pfleger¹, Michaela Kopp¹ und Markus Vill¹

¹ FH Campus Wien, Kompetenzzentrum Bauen und Gestalten, Favoritenstraße 226, A-1100 Wien, Österreich

Abstract. Aufgrund der nachgewiesenen klimaschädlichen Wirkung von CO₂ ist eine Emissionsreduktion grundsätzlich anzustreben. Da die Nachfrage des Baustoffs Beton einer stetigen Zunahme unterworfen ist, steigt auch die Problematik des freigesetzten Kohlenstoffdioxids bei der Produktion des Portlandzementklinkers, wodurch ein dringender Handlungsbedarf bei der Entwicklung von neuen Betonrezepturen aufgezeigt wird.

Die unzureichenden Alternativen zu dem mineralischen Konstruktionsmaterial Beton, welcher auch überwiegend im Infrastrukturbau vorzufinden ist, begründen eine weiterführende materialtechnische Analyse.

Das gegenständliche Forschungsprojekt zeigt Möglichkeiten im Bereich der Betontechnologie auf, unter zugrundeliegender Lebenszyklusbetrachtung und der Einarbeitung neuer Forschungsfelder, den konstruktiven Betonbau aus Sicht der Umweltverträglichkeit zu verbessern.

Keywords: CO₂-Bilanz, Optimierung, Karbonatisierung, rezyklierte Gesteinskörnung, Smart City, Treibhausgase, Lebenszyklus, Dauerhaftigkeit, Urban Mining, Portlandzementklinker, Down-Cycling, Drehrohrofen, Exposition, Flugasche.

1 Grundlagenhebung

Im Zuge der Strategie Wien für Forschung, Technologie und Entwicklung, welche unter dem Namen „Innovatives Wien“ geführt wird, liegen Varianten zur Senkung von Energieverbrauch und Emissionen vor [1]. Hierbei werden Ziele zur Hebung bzw. Erhaltung der Lebensqualität im Raum Wien verfolgt. Die angestellten Untersuchungen ergaben, dass die Senkung der CO₂-Emissionen und anderer Treibhausgase die priorisierten Ziele gemäß „Smart City Wien“ darstellen. Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, ist eine intakte, gut funktionierende und baulich moderne Infrastruktur für Ver- und Entsorgung, Energie und Transport Grundvoraussetzung. In weiterer Folge ist eine intakte Infrastruktur die Basis für eine effiziente Volkswirtschaft.

Gemäß aktuellem Stand der Technik sind Stahlbeton- und Spannbetonkonstruktionen im Bauwesen unumgänglich und setzen im Zuge der Herstellung von Baumaterialien sowie in der Errichtungsphase hohe CO₂ Mengen frei [2], wobei das Hauptaugenmerk auf die Vielzahl der Einsatzmöglichkeiten zu richten ist, sodass Ressourcen geschont, Emissionen reduziert und die Nutzungsdauer über den Lebenszyklus opti-

mal ausgeschöpft werden können, um schlussendlich dem Nachhaltigkeitsansprüchen für die Folgegenerationen gerecht werden zu können. [3]

Im hier dargestellten Projekt, werden vor allem zwei Aspekte als Haupteinflussgrößen der freigesetzten Kohlenstoffdioxidmenge über den Lebenszyklus eines Bauwerks behandelt.

2 Studie zur Optimierung der CO₂-Bilanz

In der derzeit laufenden Phase des Projekts werden Ansatzpunkte beleuchtet, welche den Baustoff Beton umweltverträglicher machen. Hierbei wird die CO₂-Bilanz von der Herstellung des Bindemittels bis zum Einbau und der Hydratation analysiert und Kriterien definiert, welche eine möglichst lange Nutzungsdauer der geschaffenen Objekte gewährleisten können.

2.1 Änderung der konventionellen Betonrezepturen

Alternative Betonrezepturen weisen beachtliche Reduzierungen der Emissionen bei der Herstellung der Baustoffe auf, jedoch ist eine Umsetzung aus baupraktischer Sicht derzeit nur eingeschränkt möglich. CO₂-neutrale Varianten verschiedener Betonrezepturen wurden international beispielsweise im Forschungsprojekt „CO₂-SUICOM“ behandelt [4].

Die Versuchsreihe von CO₂-SUICOM beinhaltete Probekörper, bei denen der Zementanteil des Betons quasi vollständig durch alternative Bindemittel ersetzt wurde, um beim Brennvorgang das Austreiben des CO₂ zu verhindern. Bei der Herstellung von Fertigteilen erfolgte die Hydratation in einer CO₂-Kammer, welche durch Abgase der Kraftwerksanlage gespeist wurde.

Problematisch sind die Versuchsergebnisse in Bezug auf die verringerte Festigkeit und Alkalität des so erzeugten Betons zu sehen. Eine zur Tragwirkung notwendige Bewehrung kann nicht korrosionsgeschützt in das Material eingebunden werden. Da sich die im Forschungsprojekt herangezogene Bauweise des Weiteren auf Fertigteile bezieht, ist eine Anwendung im Infrastrukturbau eher als gering einzustufen, da die meisten Infrastrukturbauwerke in Ortbeton hergestellt werden. Die Zugabe von Flugasche als alternatives Bindemittel ist als kritisch zu betrachten, da es sich hierbei um ein fossiles, rückläufiges Nebenprodukt des Verbrennungsvorganges handelt. Die Flugasche kann jedoch auch bei höherwertigen Betonen, aufgrund ihrer puzzolanschen Reaktivität eingesetzt werden, dies findet bereits Anwendung und wurde aufgrund der günstigen Beschaffung bereits vielfach herangezogen.

Bei den heutigen Einsatzmengen übersteigt die Nachfrage an Flugaschen das Angebot, wodurch ein Markt für die Produktion entstanden ist. Dies führt in Folge dazu, dass Flugaschen einerseits nicht als unbegrenzt verfügbarer Rohstoff anzusehen sind und andererseits dass der CO₂-Ausstoß, welcher durch die Erzeugung entstanden ist, im Zuge der CO₂-Bilanz berücksichtigt wird.

Ähnlich den Zielen des Projektes „ERESCON“ [5], wo über neu konzipierte Rezepturen für den bewehrten Ortbetoneinsatz geeignete Mischungen hergestellt wur-

den, ist eine Weiterentwicklung und Abwandlung von Bindemitteln in Betonen notwendig, um eine Reduzierung des CO₂-Äquivalents des Baustoffs zu erreichen. Dabei ist eine Steigerung des Bindemittelnutzungsgrades anzustreben, Portlandzementklinker durch Öko-Zusatzstoffe zu ersetzen und die Verarbeitbarkeit, Leistungsfähigkeit sowie Dauerhaftigkeit für die gesamte Bauwerkslebensdauer zu gewährleisten. [6] Nachfolgend werden Lösungswege zusammenfassend aufgezeigt.

Einmischung eines erhöhten Anteils an rezyklierten Körnungen. Die Untersuchungen haben ergeben, dass eine Effizienzsteigerung durch den Einsatz eines geeigneten Materialrecyclingstoffs erzielt werden kann. Darauf beziehend ist die Erstellung eines normenäquivalenten Leitfadens anzuraten. Das natürliche Material kann somit durch rezyklierte Gesteinskörnungen substituiert werden. Die Grenzwerte des Mischungsverhältnisses zur Betonherstellung werden in der ÖNORM B4710-1:2017 [7] definiert. Dabei lässt die aktuelle neue Normenfassung eine maximale Austauschrate von 50% der Gesteinskörnung durch reine Betonrezyklate der Qualitätsklasse RB-A1 zu. Etwaige negative Auswirkungen bei einer Überschreitung der Grenzwerte wurden jedoch noch nicht untersucht, dabei ist anzumerken, dass nach aktuellem Schweizer Normenstand Recyclingbeton erst ab einer Einbindung von mehr als 25%-M rezyklierter Gesteinskörnung Beton als solcher ausgewiesen werden darf. Bestehen die wiederverwendeten Zuschläge aus reinem Betongranulat, ist eine Bemessung des Recyclingbetons nach gängigen Regelungen zulässig. In Österreich hingegen müsste ein Beton bereits ab 5%-M an rezyklierten Gesteinskörnungen als Recyclingbeton behandelt werden, wodurch zusätzliche Anforderungen an das Material gestellt werden und die Bemessung nach gesonderten Bedingungen zu erfolgen hat [8] [9].

Durch die Gewinnung von Sekundärrohstoffen und ihrer Verwendung entsprechend ihrer Eigenschaften kann Down-Cycling vermieden werden. Das Down-Cycling bezeichnet das Heranziehen von qualitativ hochwertigen Materialien, welche im Recyclingprozess ein höheres Energieniveau bedürfen, für nur untergeordnete Einsatzzwecke, wie beispielsweise für Hinterfüllungen.

Karbonatisierung der rezyklierten Gesteinskörnungen. Im Zuge der Einbindung von erhöhten Mengen an rezyklierten Gesteinskörnungen bei der Betonerzeugung, soll ein zusätzlicher Aufbereitungsschritt des Recyclingmaterials untersucht und geprüft werden. Beim Abtrag von massigen Betonbauwerken ist der Großteil des verwendeten Betons im Inneren der Bauteile zum Zeitpunkt des Abbruchs noch nicht karbonatisiert. In der Regel lässt sich die Karbonatisierungstiefe zu diesem Zeitpunkt auf 3 – 5 cm beschränken. Deshalb kann eine CO₂-Beaufschlagung der aufgebrochenen rezyklierten Gesteinskörnung vor der Herstellung des Betons erfolgen.

Diese Herangehensweise wurde analog zu dem Vorgehen der CO₂ Lagerung der Betonfertigteile nach dem Vorgehen des CO₂-SUICOM-Projekts konzipiert. [4] So ist es in weiterer Folge möglich, die emittierten Gase eines Drehrohrofens zu nutzen, um einen entsprechenden Kohlenstoffdioxid-Reaktor zu versorgen. Dadurch ist einerseits eine positive Beeinflussung der CO₂-Bilanz bei der Herstellung des nötigen Klinkers möglich und andererseits kann eine Verbesserung der Eigenschaften der rezyklierten

Gesteinskörnung über die Festigkeitszunahme durch Bildung einer erhöhten Menge an CaCO_3 erzielt werden.

Die RC-Körnung kann also unter günstigen Bedingungen gezielt einer mit CO_2 angereicherten Atmosphäre exponiert werden, um eine langfristige Kohlenstoffdioxid Speicherwirkung im Granulat zu erzielen.

Beispiel einer möglichen Betonzusammensetzung für 1 m^3 einbaufertiges Material ohne dargestellte Zusatzstoffe:

- Bindemittel:	300 kg	$\rho = 3000 \text{ kg/m}^3$
- Gesteinskörnungen:	1900 kg	$\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$
davon: rezykliertes Granulat:	950 kg	$\rho = 2350 \text{ kg/m}^3$
natürliches Material:	950 kg	$\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$
- Anmachwasser:	150 kg	$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

Es wird von einem 50 prozentigem Zusatz von rezyklierten Gesteinskörnungen ausgegangen, dabei muss jedoch zusätzlich berücksichtigt werden, dass die ehemals der Umgebung exponierte Betonschicht bereits in karbonatisierter Form vorliegt. Geht man von einem durchschnittlichen Karbonatisierungsgrad von 10 Prozent der Masse aus, so erhält man 45% des gesamten Zuschlags als noch reaktives Material.

Folglich ergeben sich rund 855 kg reaktionsfähiges Recyclingmaterial je Kubikmeter Frischbeton. Gemäß den Versuchsergebnissen aus der Forschungsarbeit „Weiterentwicklung der Karbonatisierung von rezyklierten Zuschlägen aus Altbeton“ [10] kann der gewonnene Zementstein, unter Voraussetzung von optimalen Bedingungen wie sie in einem entsprechenden Reaktor hergestellt werden können, 10% seiner Masse an CO_2 aus der Umgebung aufnehmen. Nach obiger Zusammensetzung wären 102,5 kg Zementstein im rezyklierten Granulat zur Bewitterung im Reaktor anzurechnen. Daraus erhält man ca. 10,25 kg CO_2 , gebunden in den aufbereiteten Zuschlägen, pro Kubikmeter Frischbeton, zusätzlich zu den zahlreichen weiteren Vorteilen des Recyclings im Sinne des Klimaschutzes.

Unter ausschließlicher Berücksichtigung der Emissionen während der Bindemittelherstellung kann, bei zeitgemäßer Produktion, von einem CO_2 -Ausstoß von 115 kg/m^3 Beton ausgegangen werden. Stellt man das Speicherpotential der aufbereiteten Gesteinskörnung demgegenüber, so erhält man eine rund 9 prozentige Reduktion der Treibhausgasemissionen. Die Wirksamkeit und die Funktionalität der Karbonatisierung von rezyklierten Gesteinskörnungen wird in einer Versuchsreihe im Rahmen dieses Forschungsprojektes untersucht.

Wesentliche Einflussgrößen auf die Karbonatisierung. Aus einschlägiger Literatur lassen sich verschiedene Parameter festmachen die jeweils mit unterschiedlicher Wirksamkeit die Reaktionsgeschwindigkeit der Karbonatisierung im Beton beeinflussen können. [11] [12] Naheliegender ist, dass der Kohlenstoffdioxidgehalt der umgebenden Atmosphäre maßgebende Auswirkungen auf die Umwandlung von Calciumhydroxid zu Calciumcarbonat hat.

Besonders berücksichtigt muss dabei die Tatsache werden, dass Abgase aus Verbrennungs- bzw. thermischen Behandlungsanlagen als quasi unveränderlich in ihrer

Zusammensetzung anzunehmen sind. Gleichzeitig muss allerdings davon ausgegangen werden, dass eine gewisse Schwankungsbreite der einzelnen Abgasbestandteile vorliegt. Durch die laufenden prozesstechnischen Optimierungsvorgänge bei der Klinkerherstellung ist des Weiteren davon auszugehen, dass die gegebenen Kenngrößen als quasi nicht veränderbar anzusehen sind. Ein zusätzlicher Prozessschritt müsste sich also mit den gegebenen Parametern durchführen lassen. Ein Vergleich der Idealwerte, die eine optimale Karbonatisierung des Materials zur Folge hätten, mit realitätsnahen Kenngrößen ist daher unabdingbar.

Zusätzlich geht aus Prüfungen hervor, dass die relative Luftfeuchtigkeit eine wichtige Rolle beim Prozess der Umwandlung von Calciumhydroxid zu Calciumcarbonat spielt. Wird ein Probekörper wassergesättigt, so kann quasi keine Diffusion von CO₂ mehr erfolgen, wodurch keine Karbonatisierung der Probe stattfindet. Liegt die Umgebungfeuchte jedoch unter einer relativen Luftfeuchtigkeit von unter 30 Prozent, so bildet sich kein ausreichender Wasserfilm in den Porenräumen des Zementsteins aus, um eine Reaktion ablaufen lassen zu können.

Als außerdem nicht zu vernachlässigendes Kriterium bezogen auf die Karbonatisierungsgeschwindigkeit stellt sich die Zeit und Güte der Nachbehandlung der Betonoberfläche dar. Im Fall von rezyklierten Granulaten macht der Anteil an nachbehandelter Oberfläche jedoch nur einen kleinen Bruchteil des Gesamtvolumens aus, wobei dieser Teil ohnehin schon weitestgehend als karbonatisiert angesehen werden kann. Das nicht-karbonatisierte Innere eines Betonbauteils ist in der Regel durch die Betondeckung, außerhalb der ersten Bewehrungslage, günstigen Bedingungen ausgesetzt, wodurch die natürliche Karbonatisierungsgeschwindigkeit zusätzlich mit der Tiefe abnimmt.

Aufbau der Versuchsanlage. Abgeleitet aus der Ermittlung der wesentlich einflussnehmenden Parameter auf die Reaktionsgeschwindigkeit wurde die Versuchsanlage konzipiert. Prinzipiell gilt es eine möglichst realitätsnahe Nachahmung der Umgebungsatmosphäre im direkten Abgasstrom eines Drehrohrofens, wie er in einem Zementwerk zur Klinkerproduktion eingesetzt wird, herzustellen. Eine gewisse Flexibilität bei der Kalibrierung der Parameter soll jedenfalls gegeben sein, um einen Vergleich zwischen den Ergebnissen bei freier Wahl der Einflussgrößen und den Ergebnissen durch praxisnahe Umgebung anstellen zu können. Dadurch können die in der Theorie optimalen Reaktionsbedingungen dargestellt werden und in weiterer Folge wären dadurch Untersuchungen möglich, ob eine Optimierung des Abgasstroms möglich ist.

Die Anlage setzt sich im Wesentlichen aus einer gasdicht verschließbaren Reaktionskammer zusammen. In dieser können, über verschiedene Zu- und Abfuhrmöglichkeiten, die gewünschten Umgebungsbedingungen zur Beprobung des Materials erzeugt werden. Als grundlegend ist die automatische Nachführung von CO₂ über ein gesteuertes Magnetventil anzusehen. So ist es möglich, bei ständiger Umwandlung von CO₂ durch die rezyklierte Gesteinskörnung, einen konstanten Kohlenstoffdioxidgehalt der Versuchsatmosphäre zu gewährleisten. Zusätzlich wird eine ständige Gaszirkulation im Inneren der Probekammer gegeben sein, um gleichmäßig verteilte Versuchsbedingungen zu ermöglichen.

Die Konzeption der Reaktionskammer erfolgt so, dass genügend Recyclingmaterial in einem Versuchsdurchlauf karbonatisiert werden kann, um in weiterer Folge Norm-Prüfwürfel für weitere Versuche Herstellen zu können.

Geplante Durchführung der Versuche. Es sollen unterschiedliche Kornfraktionen, die aus reinem Betonabbruch durch eine gängige Brecheranlage gewonnen wurden, beprobt werden. Dabei können sowohl die einzelnen Fraktionen in getrennten Arbeitsschritten, sowie ein repräsentatives Gemisch der verschiedenen Korngrößen gemeinsam in der Versuchsanlage behandelt werden. Dieses Gemisch soll derart beschaffen sein, dass es der Kornverteilung entspricht die als Produkt einer gängigen Brecheranlage verlässt.

Es gilt nicht nur festzumachen bei welchen Bedingungen eine Karbonatisierung am schnellsten abläuft, viel mehr auch, ob eine zu lange Lagerung in einer CO₂-reichen Atmosphäre zu einer Schädigung an der rezyklierten Gesteinskörnung führen kann. Zu erwarten wäre eine wesentlich verkürzte Zeit bis zur vollständigen Karbonatisierung bei verhältnismäßig kleineren Gesteinskörnungen, jedoch kann gleichzeitig davon ausgegangen werden, dass der Zementanteil, bedingt durch die Vorgänge während der Materialzerkleinerung, in den kleineren Kornfraktionen prozentuell gesehen größer ist.

Über die Versuche an den getrennten Kornfraktionen kann, bei gleichzeitiger Messung der Gewichtszunahme, eine Ableitung des Zementgehalts der einzelnen Korngrößen erfolgen.

Ziel der Materialprüfung. Nach der vollständigen Karbonatisierung des Probenmaterials sollen Materialprüfungen an eben diesen Versuchsstücken durchgeführt werden. Diese Prüfungen können etwaige unmittelbar auftretende Schädigungen auf die Proben untersuchen. Beispielsweise finden sich in der Literatur Ansätze wonach bei übermäßiger CO₂-Exposition des Betons eine Übersäuerung des Porenwassers stattfinden kann. [8] Dies drückt sich deutlich durch einen erniedrigten pH-Wert aus. Es soll des Weiteren erfasst werden inwiefern ein pH-Wert der Gesteinskörnung im deutlich sauren Bereich den Einfluss auf den Frischbeton, die Hydratation und die spätere Beständigkeit desselben haben kann.

Strategien zur Senkung flächenbezogener Ressourcen. Die Verwendung von rezykliertem Gesteinsmaterial ergibt eine folglich geringere Nutzung von Primärmaterialien, das heißt dass anhand vollzogenem Urban Mining weniger Flächenbedarf für beispielsweise Kiesgruben erforderlich wird. Dies ergibt schlussendlich günstigere Parameter in der CO₂-Bilanz. Ein weiterer Vorteil von Urban Mining besteht in der Reduktion von Transportwegen, da die Rohstoffgewinnung bzw. Aufbereitung an die Herstellung gekoppelt erfolgen kann.

Nicht nur die notwendige Energie zur Erschließung und der Gewinnung von Rohstoffen kann dadurch erheblich reduziert werden, viel mehr bleibt Grünland in seiner natürlicher Form erhalten und kann seine positiven Wirkungen auf die Umwelt entfalten.

Praxisbeispiel. Aus den vorangegangenen Einschätzungen des CO₂ Speichervermögens des rezyklierten Betongranulats, bezogen auf einen Kubikmeter einbaufertigen Beton nach obig angeführter Zusammensetzung, soll unter gleichen Voraussetzungen das Einsparpotential anhand einer Stützkonstruktion aufgezeigt werden, die beispielsweise die Kubatur einer angrenzenden kleinen Brücke (4 Stützmauern notwendig a 10 m) darstellen soll.

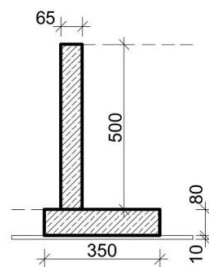


Fig. 1. Abmessungen des Stützbauwerks zur Ermittlung der freigesetzten CO₂ Menge

Die Querschnittsfläche der Winkelstützmauer ergibt sich, laut Fig. 1, zu 6,05 m², zusätzlich erhält man für die nötige Sauberkeitsschicht 0,35 m². Bezogen auf die gesamten 40 Laufmeter der nötigen Stützung erhält man eine erforderliche Kubatur von 242 m³ Konstruktionsbeton und 14 m³ Magerbeton für die Sauberkeitsschicht.

Geht man nur von 50 -prozentiger Substitution der Gesteinskörnung für den Konstruktionsbeton und 100% Recyclinganteil im Magerbeton aus, so ergibt sich ein Einsparungsvermögen unter Verwendung von rezyklierten Granulaten von rund 2765 kg CO₂ – Emissionen. Bei der Ermittlung der gebundenen CO₂-Menge wurde sich auf, wie obig beschrieben, die bestehenden Versuchsergebnisse aus [10] bezogen. So ging man von rund 10,25% Massenzunahme durch Kohlenstoffdioxidaufnahme des Zementsteins der forciert karbonatisierten Gesteinskörnungen im Frischbeton aus. Genau dieser Vorteil spiegelt sich in der Darstellung Fig.2, gegenüber einem herkömmlich zusammengesetzten Beton, wider.

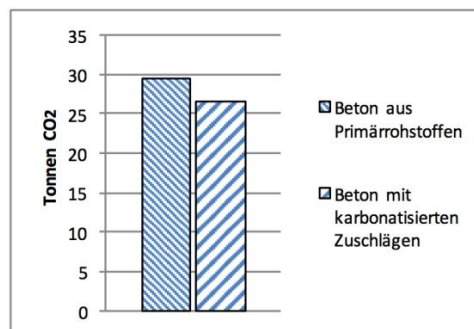


Fig. 2. Reduzierte Kohlenstoffdioxidemissionen durch den Einsatz von rezykliertem Betonzuschlag

2.2 Gesteuerte Verlängerung der Bauwerkslebensdauer

Im Zuge der Erarbeitung des Projekts werden die auf den Baustoff Beton einwirkende Umwelteinflüsse genauer betrachtet. Dies geschieht unter Berücksichtigung eines städtischen Umfelds, wobei versucht wird gezielte Betonexpositionen für die neuen Betonzusammensetzungen zu definieren. Folglich soll sich eine verbesserte Nutzungsdauer der konstruktiven Bauwerke mit der alternativen Zusammensetzung erzielt werden.

Durch die derzeit gültigen Eurocodes werden Vorgaben zur Lebensdauer von Bauwerken definiert. Gemäß Eurocodes sind in der Vorprojektphase alle einflussnehmenden Umweltbedingungen zu erfassen und auszuwerten, wobei auch künftige Umweltbelastungen auf die Bausubstanz unbedingt Beachtung finden müssen. Betrachtet man die tatsächliche Nutzungsdauer dieser Bauwerke, so stellt man massive Diskrepanzen zwischen Anforderung und Realität fest. An zahlreichen Beispielen von Brücken im Bestand wurde beobachtet, dass bereits 30 bis 50 Jahre nach der Errichtung umfangreiche Schäden an der Tragstruktur durch Umwelteinwirkungen auftraten.

Auch eine konventionelle Baustoffwahl kann unter Beachtung bekannt gewordener Schwachpunkte zu nachhaltigen Bauwerken führen. Zudem ist es anzuraten, ein bauwerksspezifisches Monitoring während der Planung und Ausführung durchzuführen.

3 Ausblick

Der Zuschlag von rezyklierten Gesteinskörnungen, welche zuvor einer Karbonatisierung unterzogen wurden, stellt über die Speicherung von Kohlenstoffdioxid eine Möglichkeit zur Reduktion der CO₂-Emission im Zuge der Zementherstellung dar. Laut der derzeit gültigen Normenfassung ist eine Beimengung von rezyklierten Anteilen der Gesteinskörnung unter gewissen Voraussetzungen bereits möglich. Es gilt also weiterführende Beprobungen durchzuführen, die Ergebnisse zum vollständigen Ersatz von natürlichem, primärem Material über alle Korngrößen liefern sollen. Hierbei sollen vordergründig negative Effekte bezüglich der Dauerhaftigkeit des Baustoffs beleuchtet werden.

Zusätzlich sollen weiterführende Versuchsreihen durchgeführt werden, die sich mit der Möglichkeit befassen Recycling-Sande, aus rezykliertem Beton, zu karbonatisieren. Dabei wären Untersuchungen durchzuführen, die zeigen, ob hierbei ein separat vorgesehener Reaktor deutlich verbesserte Ergebnisse gegenüber der Luftlagerung liefert.

Des Weiteren soll dazu angeregt werden, genauere Kenntnisse über die Bauwerks-umgebung zu erheben und die maßgebenden Umwelteinflussgrößen auf die Baustoffe zu dokumentieren. Gerade im städtischen Umfeld kann diese Maßnahme großes Potential aufweisen, da durch massive menschliche Eingriffe in die Landschaft die Untergrundbeschaffenheit stark in-homogenisiert wurde.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen wurden Ansatzpunkte zur CO₂-Optimierung der zurzeit gebräuchlichen Betonrezepturen dargestellt, zusätzlich kann ein Vorschlag zur

Anpassung der Expositionsklassen bzw. der vorgeschlagenen Betonsorten laut ÖNORM B 4710 erfolgen. Jegliche Optimierungen sind unter den Gesichtspunkten der Langlebigkeit von Bauwerken vorzunehmen um somit einen Beitrag zur effizienteren Ressourcennutzung zu liefern.

Danksagung. Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung der MA23 der Stadt Wien, wodurch die Ausarbeitung des Projekts vorangetrieben wurde.

Literatur

- [1.] MA23, Stadt Wien.: Innovatives Wien 2020. Wiener Strategie für Forschung, Technologie und Innovation. 2015.
In URL: <https://innovation2020.wien.gv.at/site/files/2015/09/innovatives-wien-2020-bf.pdf> (letzter Zugriff: 28.2.2018).
- [2.] Vereinigung der österreichischen Zementindustrie (VÖZ): Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie. Berichtsjahr 2016.
- [3.] Deutsche Zement- und Betonindustrie: Nachhaltiges Bauen mit Beton. Ein Fachbeitrag für Architekten, Planer und Bauherren.
In URL: https://www.betonshop.de/files/294/bs_1818_folder_nachhaltigkeit.pdf (letzter Zugriff: 28.2.2018)
In URL: http://www.zement.at/downloads/downloads_2017/Emissionen_2016.pdf (letzter Zugriff: 28.2.2018)
- [4.] Higuchi,T., Morioka, M., Yoshioka, I., Yokozeki, K., Author, S.: Development of a new ecological concrete with CO2 emissions below zero. In: Construction and Building Materials, 67/2014, Part C, S. 338-343.
- [5.] Juhart, J., Baldermann, C., David, A. , Passer, A.: „ERESCON“ Neue Betone für den Infrastruktur-Bereich, energie- und ressourcenoptimiert.
In URL: <https://www2.ffg.at/verkehr/file.php?id=734> (letzter Zugriff: 28.2.2018).
- [6.] Proske, T., Hainer, S., Rezvani, M., Graubner, C.-A.: Eco-friendly concretes with reduced water and cement content – Mix design principles and application in practice. In: Construction and Building Materials, 67/2014, Part C, S. 413-421.
- [7.] ÖNORM B 4710 – 1:2017-06-15 (Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität - Teil 1: Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206 für Normal- und Schwerbeton). Austrian Standards Institute, Wien.
- [8.] SN EN 206:2013-12 (Beton: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität). Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Zürich.
- [9.] Baustoff Recycling Verband: Recycling-Baustoffverordnung, Stand 27.10.2016. Wien.
- [10.] Seidemann, M., Müller, A., Ludwig, H.: Weiterentwicklung der Karbonatisierung von rezyklierten Zuschlägen aus Altbeton (2. Phase: Prozessoptimierung im Labormaßstab und Technologieentwurf). Bauhaus-Universität Weimar
- [11.] Kommission “Carbonatisierung“ des VDZ: Carbonatisierung des Betons. Einflüsse und Auswirkungen auf den Korrosionsschutz der Bewehrung. Betontechnische Berichte 1972, S. 125 – 133. Beton-Verlag, Düsseldorf 1973.
- [12.] Fédération internationale du béton (fib): Model Code for Concrete Structures 2010. Wilhelm Ernst&Sohn 2013, S. 107f.