

DAS POTENZIAL REZYKLIERTER GESTEINSKÖRNUNG FÜR EINEN NACHHALTIGEN BETONBAU

THE POTENTIAL OF RECYCLED CONCRETE AGGREGATE FOR SUSTAINABLE CONCRETE CONSTRUCTION

Klaus Voit, Johannes Hron & Konrad Bergmeister
(Universität für Bodenkultur Wien)

KEYWORDS

Recyclingbeton; CO₂-Senke; Nachhaltigkeit; Wiederverwendung von Tunnelausbruch.

KURZFASSUNG

In der Bauwirtschaft spielt Beton aufgrund seiner Festigkeit und Robustheit eine wichtige Rolle und ist auch den gegenwärtigen Bestrebungen zur Erreichung einer möglichst nachhaltigen Bauweise unterworfen. Die Verringerung der Umweltwirkungen – sowohl was den Verbrauch von natürlichen Ressourcen als auch die Reduzierung von Treibhausgasemissionen im Zuge der Herstellung betrifft – sind die vorrangigen Ziele. Maßnahmen umfassen die im Beton mengenmäßig dominierende Gesteinskörnung und den für den CO₂-Impact des Baustoffs maßgeblichen Zement. Die Ökobilanz der Betonherstellung kann zum einen durch den Ersatz natürlicher Gesteinskörnungen durch Recyclingprodukte wie Aushub- oder Ausbruchmaterialien verbessert werden. Erfolgt ein Ersatz durch Gesteinskörnung aus aufbereitetem Altbeton, ergibt sich zum anderen die Möglichkeit einer CO₂-Beaufschlagung dieser Recyclinggesteinskörnung: Neben der Ressourcenschonung kann CO₂ durch den Prozess der Karbonatisierung gebunden und aktiv der Atmosphäre ent-

zogen werden. Der Einsatz von Altbeton als Ersatz von natürlichen Gesteinskörnungen kann damit die Ökobilanz von Beton zusätzlich verbessern.

ABSTRACT

Concrete plays an important role in the construction industry due to its strength and robustness. Accordingly, it is also subject to the current changes aimed at achieving the most sustainable construction possible. The reduction of the environmental impact – both in terms of the consumption of natural resources and the reduction of greenhouse gas emissions in the course of concrete production – is the primary objective. Measures include both the aggregate, which dominates concrete in terms of quantity, and the cement, which is decisive for the CO₂ impact of the building material. The life cycle assessment of concrete production can be improved on the one hand by replacing natural aggregates with recycled products, such as excavated materials. If a replacement is made with aggregate from processed concrete, there is on the other hand the possibility of a CO₂ impact of this recycled aggregate: In addition to conserving resources, CO₂ can be bound by the process of carbonation and removed from the atmosphere. The use of waste concrete as aggregate can thus additionally improve the eco-balance of concrete.

1. EINLEITUNG

Ressourcenschonung und Emissionsreduktion spielen in der Bauwirtschaft eine immer wichtigere Rolle, nachhaltiges Bauen tritt – nicht zuletzt aufgrund unterschiedlicher nationaler und übergeordneter Regulative (z.B. EU-Taxonomie-Verordnung¹) – bei der Errichtung neuer Bauwerke immer mehr in den Fokus. Die Motivation für klima- und ressourceneffizientes Bauen resultiert dabei aus der Verantwortung gegenüber den nachfolgenden Generationen und aus der Verantwortung gegenüber Natur und Umwelt.

Verschiedene Baustoffe liefern einen unterschiedlichen Beitrag zur Umweltwirkung (bestimmt mittels sogenannter Environmental Product Declarations [EPD]²) eines gesamten Bauwerks.³ Für eine entsprechende Nachhaltigkeitsbetrachtung ist hierbei die Berücksichtigung der gesamten Wertschöpfungskette bzw. des zu errichtenden Bauwerks als Ganzes zielführend. Diese beginnt bereits in der Planungsphase, beispielsweise mit Auswahl der Ausgangsstoffe, und endet mit dem Abbruch bzw. im Sinne der Kreislaufwirtschaft idealerweise mit der Verwertung von Abbruchmaterial bzw. ganzer Bauteile.⁴ Dauerhaftigkeit, Lebensdauer und Verwertbarkeit bzw. Rückbaubarkeit stellen dabei wirksame Stellschrauben zur Verringerung der im Zuge von Herstellung, Betrieb und Rückbau eines Bauwerks hervorgerufenen Umweltwirkungen dar.

Ein vielverwendeter Baustoff ist Beton: Jährlich werden weltweit etwa 14,5 Mrd. m³ Beton verbaut, in Österreich sind es im Schnitt etwa 16 Mio. m³.⁵ Mengenmäßig besteht Beton zum Großteil aus Gesteinskörnung, die mit dem sogenannten Zementleim – aus Bindemittel (u.a. Zement) und Wasser zusammengesetzt – verkittet wird. Die Produktion von Beton ist entsprechend ressourcenintensiv, die Herstellung des Zements – mit einem Beitrag von über 80 % des Klima-Impacts von Beton – wiederum klimarelevant.

Was den Energieaufwand bzw. das Global Warming Potential (GWP) im Zuge der Betonherstellung betrifft, so zeigt Beton im Vergleich zu anderen Baustoffen einen verhältnismäßig niedrigen Energieaufwand im Zuge seiner Herstellung (siehe Abbildung 1).

Dennoch schlägt sich die Betonproduktion mit sehr hohen, absoluten Treibhausgasemissionen nieder (kein anderer Baustoff ist für eine größere Rohstoffentnahme und höhere Treibhausgasemissionen weltweit verantwortlich), die in den sehr hohen Produktionsmengen begründet sind.⁶ Derzeit

sind große Bemühungen im Gange, die Emissionen bei der Zementherstellung zu verringern. Diese betreffen vornehmlich die Entwicklung und Zulassung neuer Zementtypen (siehe auch den 2022 neu zugelassenen Zement CEM II/C; siehe ÖNORM EN 197-5⁷), die Optimierung der Bindemittelzusammensetzung und die Optimierung des Mischungsentwurfs.⁸ Was die Zementherstellung betrifft, so nimmt Österreich mit der Emissionswirkung von 539 kg CO₂-eq pro produzierter Tonne Zement (2017) bereits eine Vorreiterrolle ein (siehe Abbildung 2). Dieser Betrag konnte im Jahr 2021 nochmals auf 533 kg CO₂-eq/t Zement gesenkt werden. Der absolute Ausstoß an CO₂-Emissionen hingegen stieg von ca. 2,7 auf 2,8 Mio. t CO₂ durch die im Jahr 2021 auf 2,82 Mio. t angestiegene Zementproduktion (Anstieg der Zementproduktion um 6,5 % im Vergleich zum Jahr 2020).⁹

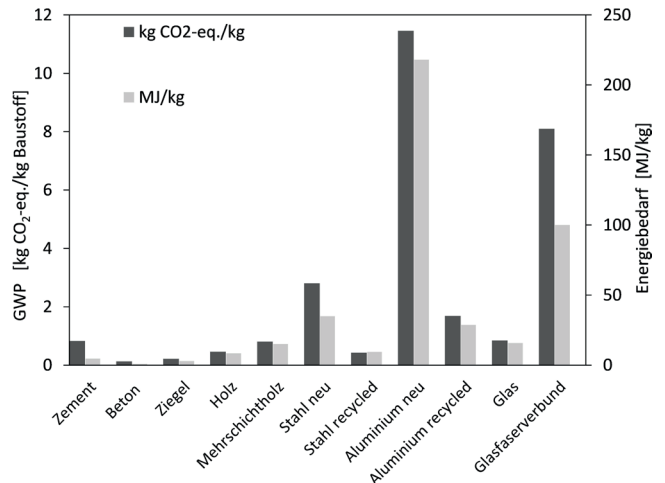


Abbildung 1: Energieaufwand und GWP unterschiedlicher Baumaterialien im Vergleich¹⁰

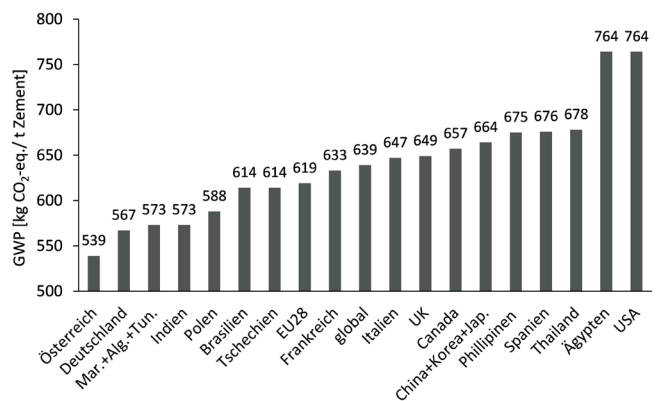


Abbildung 2: GWP bei der Zementherstellung im nationalen und internationalen Vergleich (Bezugsjahr: 2017)¹¹

1 Verordnung (EU) 2020/852 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18.6.2020 über die Einrichtung eines Rahmens zur Erleichterung nachhaltiger Investitionen und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/2088, ABl L 198 vom 22.6.2020, S. 13.

2 Österreichische Bautechnik Vereinigung (ÖBV), Sachstand – Ökologisierung/Nachhaltigkeit im Bauwesen (2022); Austrian Standards Institute, ÖNORM EN 15804 Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte (Ausgabe: 15.2.2020).

3 Haist et al., Nachhaltiger Betonbau – Vom CO₂- und ressourceneffizienten Beton und Tragwerk zur nachhaltigen Konstruktion, in Fouad (Hrsg.), Bauphysik-Kalender 2022 (2023 [in Druck]) I; Haist et al., Nachhaltig konstruieren und bauen mit Beton, in Bergmeister/Fingerloos/Wörner (Hrsg.), Beton-Kalender 2022 (2022) 421.

4 Achatz et al., KreislaufBAUwirtschaft – Projekt-Endbericht (2021) abrufbar unter <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0757.pdf> (Zugriff am 25.10.2022).

5 ÖBV, Sachstand – Ökologisierung/Nachhaltigkeit (2022).

6 Haist et al. in Bergmeister/Fingerloos/Wörner, Beton-Kalender 2022, 421.

7 Austrian Standards Institute, ÖNORM EN 197-5 Zement – Teil 5: Portlandkompositzement CEM II/C-M und Kompositzement CEM VI (Ausgabe: 15.6.2021).

8 Haist et al., Entwicklungsprinzipien und technische Grenzen der Herstellung zementarmer Betone, Beton- und Stahlbetonbau 3/2014, 202.

9 Vereinigung der österreichischen Zementindustrie, Auf dem Weg zu einer CO₂-neutralen Gesellschaft, Jahresbericht 2018/19 der österreichischen Zementindustrie (2019).

10 Scrivener/John/Gartner, Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry, Cement and Concrete Research 114/2018, 2; Hammond/Jones, Embodied energy and carbon in construction materials, Proceedings of the Institution of Civil Engineers 2/2008, 87; Hammond/Jones, Inventory of Carbon & Energy (ICE) – Version 1.6a. (2008).

11 ÖBV, Sachstand – Ökologisierung/Nachhaltigkeit (2022).

Grundsätzlich handelt es sich bei Beton um einen nachhaltigen funktionierenden Baustoff für erdberührte Bauwerke, der bei korrekter Herstellung eine lange Lebensdauer aufweisen kann. Die Umweltwirkung kann aus ressourcentechnischer Sicht durch Verwendung alternativer Gesteinskörnungen wie Aushub- oder Abbruchmaterialien deutlich verbessert werden. Die Aufbereitung und Wiederverwertung von Altbeton am Ende der Lebensdauer eines Bauwerks ermöglicht schlussendlich eine gänzlich kreislaufgerechte Anwendung von Beton. Zusätzlich etabliert sich die Begasung des Altbetons mit CO₂ als effiziente Methode, um einen Teil des bei der Zementherstellung generierten CO₂ wieder in den Baustoff abzugeben und zu speichern.¹² Insgesamt ergibt sich durch die Wiederverwertung von Altbeton als Gesteinskörnung und durch die CO₂-Begasung derselbigen eine deutliche Verringerung der negativen Umwelteffekte von Beton.

2. NATÜRLICHE UND REZYKLIERTE GESTEINSKÖRNERUNGEN

Normalbeton besteht zum überwiegenden Anteil (ca. 70 bis 80 Vol.-%) aus Gesteinskörnung, die dort die Funktion eines Stützgerüsts im Sinne einer möglichst dichten Packung übernimmt. Unter anderem aufgrund der hohen Produktionsmengen von Beton zählen Sand, Kies und Schotter zu den meistgeförderten Rohstoffen der Welt. Nach Schätzungen der UN-Umweltorganisation UNEP werden jährlich ca. 47 bis 59 Mrd. t an Material gefördert, wobei Sand und Kies den Großteil davon einnehmen (68 % bis 85 %) einnehmen.¹³

In Österreich beläuft sich der Materialverbrauch an nichtmetallischen Mineralstoffen auf 95 Mio. t pro Jahr. Davon sind etwa 35 Mio. t Gesteinskörnungen, die für die Betonproduktion verwendet werden. Die österreichischen Produktionsmengen sind im letzten Jahr (2021) wiederum deutlich gestiegen. So stieg etwa die Produktionsmenge von Transportbeton, der etwa zwei Drittel der produzierten Gesamtbetonmenge darstellt, im Vergleich zum Vorjahr um 11,5 % auf eine Jahresproduktionsmenge von 11,6 Mio. m³.¹⁴ Dementsprechend erhöht sich auch die Nachfrage nach Gesteinskörnungen für Beton.

Annähernd der gesamte Verbrauch an Baurohstoffen wird dabei im Inland entnommen, da Gesteinskörnungen aufgrund ihres niedrigen Preisniveaus und der hohen benötigten Mengen international nicht handelsfähig sind. In Österreich hat sich aus diesem Grund eine verbrauchernahe Versorgungsstruktur mit mittleren Transportweiten von ca. 30 km etabliert.

Ist das Angebot an natürlichen Ressourcen aus geologischer Sicht gerade in Österreich zwar kaum limitiert, so sind die gewinnbaren (natürlichen) Ressourcen zur Herstellung von Gesteinskörnungen aufgrund der begrenzten Transportlängen sowie umwelttechnischer und gesetzlicher Vorgaben dennoch begrenzt (vgl. Abbildung 3).¹⁵ Bereits im österreichischen Rohstoffplan 2012 wird angemerkt, dass „trotz

ausreichender Lagerstättenvorräte [...] das angebotsseitige Versorgungsrisiko bei den Baurohstoffen grundsätzlich als kritisch zu beurteilen ist. Als Gründe sind die konkurrierenden Nutzungsansprüche der Siedlungs- und Schutzgebiete und der für die Versorgung erforderlichen bergbaulichen Abbauflächen zu nennen.“ Als zukünftige Bedarfsschwerpunkte werden die Region Wien einschließlich Umland, Linz-Wels, Innsbruck und Tiroler Unterland, Salzburg und Umgebung sowie Graz genannt. Hier ist durch den erhöhten Rohstoffbedarf auch ein höheres Versorgungsrisiko zu erwarten.¹⁶

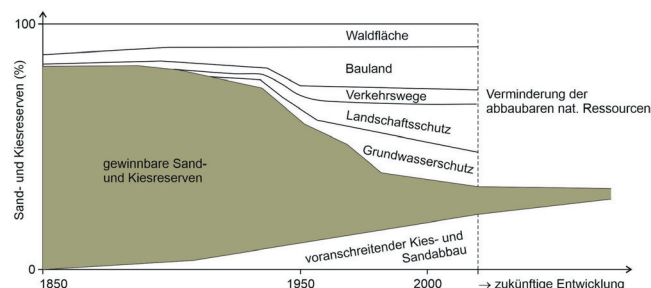


Abbildung 3: Verringerung der gewinnbaren Kies- und Sandreserven¹⁷

Abbildung 3: Diese Ausgangslage gilt jedoch nicht nur für Österreich, auch in den Nachbarländern Deutschland und Schweiz wird die Erschließung neuer Kiesgruben zu einem immer schwierigeren Unterfangen. Dementsprechend ist auf längere Sicht mit einer Verknappung dieser Rohstoffe und einer damit einhergehenden Erhöhung der Rohstoffpreise zu rechnen. Eine Substitution hochwertiger Kiese durch andere mineralische Rohstoffe – sei es durch die Verwertung von Ausbruchmaterial oder Baustoffrecycling – ist somit unbedingt erforderlich und hat aufgrund des ohnedies hohen Abfallaufkommens von Baurestmassen und Tunnelausbruchmaterial durch die Bauindustrie ein großes Potenzial, um den Bedarf an mineralischen Rohstoffen zumindest teilweise abzudecken.¹⁸

Die Europäische Union zielt auf eine Verwendungsquote von mindestens 70 % dieser Bau- und Abbruchabfällen durch Recycling ab, wobei bereits gegenwärtig ein großer Anteil der anfallenden Baurestmassen recycelt wird.¹⁹ Die verfügbaren Mengen an qualitativ für die Betonherstellung geeigneten Recyclinggesteinskörnungen sind gegenwärtig jedoch knapp und stehen einer deutlich höheren Nachfrage gegenüber, weshalb in Österreich kaum Recyclinggesteinskörnungen nach EN 12620 erhältlich sind. Derzeit ist nur eine Abdeckung von etwa zehn Prozent des Bedarfs an Gesteinskörnungen durch Rezyklierung von Baurestmassen möglich. Dementsprechend steht einer Abbruchmenge von etwa 3,5 Mio. t ein jährlicher Verbrauch an Gesteinskörnungen für Beton von ca. 35 Mio. t gegenüber.²⁰ Dementsprechend können durch die Wiederverwertung von Baurestmassen die natürlichen Sand- und Kiesvorkommen nur geringfügig entlastet werden.

12 Tiefenthaler, Development and Demonstration of Processes Mineralizing CO₂ in Demolition Concrete (Dissertation ETH Zürich, 2022); Pflieger/Vill, Forced carbonation of recycled concrete aggregates, Acta Polytechnica CTU Proceedings 2022, 467.

13 Haist et al. in Fouad, Bauphysik-Kalender 2022, I.

14 Güteverband Transport Beton, Jahresbericht 2021/2022 (2022).

15 Voit, Technische Geologie – Verwertung von Tunnelausbruch [Habilitationsschrift BOKU, 2016].

16 Weber, Der österreichische Rohstoffplan (2012) 45.

17 Nach Resch/Jodl, Verwertung von Tunnelausbruchmaterial – Chancen und Risiken, in Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft (Hrsg.), Festschrift 40 Jahre Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft (2009) 55.

18 Resch/Jodl in Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft, FS 40 Jahre Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft, 55.

19 Haist et al. in Bergmeister/Fingerloos/Wörner, Beton-Kalender 2022, 421.

20 ÖBV, Sachstand – Ökologisierung/Nachhaltigkeit (2022).

Eine andere alternative Rohstoffquelle zur Herstellung von Gesteinskörnung für Beton ist Aushubmaterial, wovon im Jahr 2019 in Österreich insgesamt rd. 42,2 Mio. t anfielen.²¹ Dazu zählt auch Tunnelausbruchmaterial, das – zumindest lokal im Nahbereich der Tunnelbaustellen – in Abhängigkeit der vorliegenden Geologie grundsätzlich ein gewisses Verwertungspotenzial für Gesteinskörnung für Beton aufweist.²² Derzeit fallen durch die drei großen Tunnelbauprojekte Brenner Basistunnel, Koralmtunnel und Semmering-Basistunnel beträchtliche Mengen an Tunnelausbruchmaterial an. Ob eine Verwendung des jeweiligen Ausgangsprodukts als Gesteinskörnung für Beton zulässig ist, entscheiden dessen umwelttechnische und bautechnische Eigenschaften. Ob es schlussendlich tatsächlich zu einer Verwertung des Tunnelausbruchmaterials kommt, obliegt dem Willen der Auftraggeber und Auftragnehmer. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Einsatz von rezykliertem Gesteinskörnung oder auch von Tunnelausbruchmaterial sowohl von der örtlichen Verfügbarkeit in einem Umkreis von bis etwa 50 km als auch von der zeitlichen Verfügbarkeit (Zwischendeponierung) abhängt.

3. VERWERTUNG VON TUNNELAUSBRUCHMATERIAL

Tunnelausbruchmaterial fällt bei der Herstellung eines Hohlraums im Gebirge bzw. Untergrund an. Ist der grundlegende Zweck dieser Tätigkeit die Schaffung des funktionalen Hohlraums selbst, sei es als Transportweg, für die spätere Nutzung als Eisenbahn- oder Straßentunnel, Maschinenkaverne o.Ä., fällt das Ausbruchmaterial als eine Sache an, derer man sich entledigen möchte und man bewegt sich gemäß Abfallwirtschaftsgesetz (AWG)²³ grundsätzlich im Abfallregime. Tunnelausbruch und Bodenaushub sind vom Geltungsbereich der Recycling-Baustoffverordnung²⁴ ausgenommen, da beide noch nicht als Baustoff im Einsatz waren. Tunnelausbruch darf bei Einhaltung der Qualitätskriterien einer zulässigen Verwertung zugeführt werden und verliert bereits durch eine zweckerfüllende Nutzung seine Abfalleigenschaft.²⁵ Das Gesteinsmaterial kann dadurch einer Verwertung zugeführt werden, was zusätzlich zu einer Einsparung an Deponievolumen führt.

Während karbonatische und magmatische Gesteinskörnungen aus dem Tunnelvortrieb einem Steinbruchmaterial sehr ähnlich sind (in Abhängigkeit der Löseart), zeigen metamorphe Gesteinskörnungen aufgrund der zum Teil vorhandenen Schieferung bzw. des unter Umständen hohen Schichtsilikatanteils stark anisotrope Eigenschaften. Ein erhöhter Schichtsilikatanteil hat außerdem oftmals eine verminderte Gesteinsfestigkeit zur Folge. Beides muss bei der Konzeption

des Aufbereitungsprozesses bedacht werden, um die Eigenschaften der Gesteinskörnung und folglich die betontechnologischen Eigenschaften nicht negativ zu beeinflussen. Zur einfachen Abscheidung und Reduzierung von minderwertigem Material hat sich eine Vorabscheidung von kleineren Korngrößen bewährt.

Die grundlegendsten Gesteinsparameter (Druckfestigkeit, E-Modul, Frostbeständigkeit, Widerstand gegen Zertrümmerung [LA-Wert], Schichtsilikatanteil, Anteil an betonschädlichen Stoffen sowie Petrographie) werden im Zuge einer orientierenden Voruntersuchung an Material aus Bohrkernen, Probevortrieben, nahegelegenen Steinbrüchen o.Ä. untersucht.²⁶ Im Rahmen der Hauptuntersuchung werden die Eigenschaften des Materials, das aus einer Probeaufbereitung mittels Großanlage stammt, gemäß ÖNORM EN 12620²⁷ detailliert erhoben.²⁸ Dabei wird auf die chemischen Eigenschaften des Gesteins, die die Dauerhaftigkeit der daraus hergestellten Baustoffe stark beeinflussen, z.B. die Widerstandsfähigkeit gegenüber einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion,²⁹ besonderes Augenmerk gelegt. Der Prüfplan entspricht dabei im Wesentlichen den Kontrolluntersuchungen während des laufenden Betriebs einer gesteinsaufbereitenden Anlage.³⁰

4. EINSATZ VON ALTBETON BZW. REZYKLIRTER BAURESTMASSE

Die Anwendbarkeit von rezyklierten Gesteinskörnungen wird – neben der ohnedies nur bedingt gegebenen Verfügbarkeit – durch normative, national sehr unterschiedliche Vorgaben eingeschränkt. Diese betreffen grundsätzlich die Höchstwerte für den Austausch feiner und grober Gesteinskörnungen durch rezyklierte Gesteinskörnungen sowie die Anwendbarkeit von Recyclingbeton für bestimmte Anwendungen. Dieser Umstand ist darin begründet, dass Beton aus rezykliertem Gesteinskörnung im Vergleich zu natürlicher Gesteinskörnung mitunter deutlich veränderte Betoneigenschaften – sowohl was Frisch-, als auch Festbetoneigenschaften betrifft – aufweist, die bei der Betonherstellung und Bemessung berücksichtigt werden müssen.

Grundsätzlich bringt der Einsatz von rezykliertem Gesteinskörnung mehrheitlich negative Auswirkungen auf die Betoneigenschaften mit sich (z.B. schlechtere Verarbeitbarkeit des Frischbetons, Abnahme von E-Modul und Zugfestigkeit des Festbetons, Verringerung der Robustheit gegenüber diversen Umwelteinwirkungen), wobei die Größenordnung der Einflussnahme von der Art der rezyklierten Gesteinskörnung und der Austauschrate abhängt. Diesem Umstand wird in der Regel mit einem erhöhten Zementleimanteil entgegen gewirkt. Des Weiteren kann der als Gesteinskörnung verwendete Altbeton bzw. der darin enthaltene Zementstein im neuen Betonverband nicht mehr karbonatisieren (Aufnahme von CO₂ unter Umwandlung des im Zementstein enthaltenen Portlandits [= Calciumhydroxid Ca(OH)₂] in Kalkstein CaCO₃). Dadurch verschlechtert sich der Klima-Impact von

21 Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2022 (2022).

22 Voit et al., Aufbereitung und Wiederverwertung von Tunnelausbruchmaterial beim Brenner Basistunnel, Beton- und Stahlbetonbau 12/2015, 832; Voit et al., Tunnel spoil recycling for concrete production at the Brenner Base tunnel in Austria, Structural Concrete 6/2020, 2795.

23 Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft, BGBl I 2022/102.

24 Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Pflichten bei Bau- und Abbruchtätigkeiten, die Trennung und die Behandlung von bei Bau- und Abbruchtätigkeiten anfallenden Abfällen, die Herstellung und das Abfallende von Recycling-Baustoffen, BGBl II 2015/181.

25 Vgl. ÖBV, ÖBV-Richtlinie Verwendung von Tunnelausbruch (Oktober 2015).

26 Vgl. Franklin, Suggested method for determining point load strength, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 2/1985, 51.

27 Austrian Standards Institute, ÖNORM EN 12620 Gesteinskörnungen für Beton (Ausgabe: 15.2.2014).

28 Voit et al., Beton- und Stahlbetonbau 12/2015, 832.

29 Austrian Standards Institute, ÖNORM B 3100 Beurteilung der Alkali-Kieselsäure-Reaktivität im Beton (Ausgabe: 1.8.2008).

30 ÖBV, ÖBV-Richtlinie Verwendung von Tunnelausbruch (2015).

klassischem Recyclingbeton zugunsten der Ressourcenschonung.³¹ Ein möglicher Lösungsansatz für diesen Missstand ist eine vorangehende CO₂-Begasung der rezyklierten Gesteinskörnung und einer damit einhergehenden Reduktion der CO₂-Emissionen (siehe Punkt 5.).

Grundvoraussetzung für den Einsatz rezyklierten Gesteinskörnungen bleibt schlussendlich, dass die Tragfähigkeit, die Gebrauchstauglichkeit und die Dauerhaftigkeit der jeweiligen Betonstrukturen, insbesondere der Tragwerke, nicht negativ beeinflusst werden.³² Aufgrund der immer umfangreicheren Forschungsergebnisse, die zur Verfügung stehen, und der zunehmenden praktischen Erfahrung betreffend die Verwendung von Recyclingbeton werden zukünftig auch Vorgaben für Tragwerke aus Recyclingbeton in der Eurocode-2-Überarbeitung in Annex N zu finden sein.³³

Neben der Erfüllung der geforderten Festbetoneigenschaften stellt auch die ständige Variation der Ausgangsstoffe (vor allem bei der Wiederverwertung von Baurestmassen) eine große Herausforderung für die Betonherstellung auf der Baustelle bzw. im Betonwerk dar, da die Betonrezeptur ständig an die jeweils vorliegende Gesteinskörnung anzupassen ist. Zu nennen ist hier z.B. ein eventuell erhöhter Wasseranspruch von feiner rezyklierten Gesteinskörnung aufgrund saugender Korneigenschaften. Aus genannten Gründen ist eine Verwendung der Sandfraktion aus Rezyklaten in Deutschland nicht gestattet, während dies in Österreich bei Durchführung einer Nassaufbereitung möglich ist. Eine Verwendung bei vorgeprespannten und ermüdungsgefährdeten Bauteilen ist in Österreich jedoch nicht zulässig und die maximal zulässige Druckfestigkeitsklasse wurde mit C35/45 festgelegt.³⁴ In der Schweiz wiederum sind die Anwendungsbereiche für Recyclingbeton nur wenig limitiert. Lediglich bei speziellen Betonanforderungen sind die jeweils relevanten Betoneigenschaften mit einem Tragwerksplaner vorab abzustimmen.

Neben der Erfüllung von bautechnischen Anforderungen spielen bei rezyklierten Gesteinskörnungen aufgrund möglicher Verunreinigungen zusätzlich Umweltverträglichkeitsanforderungen für deren Verwendung eine entscheidende Rolle.³⁵ Damit wird das Risiko einer möglichen Wasser- oder Luftverschmutzung minimiert.

Parameter und Grenzwerte der jeweiligen Qualitätsklassen, die die möglichen Anwendungsformen der Gesteinskörnung regeln, sind für Österreich in der Recycling-Baustoffverordnung festgelegt.

5. KARBONATISIERUNG REZYKLIERTER GESTEINSKÖRNUNGEN

Die maßgebenden negativen Umweltwirkungen von Betonstrukturen stammen primär aus dem enormen Ressourcenverbrauch aufgrund des hohen Massenanteils der Ge-

steinskörnung sowie dem hohen Treibhauspotenzial des Zements. Im Hinblick auf die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnung bzw. Tunnelausbruch bieten sich zwar große Chancen zur Verbesserung der Umweltwirkung durch den verringerten Ressourcenverbrauch, allerdings führt die Verwendung von Recyclingzuschlägen nicht immer bzw. nur in optimierten Fällen auch zu einer Reduktion des GWP.³⁶

Abbildung 4 veranschaulicht die Umweltwirkung der einzelnen Komponenten bzw. Prozesse zur Herstellung eines Betons der Festigkeitsklasse C30/37 und hebt den begrenzten Einfluss der Gesteinskörnung auf die Gesamtemissionen hervor.

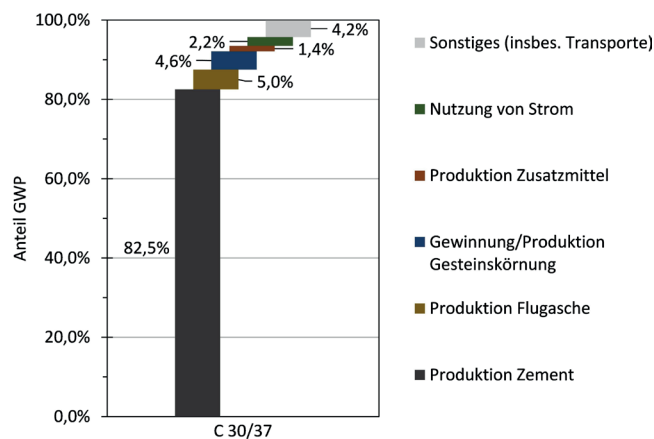


Abbildung 4: Einflussgrößen auf das Treibhauspotenzial der Herstellung eines Betons der Druckfestigkeitsklasse C30/37³⁷

Abbildung 4: Auch im Forschungsvorhaben „R-Beton“ unter der Konsortialführung der HeidelbergCement AG, im Rahmen dessen ein ökobilanzieller Vergleich einer Verwertung der RC-Körnung einerseits im Straßenunterbau, also in ungebundener Form, und andererseits einer Wiederverwendung bei der Betonherstellung durchgeführt wurde, konnte der ökologische Vorteil einer Wiederverwendung gegenüber einer Deponierung hervorgehoben werden. Zu beachten ist jedoch, dass im Einzelfall die erforderlichen Transportentfernungen die Treibhauswirkung erheblich vergrößern können.³⁸

Dieser Umstand hat in den letzten Jahren dazu geführt, dass in mehreren Forschungsvorhaben die Möglichkeit der CO₂-Speicherung in der rezyklierten Gesteinskörnung verstärkt untersucht wurde.³⁹ Nachdem oft große Teile von Betonbauwerken am Ende ihrer Nutzungsdauer noch nicht karbonatisiert sind, begrenzt sich die Karbonatisierungstiefe in der Regel auf die oberen Zentimeter der Betonbauteile. Somit entsteht ein nutzbares Potenzial zur „künstlichen“ Karbonatisierung und zur CO₂-Einlagerung in diesen Massen.

31 Haist et al. in Fouad, Bauphysik-Kalender 2022, I.

32 Haist et al. in Fouad, Bauphysik-Kalender 2022, I; Haist et al. in Bergmeister/Fingerloos/Wörner, Beton-Kalender 2022, 421.

33 Haist et al. in Fouad, Bauphysik-Kalender 2022, I; Austrian Standards Institute, prEN 1992-1-1 Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Anhang N – Tragwerke aus Beton mit rezyklierten Gesteinskörnung (Ausgabe: 1.10.2021).

34 Austrian Standards Institute, ÖNORM B 3140 Rezyklierte Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Anwendungen sowie für Beton (Ausgabe: 1.11.2020).

35 ÖBV, Sachstand – Ökologisierung/Nachhaltigkeit (2022).

36 Glock/Hondl, Fertigteile aus Recyclingbeton – Ergebnisse des Forschungsprojektes SeRaMCo/Precast Elements with Recycled Concrete, Bauingenieur 7/8/2022, 215.

37 Daten aus ÖBV, Sachstand – Ökologisierung/Nachhaltigkeit (2022).

38 Konsortium R-Beton, Ressourcenschonender Beton – Werkstoff für die Zukunft, <https://www.r-beton.de/> (Zugriff am 12.10.2022).

39 Tiefenthaler, Processes Mineralizing CO₂ (2022); Pflieger/Vill, Acta Polytechnica CTU Proceedings 2022, 467; Seidemann/Müller/Ludwig, Weiterentwicklung der Karbonatisierung von rezyklierten Zuschlägen aus Altbeton (2. Phase: Prozessoptimierung im Labormaßstab und Technologientwurf), Abschlussbericht (2015); Sereng et al., Improvement of Recycled Aggregates Properties by Means of CO₂ Uptake, Applied Sciences 14/2021, 6571.

Die beschriebene Größenordnung der aufnehmbaren CO₂-Menge schwankt in den angeführten Studien stark und hängt von sehr vielen Faktoren ab. Grundsätzlich begrenzt der Anteil der bereits durch natürliche Karbonatisierung gesättigten Rezyklate das vorhandene Potenzial zur Einlagerung von zusätzlichem CO₂. Darüber hinaus wurde der Einfluss der Korngröße auf die CO₂-Aufnahme untersucht und nachgewiesen, dass sich erwartungsgemäß die feinen Kornfraktionen besonders für eine CO₂-Beaufschlagung eignen.⁴⁰ Dies rührt daher, dass sich einerseits durch den Aufbereitungsprozess des Abbruchbetons der für die Karbonatisierung essenzielle Zementstein und der darin enthaltene Portlandit besonders in den feinen Korngruppen anreichern und sich andererseits die grundsätzlich beaufschlagbare Oberfläche zum Durchmesser der Einzelkörner invers verhält.

Nur *Pfleger/Vill* stellten eine erhöhte Aufnahme bei größeren Körnern fest, was sich aber mit der Methodik der CO₂-Beaufschlagung begründen ließ.⁴¹ Neben der Temperatur und der CO₂-Konzentration in dem für die beschleunigte Karbonatisierung verwendeten Gasstroms hat nach *Seidemann/Müller/Ludwig*⁴² und *Sereng et al.*⁴³ vor allem der Wassergehalt der RC-Körnung einen signifikanten Einfluss auf die erzielbare Speicherung von CO₂. In den Untersuchungen konnte ein optimaler Wassergehalt ermittelt werden, um die maximale CO₂-Aufnahme zu ermöglichen. Dieser Feuchtegehalt im Rezyklat muss vor der Beaufschlagung eingestellt werden, da ansonsten die zu erreichende Speicherung von CO₂ nicht voll ausgenutzt werden kann.⁴⁴

Dies spiegelt auch die Einteilung der Expositionsklassen infolge der natürlichen Karbonatisierung von Betonbauwerken wider. Liegt die Wassersättigung der oberflächlichen Betonanteile in hohem Maße vor oder befinden sich die betrachteten Betonoberflächen gänzlich in trockener Umgebung, so sind die Abstufungen der Expositionsklassen infolge Karbonatisierung im Bereich XC1 bzw. XC2 (nach EC2⁴⁵). Liegen jedoch wechselnde Feuchtigkeitsbedingungen und somit schwankende Sättigungsgrade vor, erfolgt eine Einteilung in höhere Expositionsklassen wie XC3 bzw. XC4 und eine folglich höhere Betondeckung ist erforderlich, um die Bewehrung vor karbonatisierungsinduzierter Korrosion zu schützen.

Um das volle Potenzial dieser Schnellkarbonatisierung ausnutzen zu können, sind mit den heute bekannten Methoden Beaufschlagungszeiten von mindestens 24 Stunden und mehr erforderlich.⁴⁶ In wirtschaftlich praktikablen Zeiträumen reduziert sich die gespeicherte Menge an CO₂ stark. So beträgt die nach sechs Stunden aufgenommene Menge

CO₂ für die Kornfraktion 8 bis 22 mm nur noch ca. 15 g CO₂/kg RC-Körnung im Vergleich zu 25 g CO₂/kg bei einer Beaufschlagungsdauer von 24 Stunden. Abbildung 5 zeigt den zeitlichen Verlauf der CO₂-Beaufschlagung mit der relativ aufgenommenen Masse an CO₂ bezogen auf ein Kilogramm in einer RC-Körnung 8 bis 22 mm.⁴⁷ In den Untersuchungen von *Tiefenthaler* wurde in einer Beaufschlagungsdauer von wenigen Stunden ein Bindevermögen von ca. 7 g CO₂/kg Rezyklat festgestellt.⁴⁸

Ergebnisse einer ganz aktuellen Untersuchung des Instituts für konstruktiven Ingenieurbau der BOKU Wien in Kooperation mit der *neustark ag* zeigt Abbildung 6. Hierbei bestätigte sich die gute Eignung von feinen Kornfraktionen zur künstlichen Schnellkarbonatisierung. Bereits nach einer Prozesszeit von ca. 1,5 Stunden war eine relative CO₂-Aufnahme von 37,7 kg CO₂/t RC-Material erreicht.⁴⁹

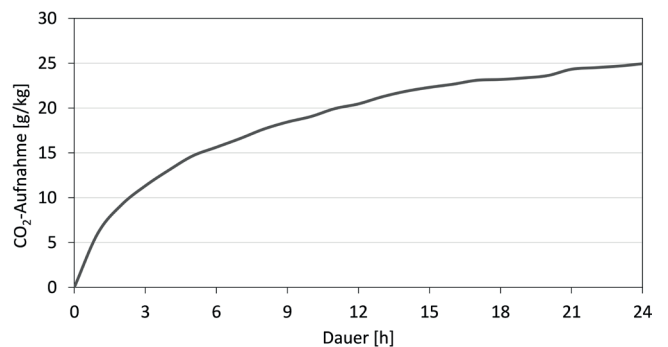


Abbildung 5: Ergebnisse der Schnellkarbonatisierung eines C25/30, CEM II/B, Kornfraktionen 8 bis 22 mm⁵⁰

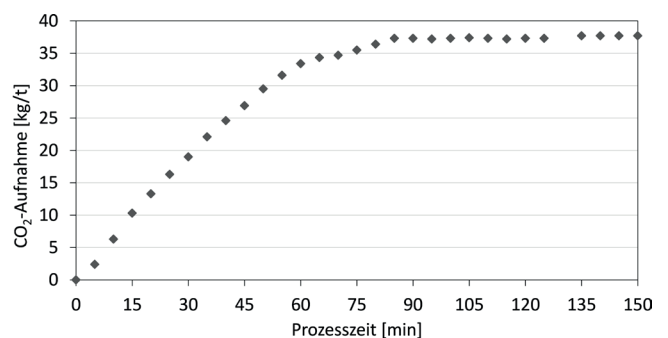


Abbildung 6: Relative CO₂-Aufnahme in der Feinfraktion (0 bis 1,5 mm) eines ca. ein Jahr alten C20/25⁵¹

Die Verfahren befinden sich in den meisten Fällen im Laborstatus und haben noch keine Marktreife erreicht. Eine Ausnahme bildet hier das Start-up *neustark*, das 2017 als Spin-off der ETH Zürich gegründet wurde. Dieses Jahr konnte eine Anlage in Zusammenarbeit mit dem Betonhersteller Kästli Bau realisiert werden, in der das tägliche Durchsatzvermögen zur Karbonatisierung der rezyklierten Gesteinskörnung auf 750 t Rezyklat gesteigert werden konnte. Nach den ersten Betriebsmonaten konnte eine Speicherkapazität von ca. 10 kg CO₂ pro t Gesteinskörnung erzielt werden.⁵²

40 *Tiefenthaler*, Processes Mineralizing CO₂ (2022); *Pfleger/Vill*, Acta Polytechnica CTU Proceedings 2022, 467; *Sereng et al.*, Applied Sciences 14/2021, 6571.

41 *Pfleger/Vill*, Acta Polytechnica CTU Proceedings 2022, 467.

42 *Seidemann/Müller/Ludwig*, Weiterentwicklung der Karbonatisierung (2015).

43 *Sereng et al.*, Applied Sciences 14/2021, 6571.

44 *Seidemann/Müller/Ludwig*, Weiterentwicklung der Karbonatisierung (2015); *Sereng et al.*, Applied Sciences 14/2021, 6571.

45 *Austrian Standards Institute*, ÖNORM EN 1992-1-1 Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau (Ausgabe: 15.2.2015).

46 *Pfleger/Vill*, Acta Polytechnica CTU Proceedings 2022, 467; *Tiefenthaler et al.*, Technological Demonstration and Life Cycle Assessment of a Negative Emission Value Chain in the Swiss Concrete Sector, Frontiers in Climate 3/2021, 13.

47 *Pfleger/Vill*, Acta Polytechnica CTU Proceedings 2022, 467.

48 *Tiefenthaler*, Processes Mineralizing CO₂ (2022)

49 *Tiefenthaler/Mithun*, Laborbehandlung Recyclingmaterial, Laborbericht (unveröffentlicht, 2022).

50 Vgl. *Pfleger/Vill*, Acta Polytechnica CTU Proceedings 2022, 467.

51 Nach *Tiefenthaler/Mithun*, Laborbehandlung Recyclingmaterial (2022).

52 „Speicherung von CO₂ durch Carbonatisierung von Altbeton“, beton 9/2022, 336.

Grundsätzlich ist für die Anwendung solcher Verfahren in größerem Maßstab immer zu berücksichtigen, welche CO₂-Aufwendungen durch die Umsetzung der Technologie zusätzlich entstehen. Eine umfassende Lebenszyklusuntersuchung der CO₂-Beaufschlagung wurde von *Tiefenthaler et al.* durchgeführt. Für den Prozess der Karbonatisierung muss beispielsweise das an anderer Stelle als Gas (z.B. als Rauchgas bei Kraftwerken) anfallende CO₂ verflüssigt und anschließend transportiert werden. Für die Mineralisierung selbst sind wieder Energieaufwendungen nötig und es fallen diverse technische Verluste an. Abbildung 7 zeigt das relative Nettobindevermögen der rezyklierten Gesteinskörnung abgeleitet nach. Nach Abzug der für die Prozesse aufzubringenden Emissionen können ca. 94 % der in der Gesteinskörnung gespeicherten Menge an CO₂ als tatsächlich der Atmosphäre entzogen angesehen werden.⁵³

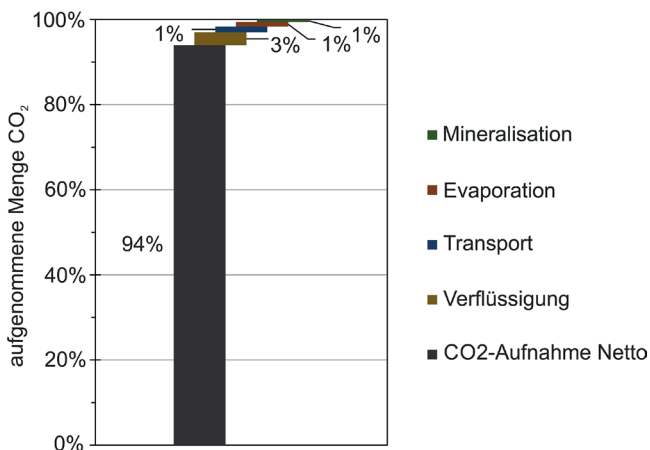


Abbildung 7: Relatives Nettobindevermögen in einer RC-Körnung unter Berücksichtigung der im Prozess anfallenden Emissionen⁵⁴

Neben der Möglichkeit, das Treibhauspotenzial des Betons durch eine CO₂-Speicherung zu verringern, liefert die gezielte Karbonatisierung das Potenzial, die Materialeigenschaften der Rezyklate zu verbessern. So zeigte sich bei Beton aus karbonisierten Rezyklaten eine höhere Druckfestigkeit als mit unbehandelter RC-Körnung.⁵⁵ Neben der höheren Druckfestigkeit wird auch die Porosität und damit die Wasseraufnahme der Körner herabgesetzt und dadurch positiv beeinflusst.⁵⁶

Zu berücksichtigen ist jedoch bei der künstlichen Karbonatisierung von Zuschlägen der daraus resultierende niedrigere pH-Wert des damit erstellten Betons.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Beton ist ein vielseitig angewendeter Baustoff, der aufgrund seiner hohen Produktionsmengen einen erheblichen Anteil

⁵³ *Tiefenthaler et al.*, *Frontiers in Climate* 3/2021, 13 (13 ff).

⁵⁴ Vgl. *Tiefenthaler et al.*, *Frontiers in Climate* 3/2021, 13 (14).

⁵⁵ *Seidemann/Müller/Ludwig*, *Weiterentwicklung der Karbonatisierung* (2015).

⁵⁶ *Sereng et al.*, *Applied Sciences* 14/2021, 6571.

zum globalen Ressourcenverbrauch und Emissionsaufkommen beisteuert. Bei der Betrachtung der Gesteinskörnung ergibt sich die Möglichkeit, hierbei in beiderlei Hinsicht die Umweltwirkung von Beton zu verbessern:

1. Zum einen können durch den Ersatz der natürlichen Gesteinskörnung durch rezyklierte, aufbereitete Gesteinskörnungen aus Baurestmassen (z.B. Altbeton) sowie Ausbruch- oder Aushubmaterial natürliche, endliche Ressourcen wie Sand und Kies eingespart werden.
2. Zum anderen bietet sich bei der Verwendung von Altbeton als Gesteinskörnung außerdem die Gelegenheit, diese einer Vorabbehandlung in Form einer CO₂-Be-gasung zu unterwerfen. Dadurch tritt eine Karbonatisierung des im Zementstein enthaltenen Portlandits ein, die neben einer CO₂-Aufnahme zusätzlich zu einer Festigkeitssteigerung der R-Beton-Gesteinskörnung führt. Gleichzeitig muss jedoch die reduzierte Alkalität des Betons bei der Dauerhaftigkeit von Stahlbeton berücksichtigt werden.

Gegenwärtig gibt es zu beiden Aspekten eine intensive Forschungstätigkeit. Daraus gewonnene neue Erkenntnisse und steigende praktische Erfahrung mit Recyclingbeton finden in den nationalen und übernationalen Normungsvorschriften zunehmend Berücksichtigung, wodurch eine bedeutende Verbesserung für einen nachhaltigen Betonbau erzielt werden kann.

AUTOREN

Priv.-Doz. Dipl.-Ing. MMMag. Dr. **Klaus Voit**, B.A.

Assistenzprofessor am Institut für Angewandte Geologie (IAG)
Universität für Bodenkultur Wien

Peter-Jordan-Straße 82

1190 Wien

klaus.voit@boku.ac.at

Dipl.-Ing. **Johannes Hron**

Universitätsassistent am Institut für Konstruktiver Ingenieurbau (IKI)

Universität für Bodenkultur Wien

Peter-Jordan-Straße 82

1190 Wien

johannes.hron@boku.ac.at

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. phil. Dr. techn. **Konrad Bergmeister**, MSc. Ph.D.

Universitätsprofessor am Institut für Konstruktiver Ingenieurbau (IKI)

Universität für Bodenkultur Wien

Peter-Jordan-Straße 82

1190 Wien

konrad.bergmeister@boku.ac.at