

# GRÜNER BETON



© unsplash.com/K8 Thomas Bayer

## ZUSAMMENFASSUNG

Die Herstellung von herkömmlichem Zement, dem Hauptbestandteil von Beton, verursacht etwa 8 % der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen und verbraucht immense Mengen an natürlichen Ressourcen. Angesichts des steigenden Bedarfs an Beton ist es entscheidend, nachhaltigere Alternativen für die Betonherstellung zu finden. Grüner Beton umfasst verschiedene Ansätze zur Herstellung von umweltfreundlicherem Beton. Dazu gehören: Ersatz von herkömmlichem Zement durch Industrieabfälle wie Flugasche oder Hüttensand, Verwendung von recycelten Materialien im Beton, oder energieeffiziente Herstellungsprozesse. Dazu kommen weitere Innovationen um den Betonbau umweltfreundlicher zu gestalten, wie selbstheilender, 3D-gedruckter oder photokatalytischer Beton, Nutzung elektrifizierter Maschinen sowie Kohlenstoffabscheidung, -nutzung und -speicherung. Die größten Herausforderungen liegen derzeit in der Verfügbarkeit alternativer Materialien und Technologien, bei den Kosten für erneuerbare Energien und recycelte Materialien und bei fehlenden Anreizen und Förderungen für die Verwendung von grünem Beton.

*Beton muss nachhaltiger werden*

## ÜBERBLICK ZUM THEMA

Beton ist, aufgrund der vielen Anwendungsbereiche, nach Wasser das am zweithäufigsten verbrauchte Material auf der Erde, mit einer weltweiten Produktion von etwa 4,1 Milliarden Tonnen Zement im Jahr 2021 und einem jährlichen Betonverbrauch, der etwa siebenmal höher ist (Nilimaa, 2023). Die Betonindustrie steht unter zunehmendem Druck, große Schritte in Richtung Nachhaltigkeit zu setzen, denn die Herstellung von gewöhnlichem Portlandzement, dem Hauptbindemittel von Beton, trägt mit etwa 8 % zu den weltweiten, vom Menschen verursachten Kohlendioxidemissionen bei. Darüber hinaus verbraucht die Herstellung von Beton immense natürliche Rohstoffvorkommen. Um den Bedarf an Infrastrukturen zu decken, werden in den kommenden Jahren voraussichtlich Milliarden Tonnen Beton hergestellt werden müssen, deshalb ist es entscheidend, die Betonherstellung umweltfreundlicher zu gestalten (Sivakrishna et al., 2020).

*Beton verursacht etwa 8 % der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen*

Neben Wasser und Sand oder Kies ist Zement der Hauptbestandteil von Beton. Bei der konventionellen Zementherstellung wird im ersten Schritt ein Rohstoffgemisch aus feingemahlenem Kalkstein und Ton bei Temperaturen von 1.450 °C zu Portlandzementklinker gebrannt. Im Kalkstein gebundenes CO<sub>2</sub> wird dabei freigesetzt, was etwa zwei Drittel der Gesamtemissionen der Zementherstellung verursacht, ein Drittel entsteht durch den Ofenbetrieb mit fossilen Brennstoffen. Im zweiten Schritt wird der Klinker mit den Zusatzstoffen Kalkstein, Hüttensand, Flugasche und Gips zu Zement gemahlen. Die Zusammensetzung bestimmt Eigenschaften des späteren Betons, wie z. B. Festigkeit, Erstarrungsverhalten und Dauerhaftigkeit (Caviezel et al., 2023).

*Konventionelle Zementproduktion*

Aktuelle Trends im nachhaltigen Betonbau umfassen grünen Beton, zementähnliche Zusatzstoffe, durchlässigen Beton, kühlenden Beton und die Verwendung lokaler und nachhaltiger Materialien. Außerdem wird an Innovationen, wie selbstheilendem Beton, 3D-gedrucktem Beton (siehe [Häuser aus dem 3-D Drucker](#)), selbst- und luftreinigenden Beton, elektrifizierten Maschinen sowie Kohlenstoffabscheidung, -nutzung und -speicherung geforscht (CCUS, siehe [Negativemissionstechnologien](#)) (Nilimaa, 2023).

*Aktuelle Umwelttrends und -innovationen im Betonbau*

Der Begriff *grüner Beton* ist relativ unscharf. Einerseits bezeichnet er den teilweisen Ersatz von Zuschlagstoffen herkömmlichen Zements durch Industrieabfälle wie Flugasche etwa aus Kohlekraftwerken, Hüttensand aus der Stahlproduktion oder Silikastaub. Andererseits werden darunter auch die Verlängerung der Nutzungsdauer von Betonstrukturen, materialeffiziente Bauweisen, die Verwendung recycelter Materialien und recycelten Betons, die allgemeine Verringerung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks oder eine energieeffizientere Herstellung verstanden.

*Grüner Beton ist ein unscharfes Konzept*

Auch bei der Herstellung neuer klinkerarmer Normzemente entsteht unvermeidbar CO<sub>2</sub>, welches teilweise mit einer Absenkung des Klinkeranteils im Zement vermieden werden kann. In Deutschland sind seit 2021 solche neuen Zementarten genormt, die gegenüber dem herkömmlichen Portlandzement den Klinkeranteil auf etwa 35 % halbieren können (Caviezel et al., 2023). Der fehlende Klinker muss durch größere Anteile an Zuschlagstoffen ersetzt werden, was die Zusammensetzung der klinkerarmen Zemente komplexer macht. Außerdem hängen die betontechnischen Eigenschaften (und damit die Anwendungsbereiche) in

*Klinkerarme Zemente mit neuen Ersatzstoffen, wie Flugasche, Hüttensand, Tonminerale oder Biokohle*



immer stärkerem Maße von der Leistungsfähigkeit der verwendeten Zuschlagstoffe ab. Genau diese hochwertigen Zuschlagstoffe könnten in Zukunft aber zu Mangelwaren werden: Hüttensand durch die Transformation der Stahlindustrie und Flugasche als Folge des Ausstiegs aus der Kohleverstromung (Caviezel et al., 2023). Große Hoffnungen werden daher auf neue Zuschlagstoffe wie Tonminerale gesetzt. An der Normierung und Einführung entsprechender Zemente wird derzeit gearbeitet. In Bezug auf ihre Leistungsfähigkeit und die Realisierungsbedingungen für einen Masseneinsatz bestehen allerdings noch offene Fragen (Caviezel et al., 2023). Auch der Zusatz von Biokohle (siehe *Negativemissionstechnologien*) in Beton bringt mehrere Vorteile mit sich, wie z. B. eine verbesserte Festigkeit und Haltbarkeit, verbesserte thermische Eigenschaften und das Potenzial zur längerfristigen Kohlenstoffbindung in Bauteilen (Barbhuiya, Bhusan Das, et al., 2024).

Im Betonrecycling wird schon beim Abriss von Gebäuden auf die sortenreine Trennung geachtet werden, danach werden Betonreste zerkleinert und vom Bewehrungsstahl getrennt, der eingeschmolzen wird. Seit 2024 dürfen in Österreich keine mineralischen Baurestmassen, zu denen Beton gehört, mehr deponiert werden. Altbeton wird daher nahezu vollständig recycelt, allerdings meistens als Downcycling, d. h. etwa als ungebundene Tragschicht im Straßenbau. Werden Betonreste klassiert, d. h. nach Korngröße getrennt, kann das Material als Ersatz für natürlich Gesteinskörnung bei neuem Beton verwendet werden, was erhebliche Ressourcen im Abbau und Transport einspart<sup>1</sup>. Pilotanlagen können bereits aus recyceltem Beton Belit-Zementklinker herstellen, ein hochwertiger Zuschlagstoff für neuen Beton. Entstehende CO<sub>2</sub>-Emissionen werden im Prozess aufgefangen und im Zement wieder gebunden<sup>2</sup>.

Außerdem gibt es verschiedenste Ansätze, Beton mit neuen Eigenschaften zu versehen um ihn bei seiner Verwendung nachhaltiger zu machen. Die Reife der Technologien ist sehr unterschiedlich (Nilimaa, 2023):

- Durchlässiger Beton ist so konzipiert, dass er Wasser durch seine Struktur durchlässt, wodurch der Oberflächenabfluss von Regenwasser verringert und die Grundwasserneubildung gefördert wird. Er könnte eine entscheidende bei der Abschwächung der Auswirkungen städtischer Hitzeinseln spielen, Überschwemmungsrisiken verringert und Wasserqualität verbessern.
- Kühlender Beton enthält reflektierende oder helle Komponenten, die die Oberflächentemperatur von Betonstrukturen senken, um Hitzebelastungen abzuschwächen und den Energieverbrauch von Gebäudekühlung zu verringern.
- Photokatalytische Materialien, wie Titandioxid, verleihen Beton selbstreinigende und luftreinigende Eigenschaften, die in Städten zu besserer Luftqualität beitragen können.
- Ultrahochleistungsbeton (UHPC – Ultra-high-performance concrete), ein zementhaltiger Verbundwerkstoff kann die eingesetzte Materialmenge erheblich verringern, bei gleichzeitiger Verlängerung der Lebensdauer von Bauteilen und Gebäuden.

### *Altbeton-Recycling*

### *Neue Eigenschaften mit Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit von Betonstrukturen:*

*... durchlässiger Beton*

*... kühlender Beton*

*... Luft- und selbstreinigender Beton*

*... Ultrahochleistungsbeton*

<sup>1</sup> [abfallwirtschaft.steiermark.at/cms/dokumente/10024917\\_46569/88d99351/2.3\\_Rec\\_Beton\\_V4.pdf](https://abfallwirtschaft.steiermark.at/cms/dokumente/10024917_46569/88d99351/2.3_Rec_Beton_V4.pdf).

<sup>2</sup> [vdi-nachrichten.com/technik/umwelt/kit-pilotanlage-fuer-klimafreundlichen-zement/](https://vdi-nachrichten.com/technik/umwelt/kit-pilotanlage-fuer-klimafreundlichen-zement/).

- Selbstheilender Beton soll, wie andere *selbstheilende Materialien*, Dauerhaftigkeit und Leistung verbessern, indem Risse und Schäden selbstständig repariert werden, was Inspektion, Wartung und Reparaturen verringert.
  - spezifische Bakterienstämme und Nährstoffe werden zugesetzt, die wenn Feuchtigkeit durch Risse eindringt, beginnen Kalziumkarbonat als Nebenprodukt ihres Stoffwechsels auszuscheiden. Dieses füllt Risse und stellt die strukturelle Integrität des Betons wieder her.
  - Beimischung von Mikrokapseln, die polymere Materialien oder mineralische Verbindungen enthalten. Reißt der Beton, brechen die Kapseln auf, das enthaltene Material dichtet die Risse und härtet aus.
  - Nach einer Verformung, etwa durch Hitze oder andere äußere Einwirkungen, können Polymere mit Formgedächtnis in ihre ursprüngliche Form zurückkehren. Als Fasern in eingebettete Bewehrungen kann Beton sich von Verformungen erholen oder kleine Risse schließen.
  - Superabsorbierende Polymere (SAPs) nehmen große Mengen Wasser auf und geben sie wieder ab. Sie verringern Rissbildung während des Aushärtens und tragen zur Selbstheilung bei, indem sie bei Mikrorissen Wasser freisetzen, welches mit nicht umgesetzten Zementpartikeln Gele bildet, die Risse füllen.

*Selbstheilender Beton:*

*... mit Bakterien*

*... mit Mikrokapseln*

*... mit Formgedächtnis*

*... mit superabsorbierenden Polymeren*

Eine offene Frage bei jeglicher Art von Kompositmaterialien ist die Recyclingfähigkeit.

Generell ist es noch ein weiter Weg zu einem Netto-Null Betonsektor, die größten Herausforderungen lassen sich wie folgt zusammenfassen (Al-Otaibi, 2024; Barbhuiya, Bhusan, et al., 2024):

*Zentrale Herausforderungen für einen Netto-Null Betonsektor*

- *Technisch:* Verfügbarkeit alternativer Energiequellen, Effizienz bestehender Anlagen und das Fehlen klarer Normen für recycelte Materialien.
- *Wirtschaftlich:* wie z.B. nicht-einheitliche CO<sub>2</sub>-Steuern zwischen Ländern oder fehlender Emissionshandel was zur Unterstützung des etablierten kohlenstoffintensiven Systems führt. Kosten und Verfügbarkeit erneuerbarer Energien und recycelter Materialien.
- *Umsetzung:* restriktive Zementnormen, Ausrüstungs- und Betriebsfragen sowie Personalverfügbarkeit und Personalkompetenz.
- *Unterstützung und Förderung:* Mangel an politischer Unterstützung und Anreize für die Verwendung recycelter Materialien im Bauwesen

Aus heutiger Sicht ist das Ziel einer (weitgehend) klimaneutralen Zementindustrie nur mit Hilfe des Einsatzes von CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung bzw. -Nutzung zu erreichen (s. *Negativemissionstechnologien*). CO<sub>2</sub> soll direkt an den Punktquellen, wie Zementwerken, abgefangen und unterirdisch gespeichert werden. Dazu wurde die Österreichische Carbon Management Strategie im Juni 2024 im Ministerrat beschlossen, die unter anderem „die Aufhebung des Verbots der geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung im Bundesgebiet und die zeitgleiche Schaffung des notwendigen Rechtsrahmens für die geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung durch vollumfängliche Umsetzung der EU CCS-Richtlinie“ vorsieht<sup>3</sup>. Auch die Rechtslage für den rohrleitungsgebundenen Transport soll angepasst werden. In der Strategie werden die strengen Sicherheits- und Umweltauflagen betont unter de-

*Verminderung nicht-vermeidbarer Emissionen durch CCUS*

<sup>3</sup> [bmf.gv.at/themen/klimapolitik/carbon\\_management.html](https://bmf.gv.at/themen/klimapolitik/carbon_management.html).

nen CCS umgesetzt werden soll. Weltweit verfolgen etliche Nationen Speicherprojekte, einige davon kommerziell. Da aber sehr lange Lagerzeiten angepeilt werden (mehrere Jahrhunderte, bzw. Jahrtausende) können Unsicherheiten, vor allem in der Frage wie langfristig die Lagerstätten ohne Leck bestehen können nicht ausgeräumt werden (Bashir et al., 2024). An Zementwerken abgeschiedener Kohlenstoff soll auch für die Grundstoffindustrie nutzbar gemacht werden (CCU, siehe *CO<sub>2</sub> als Ressource*).

## RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

In Österreich sind einige Forschungseinrichtungen mit der Entwicklung und Umsetzung von grünem Beton beschäftigt<sup>4</sup>. Insgesamt gibt es österreichweit neun Zementwerke mit betriebsbereiten Ofenanlagen, die etwa 4,4 Mio. Tonnen Zement pro Jahr produzieren (2023)<sup>5</sup>. Einige Unternehmen bieten klimafreundlicheren Beton an, mit CO<sub>2</sub>-Reduktionen nach eigenen Angaben von 10-70% gegenüber dem Branchenstandard<sup>6</sup>, etwa durch Klinkerersatzstoffe und dem Einsatz von Recyclingbeton. Erste Schritte in Richtung Nachhaltigkeit sind mit der Normierung der Beurteilung von Betonprodukten gesetzt, in der Herstellungsphase (von der Wiege bis zum Werkstor) oder dem gesamten Lebenszyklus (von der Wiege bis zur Bahre)<sup>7</sup>.

Einige Ansatzpunkte für die Umsetzung und Förderung eines nachhaltigeren Betonbaus: Einführung und Durchsetzung von Regeln und Anreizen zur Förderung der Nachhaltigkeit; Bildung von öffentlich-privaten Partnerschaften zur gemeinsamen Nutzung von Ressourcen und Verantwortlichkeiten für nachhaltige Projekte; Aus- und Weiterbildungsangebote, um Fachleute mit den notwendigen Kompetenzen auszustatten; Unterstützung von Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen, um nachhaltige Innovationen voranzutreiben; die Durchführung von Pilotprojekten zur Erprobung und Verfeinerung nachhaltiger Praktiken in realen Szenarien (Khan & McNally, 2023).

*Vielfältige  
Ansatzpunkte für  
eine Strategie hin zu  
nachhaltigerem Beton  
in Österreich*

<sup>4</sup> Z. B.: [tu-graz.at/tu-graz/services/news-stories/tu-graz-dossiers/nachhaltig-bauen-mit-beton](https://tu-graz.at/tu-graz/services/news-stories/tu-graz-dossiers/nachhaltig-bauen-mit-beton); [klimaneutralerstadt.at/resources/pdf/schriftenreihe-2024-26-rcc2.pdf](https://klimaneutralerstadt.at/resources/pdf/schriftenreihe-2024-26-rcc2.pdf).

<sup>5</sup> [zement.at/downloads/downloads\\_2024/Emissionen\\_aus\\_Anlagen\\_der\\_%C3%B6sterreichischen\\_Zementindustrie\\_Bilanzjahr\\_2023.pdf](https://zement.at/downloads/downloads_2024/Emissionen_aus_Anlagen_der_%C3%B6sterreichischen_Zementindustrie_Bilanzjahr_2023.pdf).

<sup>6</sup> Z. B.: [wopfinger.com/produkte/oekobetone.html](https://wopfinger.com/produkte/oekobetone.html);  
[rohrdorfer.at/strapi/uploads/Produktfolder\\_Nachhaltige\\_Betone\\_intranet\\_4068a8fe21.pdf](https://rohrdorfer.at/strapi/uploads/Produktfolder_Nachhaltige_Betone_intranet_4068a8fe21.pdf);  
[holcim.at/produkte-services/ecopact](https://holcim.at/produkte-services/ecopact).

<sup>7</sup> [austrian-standards.at/de/shop/onorm-en-16757-2023-05-15-p2660618](https://austrian-standards.at/de/shop/onorm-en-16757-2023-05-15-p2660618).

## VORSCHLAG WEITERES VORGEHEN

Die Überwindung der oben aufgezählten Hindernisse erfordert ein umfassendes Verständnis für die Notwendigkeit den Betonbau nachhaltiger zu machen und damit eine gemeinsame Anstrengung aller Beteiligten in der Bauindustrie. Forschung sollte dringend offene Fragen in Bezug auf nachhaltigeren Betonbau klären. Alle relevanten Stakeholder müssen in die Formulierung klarer Leitfäden und der Verbesserung technischer Normen mitwirken sowie ein größeres Bewusstsein über die Vorteile von grünem Beton schaffen (Al-Otaibi, 2024). Auch kann eine vertiefende Literaturstudie, angereichert durch Expert:inneninterviews zu Nachhaltigkeitsbewertungen einzelner oben angesprochener Technologien eine bessere Entscheidungsgrundlage geben. Eine TA-Studie könnte hier politische Entscheidungsträger:innen unterstützen, gemeinsam mit allen Stakeholdern Schlüsselstrategien zu den oben genannten Punkten zu erarbeiten. Strategien, die entscheidend dazu beitragen könnten den Betonbau umweltfreundlicher zu gestalten.

*Klare Leitfäden,  
verbesserte Normen*

## ZITIERTE LITERATUR

- Al-Otaibi, A. (2024). Barriers and Enablers for Green Concrete Adoption: A Scientometric Aided Literature Review Approach. *Sustainability*, 16(12), 5093.
- Barbhuiya, S., et al. (2024). Biochar-concrete: A comprehensive review of properties, production and sustainability. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e02859, [sciencedirect.com/science/article/pii/S221450952400010X](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221450952400010X).
- Barbhuiya, S., et al. (2024). Roadmap to a net-zero carbon cement sector: Strategies, innovations and policy imperatives. *Journal of Environmental Management*, 359, 121052, [sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479724010387](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479724010387).
- Bashir, A., et al. (2024). Comprehensive review of CO2 geological storage: Exploring principles, mechanisms, and prospects. *Earth-Science Reviews*, 249, 104672, [sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825223003616](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825223003616).
- Caviezel, C., et al. (2023). Alternative Technologiepfade für die Emissionsreduktion in der Grundstoffindustrie - Endbericht zum TA-Projekt (Ergebnisbericht). *Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, Berlin*, [publikationen.bibliothek.kit.edu/1000170905/152949637](https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000170905/152949637).
- Khan, M., & McNally, C. (2023). A holistic review on the contribution of civil engineers for driving sustainable concrete construction in the built environment. *Developments in the Built Environment*, 16, 100273, [sciencedirect.com/science/article/pii/S2666165923001552](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666165923001552).
- Nilimaa, J. (2023). Smart materials and technologies for sustainable concrete construction. *Developments in the Built Environment*, 15, 100177, [sciencedirect.com/science/article/pii/S2666165923000595](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666165923000595).
- Sivakrishna, A., et al. (2020). Green concrete: A review of recent developments. *Materials Today: Proceedings*, 27, 54-58, [sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785319331918](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785319331918).