

Nachhaltige Baustoffe: Beton

Beton ist der wichtigste Baustoff unserer Zeit. Zusammen mit Stahl bildet er das Grundgerüst unserer Bauwerke und der gesamten Gesellschaft. Ohne ihn wären Brücken, Gebäude und Industrieanlagen, die wir für unsere wirtschaftliche Entwicklung brauchen, unmöglich. Was macht ihn nun so wichtig? Er ist sehr druckfest und in Kombination mit Stahl auch zugfest. Dies macht ihn sehr tragfähig für große Bauten. Zusätzlich lässt er sich sehr gut formen, solange er nicht ausgehärtet ist. Dies macht es möglich, viele verschiedene Formen aus Beton herzustellen, indem man ihn einfach in eine Form gießt. Außerdem lassen sich dadurch standardisierte Bauteile einfacher herstellen, für Fertighäuser zum Beispiel. All diese Punkte machen Beton zu einem essenziellen Bestandteil des jetzigen Bauwesens.

Andererseits gibt es auch negative Seiten am Beton. Der Einfluss der Baubranche auf die CO₂-Emissionen und auf die Natur ist schon jetzt immens. Die Betonherstellung allein macht etwa 8 % der weltweiten CO₂-Emissionen aus, in Deutschland etwa 2 %. Im Zuge des Klimaschutzes und der Erderwärmung, wird es immer wichtiger, CO₂-Emissionen zu reduzieren, auch bei der Betonherstellung. Zusätzlich steigt der Bedarf an Beton immer weiter. 2003 bis 2013 hat sich die weltweite Zementproduktion etwa verdoppelt, wie in Abbildung 1 zu erkennen ist. Sie zeigt die globale Zementproduktion von 1926 bis 2023. Es ist zu erkennen, dass ab dem Jahre 2000 die Zementproduktion exponentiell angestiegen ist. (vgl. 1)

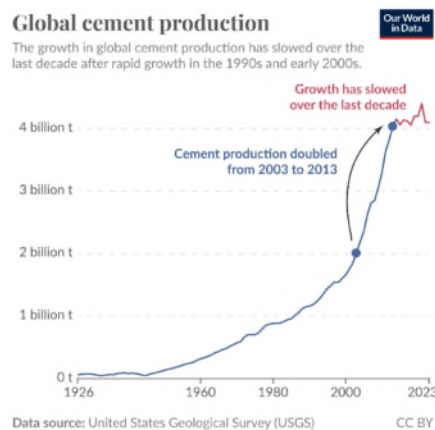


Abbildung 1: Globale Zementproduktion von 1926 bis 2023 (2)

Zusätzlich besteht Beton ausschließlich aus Primärressourcen. Das heißt Ressourcen, die nur in der Natur vorkommen und nicht künstlich hergestellt werden können. Dieser Ressourcenverbrauch ist ein großes Problem.

Es ist also sehr wichtig, Beton nachhaltiger zu gestalten. Wie das möglich ist und welche Ansätze es bereits gibt, werde ich in diesem Aufsatz erörtern.

Beton besteht aus vier Bestandteilen: Sand, Zement, Wasser, Gesteinskörnung (Kies). Mischt man diese im bestimmten Verhältnis zusammen, bekommt man Beton. Ändert man die Größe der Gesteinskörnung oder zum Beispiel den Wassergehalt, so ändert sich die Art des Betons. So kann man ihn an die verschiedenen Verwendungszwecke anpassen. Das Erstarren des Betons wird durch die Hydratation des Zementes ausgelöst. Es bilden sich Calciumsilicathydratkristalle und Calciumhydroxid, welche ein starres Gefüge bilden.

Zement ist also der wichtigste Bestandteil von Beton. Jedoch macht die Herstellung von dem sogenannten Zementklinker etwa 90 % der CO₂-Emissionen von Beton aus. Er besteht im Wesentlichen aus Kalk und Tonmineralen. Diese werden gemahlen und in einem Hochofen bei 1.450°C gebrannt. Danach werden sie gemahlen und der Zement kann zu Beton weiterverarbeitet werden. Dieser Brennprozess stößt CO₂ aus. Zusätzlich werden für die Herstellung Primärrohstoffe genutzt. Beide Probleme kann man durch verschiedene Maßnahmen reduzieren. Schon jetzt werden in den Hochöfen nicht nur fossile Brennstoffe als Brennmaterial verwendet, sondern auch Abfallstoffe wie Autoreifen. So werden fossile Brennstoffe gespart und die Energie, die durch die Verbrennung entsteht, genutzt.

Zement ganz zu ersetzen, ist bis jetzt noch nicht möglich, jedoch können Stoffe mit puzzolanischen Eigenschaften bis zu 20 % des Zements ersetzen. Diese reagieren mit dem entstandenen Calciumhydroxid zu Calciumsilicathydratkristallen und festigen so den Beton erneut. Hier sind schon jetzt verschiedene Materialien wie Hüttensand und Flugasche im Einsatz. Beides sind Abfallprodukte, zum einen aus der Roheisen- und der Kohleproduktion.

Ein weiterer Ansatz, um den Anteil an Zement im Beton zu senken, ist, Abfallglas an seiner Stelle zu verwenden. Bis zu 20 % des Zements kann dadurch ersetzt werden. Das gesammelte Abfallglas wird gemahlen und dem fertigen Zementklinker beigemischt. Auch hier machen dies die puzzolanischen Eigenschaften möglich. In Europa lag die Recyclingrate von Altglas 2017 schon bei 71 %. Das heißt, nur ein geringer Teil des Zements kann mit dem verfügbaren Glas ausgetauscht werden. In anderen Ländern ist die Recyclingrate jedoch viel geringer. Dort ist es eine gute Alternative, das Glas als Zementersatz zu verwenden, bevor es für immer auf einer Deponie lagert. (vgl. 3, 6, 9)

Ein weiteres großes Problem der Betonherstellung ist der hohe Verbrauch von Sand. Sand ist eine Primärressource, die nicht unendlich vorhanden ist. In der Forschung erwartet man einen Anstieg der weltweiten Nachfrage in den nächsten 40 Jahren um 45%. Schon jetzt führt der Abbau von Sand zu großen Problemen. Am einfachsten ist es, Sand aus Flüssen zu entnehmen. Dies führt zu Erosion an den Flussfern, zu einer Veränderung des Flusslaufs und schließlich zu einer Veränderung von vielen verschiedenen Lebensräumen. Es wird jedoch auch Sand von Küsten oder vom Meeresboden entnommen. Dies führt zu Küstenerosion und Landverlust. Des Weiteren muss der Sand aus dem Meer entsalzen werden, da das Salz den Stahl korrodieren kann und er rostet. Diese Entsalzung ist sehr aufwendig, da der Sand mit Süßwasser gewaschen werden muss. Oft wird deshalb Sand importiert, was zu neuen CO₂-Ausstößen führt (vgl. 1).

Sand kann auch manuell hergestellt werden, indem Steine in Brechanlagen zerbrochen werden. Der manuell hergestellte Sand (M-Sand) hat Vorteile gegenüber dem Sand aus Flussbetten und Meeren, denn er kann kontrolliert hergestellt werden. Die Korngröße und Beschaffenheit können je nach Anforderung bestimmt werden. Zum Teil verbessert sich bei der Verwendung von M-Sand in Beton sogar dessen Stärke und Haltbarkeit. Es gibt vier grundlegende Schritte bei der M-Sand Herstellung. Das Zerkleinern, die Überprüfung, das Waschen und die Luftklassifizierung. Bei der Zerkleinerung kommen verschiedene Brecher zum Einsatz, die die Steine zu Körnern gleicher eckiger Form zerkleinern. Während der Überprüfung werden die Körner nach ihrer gewollten Größe sortiert. So wird die Einheitlichkeit gesichert. Durch das Waschen werden verschiedene Unreinheiten und Schlamm entfernt. Bei dem letzten Schritt wird der Staub entfernt und der M-Sand ist fertig zur Weiterverarbeitung.

Je nach Gesteinsart können verschiedene M-Sande mit unterschiedlichen Eigenschaften hergestellt werden. (vgl. 4, 5, 10)

Wenn alte Gebäude abgerissen werden, um Platz zu schaffen, fallen große Mengen an Bauschutt an. Damit der Bauschutt nicht auf einer Deponie landet, sondern recycelt werden kann, muss er getrennt werden. Der reine Beton kann zehrmahlen werden. Dabei entstehen verschiedene Produkte, die erneut zur Betonherstellung verwendet werden können. Recyceltes Betonpulver (RCP) ist eins dieser Produkte. Je nachdem, wie lange den Beton gemahlen wird, entstehen unterschiedliche Größen des Pulvers. Ab einem Durchmesser kleiner als 0,15mm kann das recycelte Betonpulver bis zu 25% des Zementes im Beton ersetzen. Das zweite Produkt des Betonrecyclings ist die Gesteinskörnung (Waste Coarse/Fine Aggregate). Dies sind der Kies und Schotter, die dem Beton zugemischt wurden. Bei der Zerkleinerung trennen sich diese von dem Betonpulver (Zement) und es bleibt die Gesteinskörnung übrig. Die Gesteinskörnung kann nun wieder in neuem Beton verwendet werden.

Es können auch hier nicht 100 % der Gesteinskörnung durch „recycled concrete aggregates“ (RCA) ersetzt werden, da diese die Eigenschaften und die Zusammensetzung des Betons beeinflusst. Natürliche Gesteinskörnung ist eckig mit glatten Seiten. Das RCA hingegen ist durch den noch am Stein klebenden Zement abgerundet. Dies verbessert zwar die Verarbeitbarkeit des Betons, da so der nasse Zement besser um die Gesteinskörnung fließen kann, jedoch ist die Dichte des fertigen Betons niedriger. Zusätzlich sind die Porosität und die Wasserabsorption höher. Aus diesem Grund ist die Anwendung von RCA oft limitiert, vor allem bei tragenden Betonteilen. Testet man Beton mit RCA auf seinen Abrieb, so wird deutlich, dass durch den angehefteten Alt-Zement mehr feine Partikel abbrechen. Auch dies zeigt eine Schwäche auf. Des Weiteren lässt sich sagen, dass sich die Druckfestigkeit des Betons bei einer Verwendung von RCA von bis zu 30% und gleichem Wasser-Beton-Verhältnis nicht signifikant verschlechtert. RCA kann sogar mehr Wasser speichern und dieses im Laufe der Trocknungsphase an den neuen Zement abgeben, wodurch die Stärke des Betons verbessert werden kann. Die Zugfestigkeit des Betons verbessert sich sogar, wenn man RCA nutzt. Denn die runde Form des Aggregats generiert einen reibungsloseren Übergang zwischen Zement und Gesteinskörnung.

Eine weitere Methode des Betonrecyclings ist das Frischbeton-Recycling. Auch dieses wird heutzutage schon angewandt. Wird Beton in einem Mischauto gemischt, bleiben nach dessen Nutzung immer noch Reste an Frischbeton zurück. Um nun die Gesteinskörnung zu recyceln, wird diese mit Wasser abgewaschen. So kann sie erneut wiederverwendet werden. (vgl. 6, 7, 8, 11)

Im Zuge des Klimawandels und der steigenden Nachfrage nach Ressourcen, ist es sehr wichtig, dass die Wissenschaft neue Methoden erforscht, um Beton nachhaltiger zu machen. Von den beschriebenen Methoden werden schon heute sehr viele eingesetzt, zum Beispiel das Recycling von Altbeton, M-Sand und Glas als Zementklinker Ersatz. Jedoch sind viele der Maßnahmen sehr energieintensiv und verbrauchen trotzdem Primärressourcen. Glas wird aus Sand hergestellt und kann eigentlich unendlich oft wieder eingeschmolzen und neu verwendet werden. In Ländern, bei denen die Recyclingrate von Glas eh sehr hoch ist, zum Beispiel Deutschland oder Japan, macht es wenig Sinn, Glas als Zementklinker-Ersatz als nachhaltige Alternative anzusehen. Es ist viel besser, die Recyclingrate noch weiter anzuheben, sodass kein Glas mehr durch die Benutzung in Beton „verloren“ geht. In Ländern, bei denen die Recyclingrate noch nicht sehr hoch ist, ist es wichtiger, dies zu ändern. Jedoch sollte, solange dieser Prozess läuft, das Glas lieber in Beton verwendet werden, als dass es auf eine Deponie oder in die Natur wandert. Aus diesen Gründen denke ich nicht, dass die Verwendung von Glas in Beton eine gute Lösung des Nachhaltigkeitsproblems ist. Auch bei den anderen Stoffen, mit denen man Zementklinker ersetzen kann, spezifisch Flugasche und Hüttensand, gibt es ähnliche Probleme. Beide sind Abfallprodukte aus sehr energieintensiven Verfahren, der Müllverbrennung und der Roheisenherstellung. Wird die Müllverbrennung immer effizienter oder wird die Müllmenge aus Gründen der Nachhaltigkeit immer weniger, gibt es auch weniger Flugasche für die Betonherstellung. Genauso ist es bei der Roheisenproduktion. Wird der Stahl in Stahlbeton durch Carbon ausgetauscht, sinkt auch die Menge an Hüttensand. Aus diesen Gründen denke ich, dass es zwar gut ist, dass diese Abfallprodukte genutzt werden, diese jedoch kein Zukunftspotenzial haben.

Es ist natürlichste wichtig, Maßnahmen zu treffen, um den Sandverbrauch zu reduzieren. Mögliche Lösungen wären es, Gebäude langlebiger zu gestalten und die Bauweise so zu ändern, dass weniger Sand verbraucht wird. Es ist vor allem wichtig, dabei auf regenerative Ressourcen zurückzugreifen, zum Beispiel auf Holz. Kombiniert man Holz und Beton, kann dadurch Beton gespart werden. Jedoch können diese Praktiken nicht überall auf der Welt implementiert und erwartet werden. In Entwicklungsländern, in denen viele Menschen noch in Armut leben, kann man und sollte man nicht von den Menschen erwarten, dann auch noch nachhaltig zu bauen. Viel wichtiger ist es, dass Länder wie China, die USA oder auch Europa verschiedene Praktiken entwickeln und implementieren. M-Sand ist eine sehr gute Alternative zu natürlichem Sand. Jedoch ist dessen Produktion auch sehr energieintensiv. Dort ist es besonders wichtig, keine fossilen Energieträger zu nutzen, sondern den Sand mittels erneuerbarer Energien herzustellen. Dies senkt auch den CO₂-Ausstoß. Eine solche Lösung muss vor allem in Entwicklungsländern gefördert werden, damit auch dort die Menschen und die Natur davon profitieren.

Wichtig ist es auch, die Wiederverwendung von Altbeton weiter auszubauen. Auch dies setzt voraus, dass erneuerbare Energien bei der Herstellung von RCP und RCA verwendet werden.

Die Möglichkeiten, die es heutzutage schon gibt, Beton nachhaltiger herzustellen, sind zwar gut und wichtig, jedoch nicht ausreichend. Der Bedarf an Beton wird immer weiter steigen. Deswegen ist es essenziell, dass die Wissenschaft neue Methoden oder sogar eine neue Art von Beton entwickelt. Nur so können die Probleme der Ressourcenknappheit und des Klimawandels gelöst werden.

Viel wichtiger ist es jedoch, dass diese Maßnahmen nicht nur in europäischen Ländern eingesetzt werden, sondern weltweit. Dies wird sich meiner Meinung nach als sehr schwer erweisen, da es viel günstiger ist, Beton klassisch herzustellen, als auf Nachhaltigkeit zu achten. Solange nicht die Regierungen die Wirtschaft mittels Gesetzen zwingen werden, nachhaltiger zu arbeiten, werden nur wenige kleine Fortschritte im Kampf gegen den Klimawandel und für den Umweltschutz gemacht.

- (1) Akhtar, Mohammad Nadeem; Bani-Hani, Khaldoon A.; Malkawi, Dima A.Husein; Albatayneh, Omar (2024): Suitability of sustainable sand for concrete manufacturing - A complete review of recycled and desert sand substitution. In: *Results in Engineering* 23, S. 102478. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102478.
- (2) [Global cement production has plateaued over the last decade - Our World in Data](#)
- (3) Harrison, Edward; Berenjian, Aydin; Seifan, Mostafa (2020): Recycling of waste glass as aggregate in cement-based materials. In: *Environmental Science and Ecotechnology* 4, S. 100064. DOI: 10.1016/j.ese.2020.100064.
- (4) Bhoopathy, Vijaya; Subramanian, Senthil Selvan (2022): The way forward to sustain environmental quality through sustainable sand mining and the use of manufactured sand as an alternative to natural sand. In: *Environ Sci Pollut Res* 29 (21), S. 30793–30801. DOI: 10.1007/s11356-022-19633-w.
- (5) Elavenil, Dr.S.; Vijaya, B. (2013): Manufactured Sand, a Solution and an Alternative to River Sand in Concrete Manufacturing.
- (6) Kaboré, Mohamed Wendlassida; Perrin, Didier; Idir, Rachida; Lenny, Patrick; Garcia-Diaz, Éric; El Bitouri, Youssef (2025): A Review on the Valorization of Recycled Glass Fiber-Reinforced Polymer (rGFRP) in Mortar and Concrete: A Sustainable Alternative to Landfilling. In: *Polymers* 17 (19). DOI: 10.3390/polym17192664.
- (7) McNeil, Katrina; Kang, Thomas H.-K. (2013): Recycled Concrete Aggregates: A Review. In: *Int J Concr Struct Mater* 7 (1), S. 61–69. DOI: 10.1007/s40069-013-0032-5.
- (8) Oikonomou, Nik.D. (2005): Recycled concrete aggregates. In: *Cement and Concrete Composites* 27 (2), S. 315–318. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2004.02.020.
- (9) Qaidi, Shaker; Najm, Hadee Mohammed; Abed, Suhad M.; Özkılıç, Yasin Onuralp; Al Dughhaishi, Husam; Alost, Moad et al. (2022): Concrete Containing Waste Glass as an Environmentally Friendly Aggregate: A Review on Fresh and Mechanical Characteristics. In: *Materials (Basel, Switzerland)* 15 (18). DOI: 10.3390/ma15186222.
- (10) Rathore, Yash; Raheem, Juned (2025): The Evolution, Characteristics, and Potential of Manufactured Sand in Concrete: A Short Review. In: *Natl. Acad. Sci. Lett.*, S. 1–7. DOI: 10.1007/s40009-025-01624-3.

- (11) Ruth Bola Oliveira, Dayana; Leite, Gabriela; Possan, Edna; Marques Filho, José (2023): Concrete powder waste as a substitution for Portland cement for environment-friendly cement production. In: Construction and Building Materials 397, S. 132382. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132382.