

Bewährtes neu denken

vdz

Ressourcen der Zukunft für Zement und Beton – Potenziale und Handlungsstrategien

Ressourcen der Zukunft für Zement und Beton

Schonung natürlicher Ressourcen entlang der Wertschöpfungskette von Zement und Beton – Zusammenfassung und Ergebnisse	4
--	----------

1	
Ressourcenschonung in der Zement- und Betonherstellung – Einführung	10

2	
Technologien und Innovationen für eine ressourcenschonende Betonbauweise	14

- 2.1 Herstellung und Anwendung von Zement und Beton
 - 2.2 Verringerung des Rohstoffbedarfs entlang der Wertschöpfungskette
 - 2.3 Klinker: Betonbrechsande und Brennstoffaschen
 - 2.4 Zement: Ressourcenschonende Rohstoffalternativen und klinkereffiziente Zemente
 - 2.5 Beton: Ressourceneffizienz, Wiederverwendung und Recycling
-

3	
Potenziale zur Schonung natürlicher Ressourcen – Szenario 2050	32

- 3.1 Bilanzgrenzen
 - 3.2 Ergebnisse und Bewertung
 - 3.3 Rohstoffbedarf der Zukunft
-

4	
Handlungsstrategien und Voraussetzungen für eine ressourcenschonende Betonbauweise	38

- 4.1 Nachhaltiges Stoffstrommanagement
 - 4.2 Entstehung grüner Leitmärkte
 - 4.3 Kommunikation und Qualifizierung
 - 4.4 Sicherung primärer Rohstoffe
-

Literaturverzeichnis	48
-----------------------------	-----------

Abbildungsverzeichnis	52
------------------------------	-----------

Schonung natürlicher Ressourcen entlang der Wertschöpfungskette von Zement und Beton

Zusammenfassung und Ergebnisse

Zusammenfassung und Ergebnisse

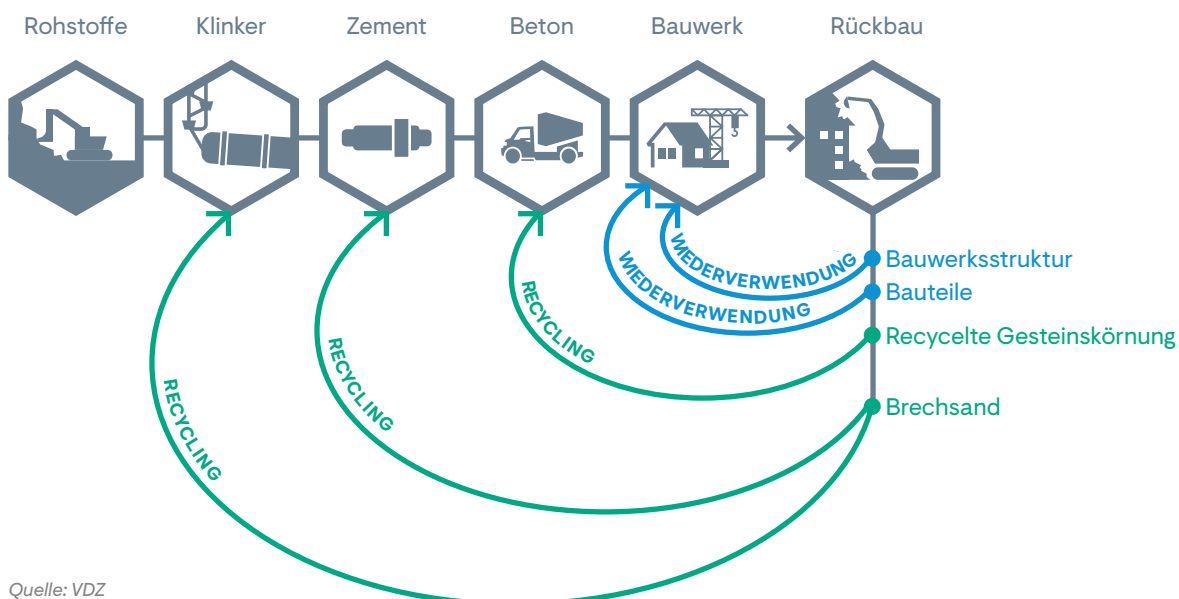
Neben dem Klima- und Artenschutz gehört die Schonung natürlicher Ressourcen zu den großen ökologischen Herausforderungen unserer Zeit. Die vorliegende Studie unterstreicht daher den Anspruch der Zementhersteller in Deutschland, den Primärrohstoffeinsatz der Wertschöpfungskette von Zement und Beton weiter deutlich zu reduzieren, u.a. indem bestehende Stoffkreisläufe ausgebaut und ganz neue erschlossen werden (Abbildung 1).

Beim Rohstoffbedarf kann zwischen mineralischen und biotischen Rohstoffen sowie fossilen Energieträgern unterschieden werden. Neben Energiewirtschaft und Industrie ist der Bausektor größter Nutzer von Rohstoffen und trägt damit eine besondere Verantwortung für deren Schonung. Zement und Beton spielen hierbei eine wichtige Rolle, denn ohne sie ist der Bau von Wohnungen, Industriebauwerken, Brücken, Tunneln, Schleusen bis hin zu Windkraftanlagen und Energienetzen nicht denkbar. Auf die Herstellung von Zement und Beton entfallen jährlich etwa ein Fünftel der in Deutschland eingesetzten Primärrohstoffe (ca. 236 Mio. t). Hierzu gehören neben einer geringen Menge fossiler Brennstoffe vor allem mineralische Rohstoffe wie Kalkstein als wesentlicher Baustein des Zements,

aber auch Kies, Sand und Naturstein, aus denen zusammen mit Wasser, Zement sowie weiteren Zusatzstoffen und -mitteln Beton entsteht.

Im Bewusstsein dieses Ressourcenbedarfs befassen sich die deutschen Zement- und Betonhersteller unter dem Dach des VDZ und der European Cement Research Academy (ECRA) bereits seit Langem mit der Frage, wie die Baustoffherstellung mit weniger natürlichen Ressourcen auskommen kann. So decken alternative Rohstoffe heute fast ein Fünftel des Ressourcenbedarfs der in Deutschland produzierten Zemente, wodurch jährlich rund 10 Mio. t Kalkstein als primärer Rohstoff eingespart werden. Die vorliegende Studie betrachtet und quantifiziert weitere ambitionierte Minderungspotenziale für die Ressourcennutzung. Im Vordergrund der Analyse stehen dabei Maßnahmen zur Schonung natürlicher Ressourcen bei der Herstellung von Klinker, Zement und Beton. Gleichzeitig werden auch weitere Potenziale berücksichtigt, die sich z.B. aus neuen Verfahren der Bauausführung sowie über eine verlängerte Nutzungsdauer von Bauwerken ergeben. Neben den rein technischen Fragestellungen identifiziert die vorliegende Studie auch externe Voraussetzungen für eine erfolgreiche Transformation der Industrie und benennt konkrete Handlungsfelder.

Abbildung 1: Stoffkreisläufe entlang der Wertschöpfungskette von Zement und Beton



Quelle: VDZ

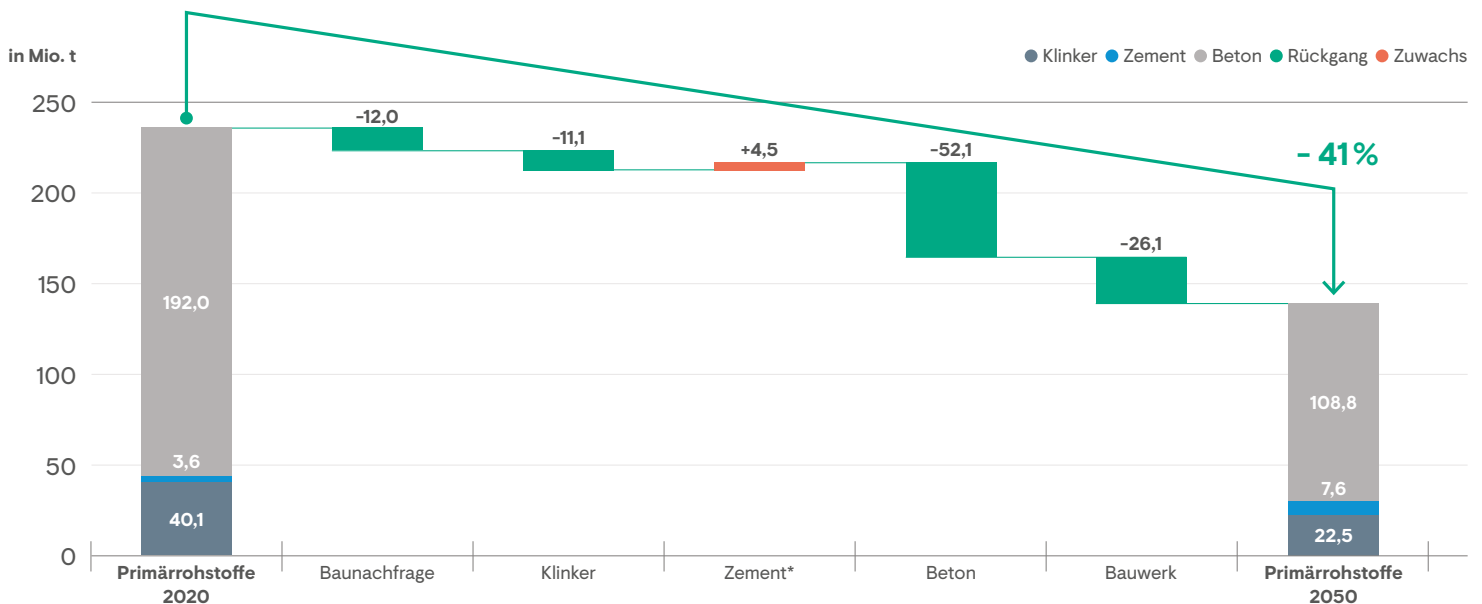
Ressourcenschonende Zemente und Betone – Szenario 2050

Die in dieser Studie betrachteten Maßnahmen führen im Szenario 2050 insgesamt zu einer Minderung des Primärrohstoffeinsatzes entlang der Wertschöpfungskette von Zement und Beton um insgesamt 96,8 Mio. t im Jahr 2050, was einer **Reduktion um -41 %** gegenüber 2020 entspricht (Abbildung 2). Die größten Potenziale ergeben sich in der **Betonherstellung** (-52,1 Mio. t), indem ein signifikanter Teil der natürlichen Gesteinskörnung im Beton (Kies, Sand, Naturstein) künftig durch Recycling-Gesteinskörnungen ersetzt wird. Diese sind das Produkt aus der Aufbereitung von Beton- und Mauerwerksbruch, der beim Rückbau und Abriss von Bauwerken entsteht. Bei diesem Prozess fallen auch Feinfraktionen des Altbetons, sogenannte Betonbrechsande („Recyclingmehle“), an, die einerseits als Bestandteil im Zement, andererseits in gewissem Umfang als Rohmehlsubstitut im Klinkerbrennprozess zum Einsatz kommen. Im Szenario 2050 können durch die genannten Maßnahmen mehr als 4 Mio. t Kalkstein in der **Klinker- und Zementproduktion**

ersetzt werden. Gleichwohl gibt es insbesondere bei der Zementherstellung auch **gegenläufige Effekte**, die einen größeren Einsatz bestimmter primärer Rohstoffe erfordern. Dies sind vor allem Kalkstein und calcinierte Tone, um den Klinkergehalt im Zement zu reduzieren. Ein Grund sind die bis 2050 sinkenden Hüttensandmengen infolge der geplanten Umstellung der Roheisenproduktion auf das wasserstoffbasierte Direktreduktionsverfahren. Zudem dürfte im Lichte des Kohleausstiegs auch Flugasche für Zement und Beton nicht mehr zur Verfügung stehen. Die zukünftig entfallenden Mengen an REA-Gips¹ für die Zementherstellung werden durch verstärktes Recycling von Gipsabfällen abgedeckt.

Auf **Bauwerksebene** ermöglichen die Weiterentwicklung der Betonbauweise und die Verlängerung der Bauwerksnutzungsdauer im Szenario 2050 eine Einsparung von 26,1 Mio. t natürlicher Rohstoffe. Hierbei spielt u.a. eine entsprechend materialeffizientere Gebäudeplanung eine wichtige Rolle. Zudem wird angenommen, dass verstärkt Bauweisen zum Einsatz kommen, die mit einem geringeren Betonvolumen eine vergleichbare Leistungsfähigkeit erzielen.

Abbildung 2: Ressourcenschonung entlang der Wertschöpfungskette im Szenario 2050



Quelle: VDZ

Anmerkung:

* Umfasst primäre Hauptbestandteile und Sulfatträger; Klinker wird separat betrachtet.

1 REA-Gips = Gips aus der Rauchgasentschwefelung in Kohlekraftwerken





Über das Jahr 2050 hinaus werden weitere Potenziale gesehen, indem durch modulare Bauweisen die Wiederverwendung von Bauteilen oder ganzer Bauwerksstrukturen gestärkt wird.

Als externer Effekt wurde infolge von Prognosen im Szenario 2050 ein leichter Rückgang der **Baunachfrage** als Minderungsbeitrag berücksichtigt (-12,0 Mio. t) [1]. Brennstoffe werden in diesem Szenario nicht betrachtet, da sie einen vergleichsweise geringen Anteil an den eingesetzten Materialien ausmachen. Es wird davon ausgegangen, dass die heute in Teilen noch eingesetzten fossilen Brennstoffe bis 2050 durch alternative Brennstoffe und Wasserstoff zu 100 % substituiert werden. In Summe dürfte der hieraus resultierende Materialeinsatz in einer ähnlichen Größenordnung liegen wie zum jetzigen Zeitpunkt (ca. 5 Mio. t, davon ca. 0,2 Mio. t Wasserstoff). Ebenfalls nicht im Szenario betrachtet wurde der Einsatz von Wasser für die Betonherstellung. Hier kann von einem rückläufigen Einsatz ausgegangen werden, der u.a. mit dem zunehmenden Marktanteil von klinkereffizienten Zementen einhergeht. Mit sinkendem Klinkergehalt werden die Fälle zunehmen, in denen der Wasser/Zement-(w/z)-Wert abgesenkt werden muss, um adäquate Betoneigenschaften zu erzielen.

Ressourcenschonung – Voraussetzungen und Handlungsfelder

Um die in dieser Studie dargestellten Potenziale zur Schonung natürlicher mineralischer Rohstoffe

zu realisieren, bedarf es in allen Stufen des Bauprozesses künftig eines viel ausgeprägteren Bewusstseins und Knowhows im Hinblick auf Dauerhaftigkeit, Materialeffizienz, Wiederverwendung und Recycling. Die Art und Weise, wie geplant, ausgeschrieben, beschafft und gebaut wird, ist hieran konsequent auszurichten. Eine effiziente und erfolgreiche Kreislaufwirtschaft im Hoch- wie im Tiefbau erfordert ein **gemeinsames Handeln von allen Baubeteiligten** und ein Denken in Stoffströmen aus einer Lebenszyklus-Perspektive über die gesamte Wertschöpfungskette (Abbildung 1). Der **Kommunikation im Planungs- und Bauprozess** kommt eine entscheidende Bedeutung zu, weil kaum eine Maßnahme zur Ressourcenschonung in einem Bereich der Wertschöpfungskette ohne Auswirkung auf einen anderen Bereich bleibt. Es gilt dabei auch, ganz neue Wege im Sinne eines achtsameren Umgangs mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen zu gehen.

Die Schonung natürlicher Ressourcen bei der Zement- und Betonherstellung basiert neben einer höheren Materialeffizienz und der Wiederverwendung von Bauteilen vor allem auf dem umfassenden Einsatz von Recycling-Baustoffen. Hierzu sind **geeignete Stoffströme zu identifizieren und zu mobilisieren**. Dem **Urban Mining**, der systematischen Bewirtschaftung des anthropogenen Rohstofflagers, kommt hierbei eine zentrale Rolle zu. So gilt es, in neuen wie bestehenden Bauwerken die Baustoffe sowie ihre Bestandteile und Einbauweisen, z.B. mittels Ressourcenpässen, zu dokumentieren. Die Digitalisierung des Planens und Bauens sowie die Anwendung von

Building Information Modeling (BIM) werden hierfür essentiell sein.

Um anthropogene Rohstofflager effizient nutzen zu können, müssen u.a. Aufbereitungsverfahren weiterentwickelt werden, wie beispielsweise die elektrodynamische Fragmentierung oder sensorbasierte Ansätze zur Sortierung von Massenströmen.

Analog zu natürlichen Rohstoffen wie Kalkstein, Kies und Naturstein benötigen Zement- und Betonhersteller eine kontinuierliche Versorgung mit Recycling-Baustoffen. Wesentliche Voraussetzung hierfür ist, dass **urbane Räume als Zentren der Baustoffaufbereitung** etabliert werden. Nur so können kurze Transportwege gewährleistet werden, die einen großen Einfluss auf Wirtschaftlichkeit und ökologische Effizienz des Recyclings haben.

Neben dem Recycling von Stoffen wird auch eine Wiederverwendung von Bauteilen zur Ressourcenschonung beitragen. Kurzfristige Potenziale können gehoben werden, indem gebrauchte Bauteile auf entsprechenden digitalen Plattformen erfasst werden. Es wird zudem darauf ankommen, Bauwerke so zu konstruieren, dass eine Demontage der einzelnen Bestandteile erleichtert wird.

Ein weiteres zentrales Handlungsfeld stellt die **Förderung der Nachfrage nach ressourcenschonendem Bauen** dar. Für das Betonrecycling liegen bereits heute die entsprechenden Regelwerke vor, bislang werden in Deutschland jedoch weniger als 1 % der insgesamt eingesetzten Gesteinskörnungen

im Beton durch Recycling-Material abgedeckt. Um diesen Anteil zu erhöhen, sind einerseits Hemmnisse abzubauen, aber auch Anreize für deren Einsatz zu setzen.

Das Abfallrecht sowie auch die teils negative Wahrnehmung von Recycling-Baustoffen können derzeit als ein Hemmnis für deren Einsatz gesehen werden. Um hier Abhilfe zu schaffen, sollten **Recycling-Gesteinskörnungen** künftig unmittelbar nach ihrer Herstellung nicht mehr als Abfall, sondern als Produkt gelten (**Produktstatus**). Auch beim Umgang mit potenziellen Schadstoffen in Recycling-Materialien gilt es, Regelwerke so auszugestalten, dass Recycling-Materialien gegenüber Primärrohstoffen nicht benachteiligt werden. Letztlich ist dabei ein Ausgleich zwischen dem Schutz von Gesundheit, Boden und Grundwasser einerseits und der Verwendung von Recycling-Gesteinskörnungen bzw. -Baustoffen andererseits anzustreben.

Zur **Förderung des Einsatzes von Recycling-Baustoffen** kommt der **öffentlichen Hand eine wichtige Rolle** zu. Als größte Nachfrager von Bauleistungen können Bund, Länder und Kommunen diese gezielt anfordern und so eine Vorbildwirkung für private Akteure entfalten. Eine bevorzugte Verwendung von Recycling-Baustoffen oder ggf. auch geografisch differenzierte Recyclingquoten in Ausschreibungen unter Berücksichtigung lokaler Verfügbarkeiten können dabei ein effektives Instrument zur Initialisierung erster Absatzmärkte sein. Für Planer und Bauherren ist es dabei wichtig, dass transparente Informationen über Baustoffe

Abbildung 3: Voraussetzungen und Handlungsfelder für eine ressourcenschonende Betonbauweise



Quelle: VDZ



mit Recyclinganteilen zur Verfügung stehen. **Zertifizierung und Labeling** müssen eine größere Rolle spielen und der Ressourcenschonung ein höheres Gewicht beimessen.

Die Schonung natürlicher Ressourcen kann nur gelingen, wenn alle Beteiligten der Wertschöpfungskette zusammen an Lösungen arbeiten. Somit kommt der **Kommunikation zwischen Zement- und Betonherstellern, Planern, Architekten, Bauherren sowie Bau- und Recyclingindustrie** eine herausragende Bedeutung zu. Im Dialog gilt es, ein gegenseitiges Verständnis für die jeweiligen Herausforderungen und Möglichkeiten des effizienteren Materialeinsatzes, der Wiederverwendung und des Recyclings von Bauteilen/-stoffen zu entwickeln.

Gemäß der vorliegenden Studie kann unter optimalen Bedingungen der Primärrohstoffbedarf der Zement- und Betonherstellung um rund 41 % reduziert werden. Im Umkehrschluss bedeutet dies dennoch, dass selbst in einer sehr ambitionierten

Kreislaufwirtschaft in 2050 natürliche Ressourcen weiterhin den Großteil des Rohstoffbedarfs für Zement und Beton decken werden. Der Rohstoffmix der Zukunft wird sich demnach in zunehmendem Maße aus Recycling-Materialien, wiederverwendeten Bauteilen und Bauwerksstrukturen, aber weiterhin auch maßgeblich aus den aus natürlichen Vorkommen gewonnenen Mineralien wie Kalkstein, Kies, Sand, Naturstein, Ton und Gips zusammensetzen. Somit bleibt die **Sicherung heimischer Rohstofflagerstätten ein weiteres zentrales Handlungsfeld**, das für die Zement- und Betonherstellung eine existenzielle Grundlage darstellt. Im gemeinsamen Dialog zwischen Politik, Wirtschaft und Gesellschaft gilt es, die Bedeutung heimischer Rohstoffe auch bei einem wachsenden Einsatz von Recycling-Materialien zu verdeutlichen. Denn nur durch die Gewinnung von Rohstoffen vor Ort können wichtige politische Ziele, wie der Ausbau der erneuerbaren Energien und nachhaltiger Verkehrsinfrastrukturen oder die Schaffung bezahlbaren Wohnraums, erreicht werden.

1

Ressourcenschonung in der Zement- und Betonherstellung

Einführung

Ressourcenschonung in der Zement- und Betonherstellung – Einführung

Bis 2050 wird die Weltbevölkerung auf bis zu 10 Mrd. Menschen anwachsen [2]. Ein immer größerer Anteil der Menschheit wird mehr Wohlstand erfahren und damit mehr Güter und Dienstleistungen nachfragen. Das Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) schätzt, dass bis 2050 jährlich ca. 140 Mrd. t natürliche Ressourcen in Anspruch genommen werden, sofern sich der Konsum nicht verringert [3]. Gegenüber 1980 entspräche das fast einer Verdreifachung. Um die Nachfrage nach natürlichen Ressourcen nachhaltig zu bedienen, reicht das Angebot unseres Planeten nicht aus.

Vor diesem Hintergrund muss es auf dem Weg in eine nachhaltige Zukunft gelingen, den Ressourceneinsatz vom Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum zu entkoppeln. Erreichen lässt sich dieses Ziel nur durch eine absolute Verringerung der Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen, z.B. durch den Ausbau der Kreislaufwirtschaft und eine höhere Ressourceneffizienz. Intelligentere, materialsparendere, recyclingfähige Produktdesigns und die Wiederverwendung von Produkten, aber auch Abfälle und industrielle Nebenprodukte als wertvolle alternative Ressourcen rücken dabei vermehrt in den Vordergrund. Im Unterschied zum Klimaschutz und dem Ziel einer CO₂-freien Gesellschaft wird man allerdings bei der Reduzierung des Ressourceneinsatzes an Grenzen stoßen. Schließlich werden die verschiedenen Rohstoffe auch in Zukunft als wichtige Ausgangsstoffe benötigt, um Produkte, Bauwerke, Prozesse und Infrastrukturen zu ermöglichen, die nicht zuletzt ihrerseits auch die Voraussetzung für eine klimaneutrale Kreislaufwirtschaft darstellen.

Obgleich die Schonung von Ressourcen gesellschaftlich in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen hat, gibt es bislang keine konkrete Zielstellung, die mit dem 1,5 Grad-Ziel aus dem Pariser Klimaschutzabkommen gleichzusetzen wäre. Gleichwohl steht die Ressourcenschonung international, europäisch und national auf der politischen Agenda. Die Vereinten Nationen haben sich in ihren bis 2030 angelegten Sustainable Development Goals zum Ziel gesetzt, nachhaltige Konsum- und Produktionsstrukturen zu schaffen [4]. Ferner befassen sich die Staaten der G7 sowie der G20 in ihrer G7 Alliance on

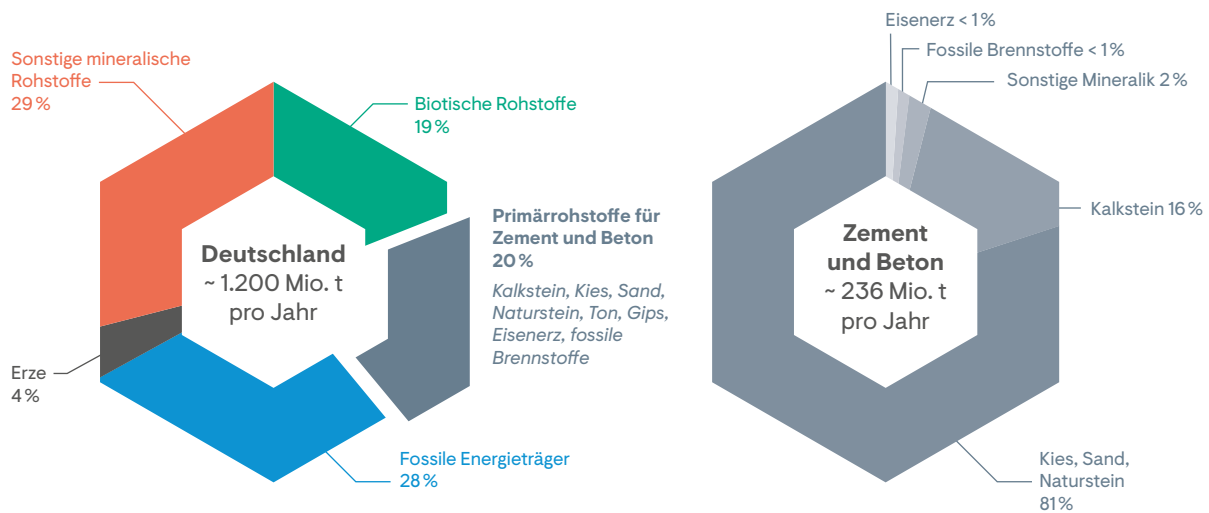
Resource Efficiency [5] bzw. dem G20 Resource Efficiency Dialogue [6] mit der Frage der Ressourcenschonung.

Auch die Europäische Union (EU) hat die Schaffung einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft zu einem ihrer zentralen Ziele erhoben. Maßgebliche politische Programme und Richtlinien auf europäischer Ebene sind u.a. der neue EU-Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft sowie die EU-Abfallrahmenrichtlinie (AbfRRL), die mit ihrer fünfstufigen Abfallhierarchie den Grundsatz „Abfallvermeidung vor Wiederverwendung vor Entsorgung“ verankert (vgl. Art. 4 Abs. 1 AbfRRL). In Deutschland wurde die Richtlinie durch das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) in nationales Recht übertragen. Zusammen mit anderen Fachgesetzen, wie der Ersatzbaustoff- oder der Gewerbeabfallverordnung, werden Anforderungen definiert, um u.a. Siedlungsabfälle oder Bau- und Abbruchabfälle möglichst derart zusammenzutragen, dass sie als Rohstoffe in verschiedenen Herstellungsprozessen wieder einsetzbar sind. Flankiert wird dies vom Deutschen Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess) [7] sowie von der Rohstoffstrategie der Bundesregierung [8], die ebenfalls auf die Schonung natürlicher Ressourcen abzielen. Bis zum Jahr 2024 sollen diese Inhalte um eine nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie erweitert und weiterentwickelt werden.

Der schonende Umgang mit natürlichen Ressourcen ist bereits in zahlreichen Regelwerken adressiert. Dennoch bleibt die Zielstellung insgesamt vage, wenn es um die Frage geht, wie stark die Beanspruchung von Primärressourcen reduziert werden soll und kann. Dies mag auch daran liegen, dass die Voraussetzungen für die Verringerung des Ressourceneinsatzes sektorübergreifend sehr unterschiedlich sind und auch Wechselwirkungen mit anderen Umweltzielen eine Rolle spielen. Als eines der ersten EU-Länder haben sich die Niederlande in ihrem Kreislaufwirtschaftspaket 2016 konkrete Ziele für einzelne Wirtschaftsbereiche gesetzt. So soll die Nutzung abiotischer Rohstoffe wie Mineralien, Metalle und fossile Brennstoffe bis 2030 halbiert werden. Bis 2050 soll „eine vollständige Kreislaufwirtschaft“ etabliert werden [9].

Beim Rohstoffbedarf kann zwischen mineralischen und biotischen Rohstoffen sowie fossilen Energieträgern unterschieden werden. Neben Energiewirtschaft und Industrie ist der Bausektor größter Nutzer von Rohstoffen und trägt damit eine besondere Verantwortung für deren Schonung. Der Schwer-

Abbildung 4: Primärrohstoffeinsatz gesamt sowie für Zement und Beton in Deutschland 2020



Quellen: Statistisches Bundesamt, VDZ, Bundesverband mineralische Rohstoffe e.V.

Anmerkungen: Der Rohstoffeinsatz in Deutschland ergibt sich aus der verwerteten inländischen Rohstoffentnahme zuzüglich Importrohstoffen und abzüglich Exportrohstoffen. Biotische Rohstoffe = z. B. Getreide, Gemüse und Obst; sonstige mineralische Rohstoffe = z. B. Bausande, Kies, Lehm und Steinsalz; fossile Energieträger = z. B. Steinkohle, Erdöl und Erdgas; Darstellung ohne Wasser.

punkt für den Rohstoffeinsatz liegt dabei auf dem Aus- und Neubau sowie der Erhaltung und Sanierung von Bauwerken und unterschiedlicher Infrastruktur. Zement und Beton spielen hierbei eine wichtige Rolle, denn ohne Beton ist der Bau von Wohnungen, Industriegebäuden, aber auch von Brücken, Tunneln, Schleusen bis hin zu Windkraftanlagen und Energieinfrastrukturen nicht denkbar.

Zur Herstellung von Zement und Beton wurden im Jahr 2020 ca. 236 Mio. t mineralische Primärroh- und fossile Brennstoffe eingesetzt. Dies entspricht etwa 20 % der in Deutschland eingesetzten natürlichen Rohstoffe (Abbildung 4). Auf die Zementproduktion entfielen dabei rd. 44 Mio. t Primärrohstoffe sowie rd. 1 Mio. t fossile Brennstoffe. Zusätzlich kamen alternative Roh- bzw. Brennstoffe (rd. 7 Mio. t bzw. rd. 4 Mio. t) zum Einsatz. Die verwendeten Brennstoffe wurden energetisch sowie stofflich verwertet. So konnten 2,5 Mio. t Kohle bzw. 2,4 Mio. t CO₂ eingespart werden.

Insgesamt wurden 2020 in Deutschland zur Herstellung von Beton und Mörtel etwa 192 Mio. t Kies, Sand und Natursteine eingesetzt. Die Menge recy-

celter Gesteinskörnungen in der Betonherstellung betrug ungefähr 0,9 Mio. t.

Zudem wurden für die Herstellung von Beton und Mörtel 17 Mio. Kubikmeter Wasser verwendet. Diese Menge entspricht in etwa 0,4 % der gesamten jährlichen Abgabemenge in Deutschland [10]. Zum Schutz der Wasserressourcen und der natürlichen Gewässer verfügen die Fertigteil- und Transportbetonwerke über Wasseraufbereitungsanlagen, die es ermöglichen, sogenanntes Restwasser in geschlossenen Kreisläufen wieder der Betonherstellung zuzuführen.

Im Bewusstsein ihres Ressourcenbedarfs befassen sich die deutschen Zement- und Betonhersteller unter dem Dach des VDZ und der European Cement Research Academy (ECRA) bereits seit Langem mit der Frage, wie die Baustoffherstellung mit weniger natürlichen Rohstoffen auskommen kann. Die deutsche Zementindustrie hat im Rahmen ihrer Nachhaltigkeitsinitiative bereits 2015 mit dem Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie eine Studie erstellt, um den damaligen Status quo und die Perspektiven der

Ressourcenschonung darzustellen [11]. Die vorliegende Studie knüpft daran an, indem sie relevante Minderungspotenziale für die Ressourcennutzung entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Zement und Beton betrachtet und quantifiziert. Im Vordergrund der Analyse stehen dabei Maßnahmen zur Schonung natürlicher Ressourcen bei der Herstellung von Klinker, Zement und Beton. Gleichzeitig werden auch weitere Potenziale berücksichtigt, die sich aus neuen Verfahren der Bauausführung sowie über eine verlängerte Nutzungsdauer von Bauwerken ergeben. Neben den rein technischen Fragestellungen identifiziert die vorliegende Studie auch externe Voraussetzungen für eine erfolgreiche Transformation der Industrie und skizziert konkrete Handlungsfelder. Folgende Leitfragen stehen im Mittelpunkt:

-
- In welchem Umfang können natürliche Ressourcen bzw. Rohstoffe entlang der Wertschöpfungskette von Zement und Beton eingespart werden?
 - Welche Technologien und Innovationen sind erforderlich?
 - Was sind die Voraussetzungen für eine ressourcenschonende Betonbauweise?
 - Vor welchen Herausforderungen steht die Branche bei der Verringerung ihres Rohstoffverbrauchs?
-

Die vorliegende Untersuchung ist eine Potenzialanalyse. Sie beschreibt ein mögliches Szenario für Deutschland im Jahr 2050, das einerseits die enormen Herausforderungen aufzeigt. Andererseits macht sie deutlich, welche signifikante Einsparung natürlicher Ressourcen bei der Zement- und Betonherstellung möglich ist. Diese kann gelingen, wenn alle Beteiligten Hand in Hand arbeiten. Für eine erfolgreiche Umsetzung bedarf es sowohl politisch als auch gesellschaftlich entsprechender Weichenstellungen sowie eines realistischen Erwartungshorizonts. Denn schon jetzt zeigt sich, dass selbst bei der Realisierung aller Potenziale heimische Primärrohstoffe auch weiterhin eine wichtige Rolle spielen werden. Insofern ist die bereits heute spürbare Einschränkung des Zugangs zu Lagerstätten, z.B. zu Kies- und Sandvorkommen, kritisch zu bewerten. Eine umfassende Ressourcenschonung gelingt nur mit den erforderlichen Rahmenbedingungen und im Miteinander. Die Zement- und Betonhersteller sind bereit, hierfür Verantwortung zu übernehmen und ihren Teil zum Erfolg beizutragen.



Flächennutzung der Zement- und Betonindustrie

Die deutsche Zement- und Betonindustrie fördert den Großteil ihres Primärrohstoffbedarfs selbst. Die meisten Werke liegen nicht zuletzt aus ökologischen und ökonomischen Gründen direkt neben den entsprechenden Abbaustätten, sodass die Rohstoffe direkt vor Ort zu Zement und Beton verarbeitet werden können. Die jedes Jahr neu in Anspruch genommene Fläche, die derzeit in Deutschland für die Gewinnung von Kalkstein für die Zementherstellung verwendet wird, hat eine Größe von etwa 0,6 km². Weitere rund 4 km² Flächen werden für die Gewinnung von Kies, Sand und Natursteinen für die Betonherstellung benötigt [12]. Insgesamt entspricht dieses in Summe etwa 0,001% der Landesfläche Deutschlands.



Rohstoffgewinnungsstätten der deutschen Zement- und Betonhersteller zeichnen sich durch eine hohe Artenvielfalt aus. Dies ergibt sich aus einer Vielzahl von Biotoptypen auf diesen Flächen, die in der deutschen Kulturlandschaft so nur noch selten zu finden sind. Meist handelt es sich dabei um Flächen mit besonderen Standortbedingungen, die Primärlebensräume für sehr spezialisierte Arten und Lebensgemeinschaften darstellen. Sehr oft findet man in Gewinnungsstätten zahlreiche Amphibien, wie die Gelbbauchunke oder Geburtshelferkröte, die temporäre, flache und vegetationsarme Stillgewässer, wie sie nach der Rohstoffgewinnung verbleiben, als Lebensraum benötigen. Auch stark bedrohte Arten wie Uhu und Wanderfalke nutzen Steinbrüche als Rückzugsgebiete. Zur Dokumentation der Förderung und des Erhalts der biologischen Vielfalt in Deutschland hat die Steine-Erden-Industrie eine entsprechende Biodiversitätsdatenbank ins Leben gerufen:

<http://www.biodiversitaet-sichern.de>

Die Flächen für die oberflächennahe Rohstoffgewinnung werden im Gegensatz zu anderen Nutzungsarten, wie Verkehrs- und Siedlungsflächen, nur zeitlich befristet genutzt. Bereits im Rahmen des Genehmigungsverfahrens wird die Gestaltung der Folgenutzung festgelegt. Hierbei wird die Zurückführung der Flächen in die früheren Bewirtschaftungsformen (Rekultivierung) ebenso wie die Durchführung von Natur- und Artenschutzmaßnahmen (Renaturierung) geregelt.

2

Technologien und Innovationen für eine ressourcenschonende Betonbauweise

Technologien und Innovationen für eine ressourcenschonende Betonbauweise

Zement ist das weltweit am meisten genutzte mineralische Bindemittel. Zusammen mit Wasser erhärtet Zement zu Zementstein und verbindet Gesteinskörnungen wie Kies und Sand zu einem festen Gefüge – dem Beton. Nach einer Verarbeitungszeit von wenigen Stunden entsteht aus dem formbaren Frischbeton ein künstlicher Stein, der über viele Jahrhunderte stabil und dauerhaft ist. Der Herstellungsprozess von Zement und Beton sowie dessen mögliche Verwertung am Nutzungsende sind in Abbildung 5 vereinfacht dargestellt.

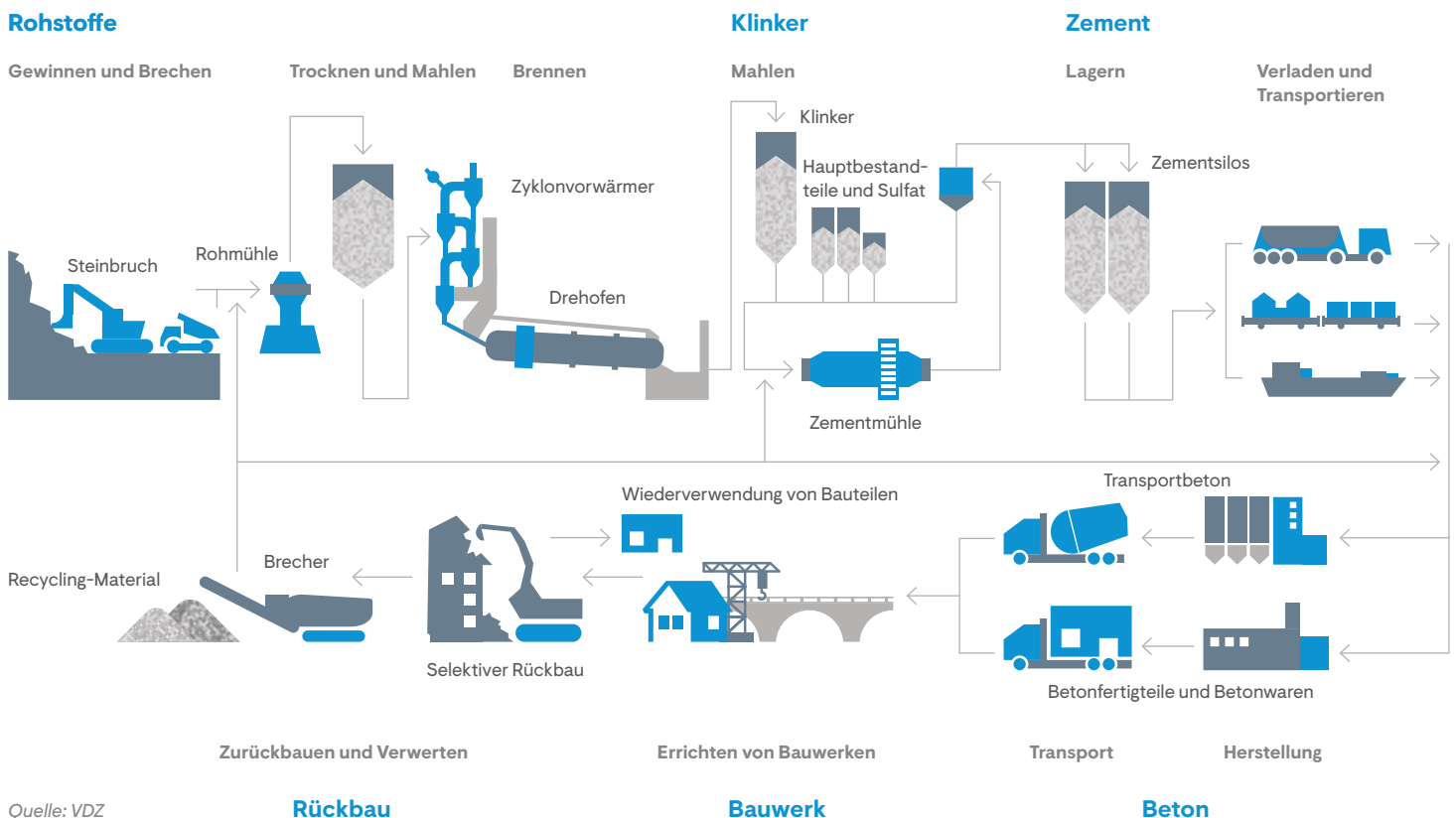
2.1 Herstellung und Anwendung von Zement und Beton

Wesentlicher Bestandteil der meisten Zemente ist Portlandzementklinker (nachfolgend: Klinker), für dessen Herstellung verschiedene mineralische

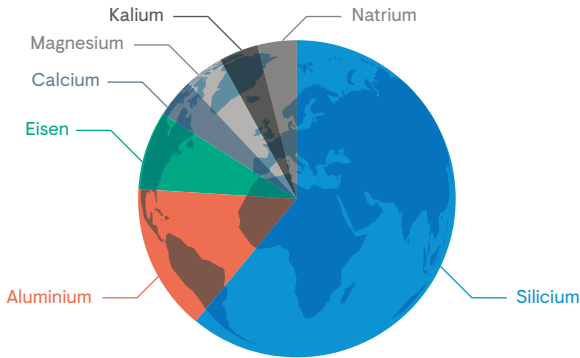
Ausgangsstoffe erforderlich sind. Zu den wichtigsten primären Grundstoffen gehören Kalkstein, Kalkmergel, Kreide, Ton, Sand, Gips und Anhydrit. Sie werden in Steinbrüchen oder Tagebauen gewonnen und in mehreren Zerkleinerungsprozessen aufbereitet. Chemisch gesehen handelt es sich bei Kalkstein und Kreide um Calciumcarbonat (CaCO_3), bei Sand um Siliciumoxid. Mergel sowie Ton bestehen aus Silicium-, Aluminium- und Eisenoxiden (SiO_2 , Al_2O_3 und Fe_2O_3). Diese Stoffe sind in der Erdkruste in großem Maße vorhanden und ermöglichen eine weltweite Herstellung von Zement und Beton (Abbildung 6).

Aus den Rohstoffen wird ein Rohmehl hergestellt, das bei sehr hohen Temperaturen von bis zu 1.450°C im Drehrohrofen gebrannt wird. Durch das Brennen und Abkühlen entstehen die sogenannten Klinkerphasen Tricalciumsilicat (Alit), Dicalciumsilicat (Belit), Tricalciumaluminat und Calciumaluminatferrit. Vermischt mit Wasser bilden diese Phasen Kristalle, die einen festen Verbund schaffen und dem Beton seine Festigkeit und Dauerhaftigkeit verleihen.

Abbildung 5: Herstellung von Zement und Beton sowie mögliche Verwertungswege am Nutzungsende



Quelle: VDZ

Abbildung 6: Elemente in der Erdkruste

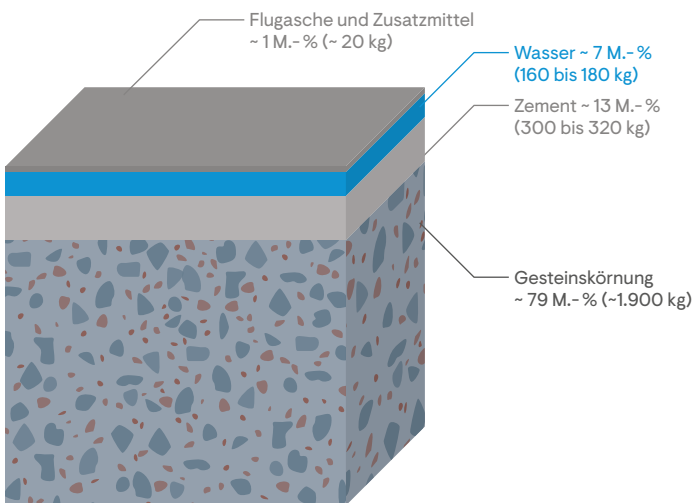
Quelle: VDZ

Anmerkungen: Verteilung entspricht der oxidischen Zusammensetzung in M.-%. Übrige Oxide entsprechen rd. 1 M.-% der Erdkruste.

Je nach Zementart und Anforderungen an die Eigenschaften von Zementen werden weitere Zementhauptbestandteile, wie z.B. Hüttensand, Kalkstein, Flugasche, gebrannter Ölschiefer und Trass, entweder gemeinsam mit dem Klinker in entsprechenden Mahlanlagen verarbeitet oder getrennt gemahlen und anschließend gemischt. Des Weiteren werden bei der Zementherstellung auch Sulfatträger, z.B. Gips und Anhydrit, verwendet, um die Verarbeitbarkeit von Zementen und deren Festigkeitsentwicklung zu optimieren. Je nach Anwendungsbereich weisen Zemente unterschiedliche Zusammensetzungen und Leistungsmerkmale, z.B. Festigkeitsklassen, auf.

Bei der Betonherstellung werden Zement, Gesteinskörnung und Wasser sowie ggf. Zusatzstoffe und -mittel miteinander vermischt. Wie sich ein „typischer“ Kubikmeter Beton zusammensetzt, zeigt Abbildung 7. Nach einer Verarbeitungszeit von wenigen Stunden erhärtet der Zementleim und verbindet die Gesteinskörnungen zu einem festen und dauerhaften Gefüge – dem Beton. Die Betonrezeptur richtet sich nach den jeweiligen Anforderungen an den Frisch- und Festbeton im Bauwerk.

Am Ende des Lebenszyklus' eines Bauwerks wird der anfallende Bauschutt bereits heute größtenteils verwertet. Dieses Material wird jedoch nur zu einem geringen Anteil im Beton eingesetzt. Demontage und Wiederverwendung einzelner Betonbauteile spielen bislang nur vereinzelt eine Rolle.

Abbildung 7: Ein Kubikmeter Beton

Quellen: VDZ, Umweltproduktdeklarationen (EPDs) für Beton

Anmerkungen: gewichtete mittlere Zusammensetzung von Betonen der Druckfestigkeitsklassen C20/25, C25/30, C30/37 und C35/45; Anteile beziehen sich auf die Masse des Betons; bei Betrachtung des Volumens sind noch ca. 1,5% Lufteinschlüsse zu berücksichtigen.

2.2 Verringerung des Rohstoffbedarfs entlang der Wertschöpfungskette

Die Minderung des Einsatzes von Primärrohstoffen durch alternative Rohstoffe bzw. industrielle Nebenprodukte (z.B. Hüttensand, Flugasche) sowie Recycling-Materialien aus dem Rückbau von Bauwerken spielt in der Zement- und Betonindustrie seit vielen Jahren eine wichtige Rolle. Zudem setzt die Branche seit langem auf alternative abfallstämmige Energieträger, die einerseits CO₂-Emissionen reduzieren und andererseits in signifikantem Maße primäre Energierohstoffe einsparen.

Ressourcenschonung in der Herstellung und Anwendung von Zement und Beton erstreckt sich auch auf die Frage, wie diese in Bauteilen und der Baukonstruktion insgesamt effizienter eingesetzt



werden können. Zudem bieten Bauwerke aus Beton aufgrund ihrer Langlebigkeit auch weitere Potenziale zur Ressourcenschonung, etwa durch Verlängerung der Nutzungsdauer, die Nachnutzung sowie das Recycling des Betons am Ende des Lebenszyklus.

In Zukunft steht die Branche vor der großen Herausforderung, neue Rohstoffquellen zu erschließen, einerseits um das bereits heute nennenswerte Substitutionsniveau trotz absehbar wegfallender alternativer Rohstoffe zu halten und andererseits den Primärrohstoffbedarf insgesamt weiter deutlich zu senken.

Die nachfolgende Betrachtung von primären und alternativen Rohstoffquellen sowie technischen Ansätzen für eine höhere Materialeffizienz beim Bauen basiert auf einem ganzheitlichen Ansatz. Dieser umfasst neben den Wertschöpfungsstufen Klinker, Zement, Beton, Bauwerk auch die Potenziale der Kreislaufwirtschaft, d.h. aus dem Abbruch und Rückbau von Bauwerken. In diesem Kapitel werden auch Innovationen dargestellt, die nicht in die Berechnung der Minderungspotenziale einfließen, weil deren Einfluss auf die Minderung des Primärrohstoffeinsatzes heute noch nicht beziffert werden kann oder noch als sehr gering einzuschätzen ist.

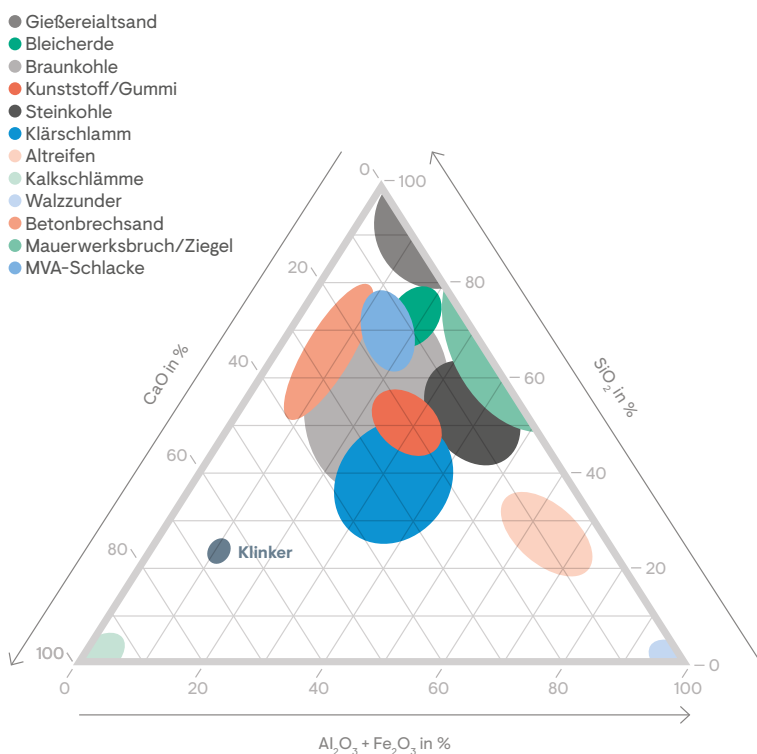
2.3 Klinker: Betonbrechsande und Brennstoffaschen

Bei der Klinkerherstellung bestehen zwei wesentliche Hebel, primäre Rohstoffe zu schonen: zum einen die Nutzung alternativer Einsatzstoffe, die als Nebenprodukte in anderen Industrieprozessen anfallen oder aus dem Rückbau von Bauwerken stammen und im Sinne der Kreislaufwirtschaft verwertet werden können; zum anderen die Reduzierung des Einsatzes von Kohle als fossilem Brennstoff und deren Substitution durch alternative, möglichst biomassehaltige Brennstoffe. Im Folgenden wird auf den Status quo und Perspektiven dieser beiden Hebel eingegangen.

2.3.1 Ressourcen heute

Im Jahr 2020 wurden von deutschen Zementherstellern etwa 24,7 Mio. t Zementklinker [12] produziert. Die für die Klinkerherstellung notwendigen rd. 40,7 Mio. t Rohstoffe setzten sich größtenteils

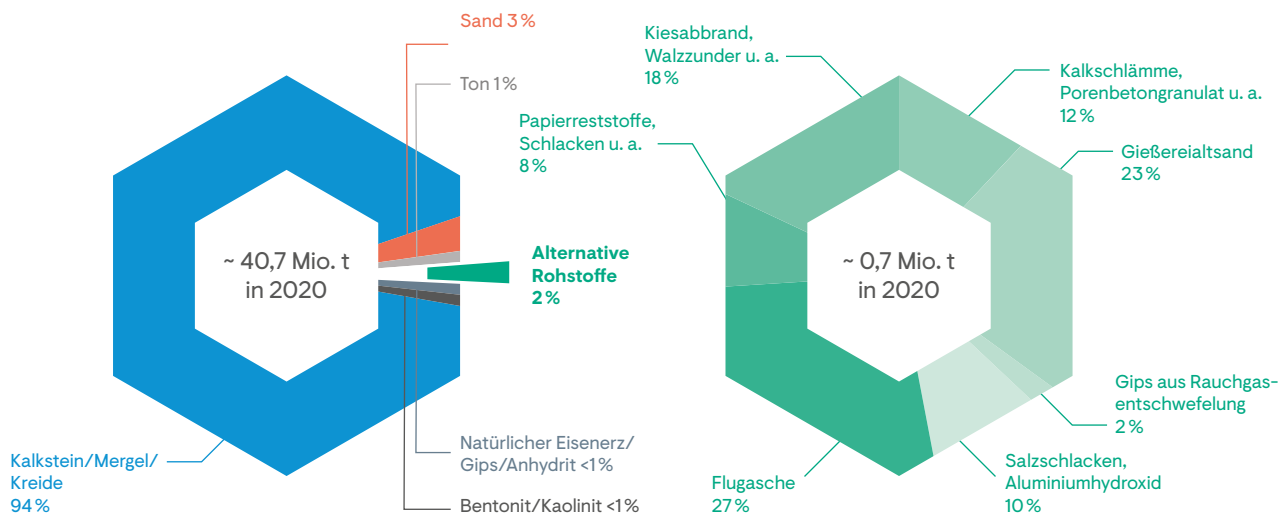
Abbildung 8: Zusammensetzung von Klinker, Brennstoffaschen und alternativen Rohstoffen



Quelle: VDZ

aus natürlichen Quellen zusammen, etwa 0,7 Mio. t wurden durch alternative Rohstoffe aus anderen Industrien gedeckt (Abbildung 9) [13]. Die Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung alternativer Rohstoffe hängen in erster Linie von der jeweiligen Rohstoffsituation eines Zementwerkes ab. Alternative Rohstoffe ergänzen die Rohstoffmischung, sollen möglichst homogen zusammengesetzt sein und kontinuierlich zur Verfügung stehen. Details zur chemischen Zusammensetzung von Klinker sowie ausgewählten Brenn- und alternativen Rohstoffen zeigt Abbildung 8. Strenge Auswahlkriterien für die Stoffe und ein geeignetes Qualitätssicherungskonzept gewährleisten die Umweltverträglichkeit des Herstellungsprozesses sowie die Leistungsfähigkeit und Umweltverträglichkeit des Klinkers bzw. Zements.

Abbildung 9: Rohstoffeinsatz in der Klinkerherstellung 2020



Quelle: VDZ

Der Anteil alternativer Rohstoffe bei der Klinkerherstellung ist vergleichsweise gering, was aber nicht überrascht. Letztlich erfordert die Rohmaterialzusammensetzung für die Klinkerherstellung zum weit überwiegenden Teil calciumhaltige Mineralien, welche derzeit nur in geringem Umfang durch alternative Rohstoffe gedeckt werden können.

2.3.2 Ressourcen morgen

Die Zementindustrie beschäftigt sich seit Jahren intensiv mit der möglichen Erweiterung ihres Rohstoff-Portfolios. Als vielversprechende alternative Rohstoffquelle werden derzeit **Betonbrechsande** diskutiert. Sie entstehen als Feinfraktion beim Abbruch von (Beton-)Bauwerken und können je nach Aufbereitung größere Mengen an Sand aufweisen. Die sonstige Zusammensetzung entspricht derjenigen der Feinkomponenten des Betons. Die regelmäßig hohen Sandanteile (Siliciumoxid) müssen bei der Zusammensetzung des Rohmehls durch Zugabe von Kalkstein so ausgeglichen werden, dass die gewünschten Klinkerphasen entstehen können. Bei durchschnittlichen Kalksteinquali-

täten können aus technischer Sicht bis zu rd. 10 M.-% der Rohmaterialmischung durch den Einsatz von Betonbrechsand substituiert werden. Bei einer Klinkerproduktion von rd. 15 Mio. t im Jahr 2050 (Annahme aus [1]) entspricht dies einer Menge von ca. 2,5 Mio. t. Analog wäre auch der Einsatz von Ziegelbruch als alternative Silicium- und Aluminiumquelle möglich.

Derzeit wird auch die Verwendung von Betonbrechsand als Zementhauptbestandteil untersucht (siehe Abschnitt 2.4.2).

Aktuelle Untersuchungen [14] zeigen, dass mehrstufig aufbereitete mineralische Fraktionen von **Schlacken aus der Müllverbrennung** (MVA-Schlacken) auch für die Klinkerherstellung nutzbare Stoffe enthalten (Abbildung 8). Aufbereitete Schlacken konnten bis zu 4% als Rohmehlkomponente zur Klinkerherstellung verwendet werden, ohne dass die Emissionssituation oder die Klinkerqualität beeinträchtigt wurden. Durch eine solche Verwendung könnte ein neuer Stoffkreislauf für Reststoffe entstehen, die bislang deponiert und nicht anderweitig genutzt werden. Eine umfangreichere Ver-

wertung dieser mineralischen Fraktion in der Klinkerherstellung setzt allerdings voraus, dass unter wirtschaftlichen Bedingungen Metalle, wie z.B. Blei, Chrom, Kupfer, Nickel, Vanadium und Zink sowie Chlor und Schwefel, abgereichert werden [14].

Als **weitere potentielle alternative Rohstoffquellen** werden derzeit z.B. auch Aluminiumschlacke und Rotschlamm, faserhaltige Kunststoffe, Waschberge aus der Kohleaufbereitung, Papier-, Kessel-/Nassasche sowie ölhaltige Böden diskutiert [15, 16].

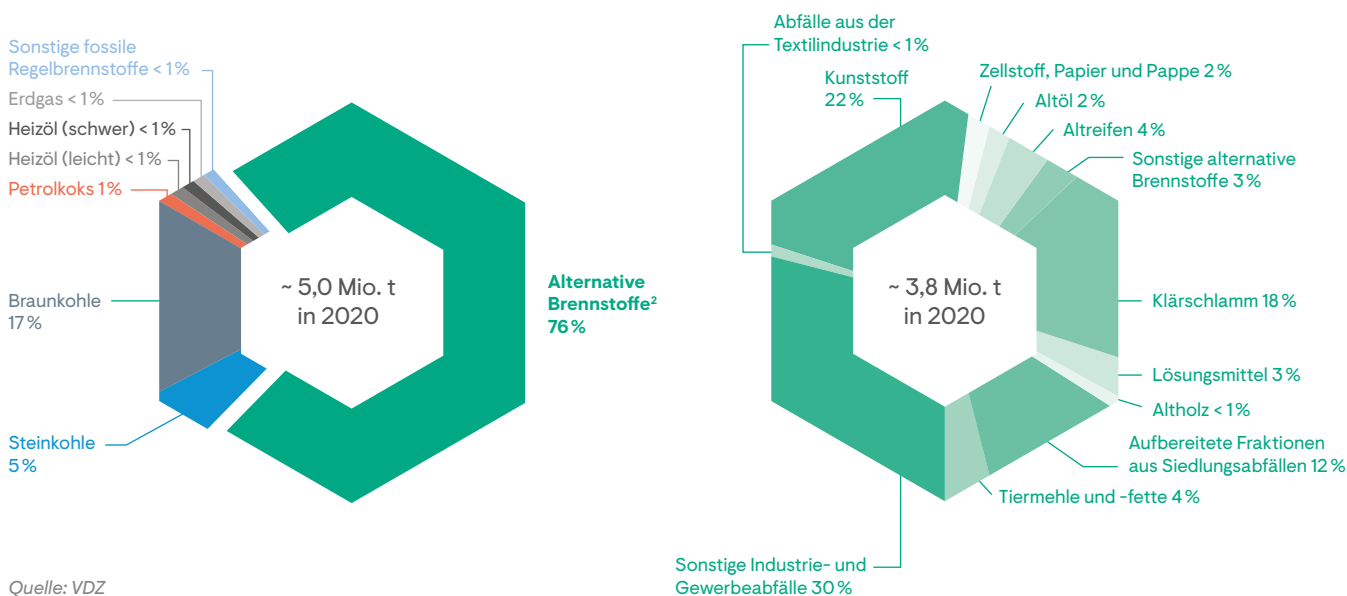
Beim Einsatz alternativer Rohstoffe dürfen keine nachteiligen Auswirkungen auf den Zementproduktionsprozess, die Produktqualität und die Umweltverträglichkeit auftreten. Derzeit wird in zahlreichen Projekten untersucht, welche weiteren Stoffe sich für die Klinkerproduktion eignen [17] und bis zu welchem Grad die Einsatzrate alternativer Rohstoffe gesteigert werden kann. Eine differenzierte Aufschlüsselung des Rohstoffeinsatzes für das Jahr 2050, wie für Zement (Abschnitt 2.4) und Beton (Abschnitt 2.5), erfolgt für die Klinkerherstellung nicht.

2.3.3 Alternative Brennstoffe

Die Zementindustrie leistet durch den Einsatz alternativer Brennstoffe nicht nur einen großen Beitrag zur CO₂-Minderung, sondern zur Ressourcenschonung. In Deutschland und vielen anderen Ländern wurde bereits in den 1970er Jahren damit begonnen, die im Klinkerbrennprozess verwendeten fossilen Brennstoffe Braun- und Steinkohlenstaub, Petrolkoks, schweres Heizöl und auch Erdgas durch sogenannte alternative Brennstoffe (auch als Ersatz- bzw. Sekundärbrennstoffe bezeichnet) zu ersetzen (Abbildung 10). Bei den alternativen Brennstoffen handelt es sich zumeist um aufbereitete Abfälle, die im Klinkerbrennprozess thermisch sowie stofflich auf umweltverträgliche Weise verwertet werden. Sie tragen heute zu rd. 76 % des Brennstoffmixes und zu rd. 70 % des thermischen Energieeinsatzes in der Zementindustrie bei und spielen insofern eine entsprechend bedeutsame Rolle.

Im Jahr 2020 betrug der Brennstoffeinsatz der deutschen Zementwerke rund 5 Mio. t (Abbildung 10). Der Anteil an alternativen Brennstoffen lag

Abbildung 10: Brennstoffeinsatz der deutschen Zementindustrie im Jahr 2020



2 Im Jahr 2020 betrug der thermische Energieeinsatz der Zementwerke 96 Mio. GJ, davon wurden 66,4 Mio. GJ bzw. 69,2% durch alternative Brennstoffe bereitgestellt.



bei rund 3,8 Mio. t. Bei den fossilen Brennstoffen (rund 1,2 Mio. t) dominieren Stein- und Braunkohle, Petrolkoks und Erdgas spielen dagegen eine untergeordnete Rolle. Erdgas und Heizöl (schweres und extra-leichtes Heizöl) werden eingesetzt, um die Ofenanlagen anzufahren.

Bei der thermischen und stofflichen Nutzung von alternativen Brennstoffen nimmt die deutsche Zementindustrie weltweit eine führende Position ein. Die mengenmäßig größten Anteile machen dabei Industrie- und Gewerbeabfälle (30 %), Kunststoff (22 %), Klärschlamm (18 %) und Siedlungsabfälle (12 %) aus. Darüber hinaus werden auch Stoffe wie Altöl, Altreifen, Lösungsmittel, Tiermehl etc. verwertet. Heizwertreiche Stoffe, wie z.B. Altöl, Lösemittel oder aufbereitete Kunststoffabfälle (Fluff³), werden hauptsächlich in der Hauptfeuerung eingesetzt, während heizwertärmere Stoffe in der Calcinatorfeuerung oder im Ofeneinlauf aufgegeben werden.

Über alternative Brennstoffe gelangen rund 0,5 Mio. t Asche, über die Verfeuerung von Braun- und Steinkohle bzw. Aschezugabe aus anderen Prozessen rund 0,1 Mio. t bzw. 0,05 Mio. t Aschen in den Klinker. Diese Aschen haben eine ähnliche Zusammensetzung wie die erforderlichen Rohmaterialien und werden damit zu Klinker gebrannt, wodurch Rohstoffe in entsprechender Menge eingespart werden.

Bis 2030 erscheint eine Erhöhung des Anteils an alternativen Brennstoffen von derzeit rd. 70 % auf rd. 75 % bezogen auf den thermischen Energiebedarf als realistisch. Gemäß den Minderungspfaden der CO₂-Roadmap des VDZ [1] ist zur Erreichung der Klimaneutralität ein Anstieg auf bis zu 90 % im Jahr 2050 erforderlich, wobei von einem biogenen Anteil von 35 % ausgegangen wird [13]. Entscheidend für eine solche Entwicklung ist die Verfügbarkeit geeigneter Stoffströme, welche auch durch gesetzliche Vorgaben beeinflusst werden kann.

Darüber hinaus wird derzeit untersucht, inwieweit weitere nicht-fossile Brennstoffe wie „grüner“ Wasserstoff⁴ (ein Anteil von bis zu 10 % bzw. 0,16 Mio. t im Jahr 2050 [1] ist ohne negative Auswirkungen auf den Brennbetrieb bestehender Zementöfen denkbar) zum Einsatz kommen könnten. Gemäß einer aktuellen Studie wäre dabei die Hauptfeuerung der Ofenanlage in einem Brennstoffmix mit Biomasse zu bevorzugen [17].

2.4 Zement: Ressourcenschonende Rohstoffalternativen und klinker-effiziente Zemente

Klinker ist der wichtigste Bestandteil der meisten Zemente. Zur Senkung der CO₂-Emissionen aus der Zementherstellung und zur Einsparung von Ressourcen wird Klinker im Zement möglichst effizient eingesetzt. Zement kann neben Klinker andere Hauptbestandteile enthalten. Die Zementeigenschaften werden dabei unter Ausnutzung der Leistungsfähigkeit des Klinkers und der weiteren Zementbestandteile entsprechend optimiert. Seit jeher kommen in Deutschland Zemente mit unterschiedlichen Zusammensetzungen und Klinkergehalten für die verschiedenen baupraktischen Anwendungen zum Einsatz (siehe u.a. Abbildung 11).

2.4.1 Ressourcen heute

In Deutschland wurden 2020 mit rd. 25,3 Mio. t Zementklinker⁵ rd. 35,5 Mio. t Zement [12] produziert. Davon wurden rd. 30 Mio. t in Deutschland verarbeitet. Der Klinkerfaktor konnte in den letzten Jahrzehnten in Deutschland auf mittlerweile rd. 71 % (weltweit 72 %, [19]) gesenkt werden, wodurch

³ Fluff = flugfähige Fraktionen von alternativen Brennstoffen.

⁴ Wasserstoff, der mit Strom aus erneuerbaren Energien hergestellt wird.

⁵ Beschreibt den Klinkerverbrauch in Deutschland. Die Differenz zwischen dieser Zahl und der Klinkerproduktion in 2.3.1 ergibt sich aus Klinkerimporten und -exporten sowie aus der Veränderung des Lagerbestands.



in erheblichem Maße natürliche Ressourcen geschont und CO₂-Emissionen vermieden werden konnten. Abbildung 12 zeigt die Anteile an Rohstoffen der 2020 in Deutschland produzierten Zemente. Fast ein Fünftel (19 %, etwa 6,7 Mio. t) davon sind alternative Rohstoffe aus anderen Industrieprozessen, im Wesentlichen Hüttensand. Durch ihren Einsatz werden jährlich bereits rund 10 Mio. t Primärrohstoffe eingespart.

2.4.2 Ressourcen morgen

Die Verfügbarkeit der heute für die Zementherstellung verwendeten alternativen Rohstoffe aus anderen Industrieprozessen wird mit fortschreitender Dekarbonisierung der Industrie deutlich abnehmen. Gleichzeitig werden in relativ kurzer Zeit signifikante Verschiebungen des Zementportfolios in Richtung weiterer klinkereffizienter Zemente notwendig werden, um den Klinkerfaktor bis 2030 auf 63 % und in 2050 auf 53 % zu senken [1] (Abbildungen 12 und 13).

Eine bedeutende Rolle dabei spielt die Markteinführung von in der EN 197-5 genormten CEM II/C-M (Klinkergehalt: 50 bis 64 %) und CEM VI-Zementen (Klinkergehalt: 35 bis 49 %) (Abbildung 11). Dafür wird es künftig teils neuer, aber auch größerer Mengen an geeigneten Stoffen zur Substitution von Zementklinker bedürfen.

Abbildung 13 zeigt eine Abschätzung der für die Zementherstellung in 2050 notwendigen Rohstoffe. Dabei spielen neben Recycling- und industriellen

Nebenprodukten auch natürliche Rohstoffe weiterhin eine wichtige Rolle. Im Folgenden werden der Status sowie mögliche Perspektiven zur Verwendung aktueller und neuer Stoffe beschrieben.

Hüttensand

Hüttensand entsteht durch schnelles Abkühlen von Hochofenschlacke, die bei der Roheisenherstellung anfällt. In 2020 betrug die Roheisenproduktion in Deutschland etwa 22,5 Mio. t. Dabei fielen rd. 6,4 Mio. t Hochofenschlacke an, von denen der überwiegende Teil in der Zementindustrie eingesetzt wurde [20]. Hüttensand ist latent-hydraulisch und derzeit der mit Abstand am häufigsten eingesetzte Zementbestandteil neben Klinker. Verteilt auf die Zementarten CEM III, CEM II-S und CEM II-M enthalten rund 47 % der in Deutschland versandten Zemente neben Klinker auch Hüttensand [18].

Die Verfügbarkeit von Hüttensand in der bisherigen Menge und Qualität dürfte künftig deutlich sinken, wenn die Eisen- und Stahlindustrie ihre Produktion weitgehend auf das wasserstoffbasierte Direktreduktionsverfahren umzustellen [21]. Hierbei fallen rund 40 % weniger Schlacken an, deren Eigenschaften sich von heutigem Hüttensand deutlich unterscheiden werden. Ob und in welchem Maße diese für die Zementherstellung geeignet sind, ist derzeit schwer abschätzbar, da derartige Schlacken noch nicht verfügbar sind. Die Eisen- und Stahlindustrie geht von einem Rückgang der Hüttensandmengen in Deutschland von heute jährlich rd. 5 Mio. t auf rd. 4 Mio. t in 2030 sowie auf rd. 2 Mio. t in 2050 aus (Abbildung 13).

Abbildung 11: Zusammensetzung besonders klinkereffizienter CEM II/C-M- und CEM VI-Zemente

Zementart		Zusammensetzung (in M.- %)									
		Hauptbestandteile							Nebenbestandteile		
		Klinker	Hüttensand	Silicastaub ¹⁾	Puzzolan	Flugasche	Gebrannter Schiefer	Kalkstein ²⁾			
CEM II	Portland-Komposit-Zement ³⁾	CEM II/C-M	50-64	< ----- 36-50 ----- >						0-5	
		CEM VI (S-P)	35-49	31-59	-	6-20	-	-	-	-	0-5
CEM VI	Komposit-Zement	CEM VI (S-V)	35-49	31-59	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM VI (S-L)	35-49	31-59	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM VI (S-LL)	35-49	31-59	-	-	-	-	-	6-20	0-5

Anmerkungen:

1) Anteil begrenzt auf 6 bis 10 M.- %

2) Anteil begrenzt auf 6 bis 20 M.- %

3) Anzahl der Hauptbestandteile neben Klinker auf zwei begrenzt. Diese müssen durch entsprechende Bezeichnung des Zements erklärt werden.

Quelle: EN 197-5:2020

Stahlwerksschlacken

Stahlwerksschlacken fielen in Deutschland 2020 in Höhe von rd. 4,5 Mio. t [20] an. In Abhängigkeit von der Menge und Zusammensetzung der zur Stahlerzeugung eingesetzten Schrotte oder Flussmittel enthalten diese Schlacken u.a. höhere Gehalte an Schwermetallen. Im Gegensatz zu Hüttensand sind sie überwiegend kristallin und weisen keine latent-hydraulischen Eigenschaften auf. Sie dienen derzeit überwiegend als Baustoff im Straßen-, Wege- und Erdbau. Stahlwerksschlacken können durch nachträgliches Aufschmelzen metallurgisch bzw. stofflich so konditioniert werden, dass (latent-)hydraulische Eigenschaften entstehen [22]. Inwieweit hierdurch abnehmende Mengen an Hüttensand kompensiert werden können, lässt sich derzeit nur schwer abschätzen.

Schlacken aus Müllverbrennungsanlagen

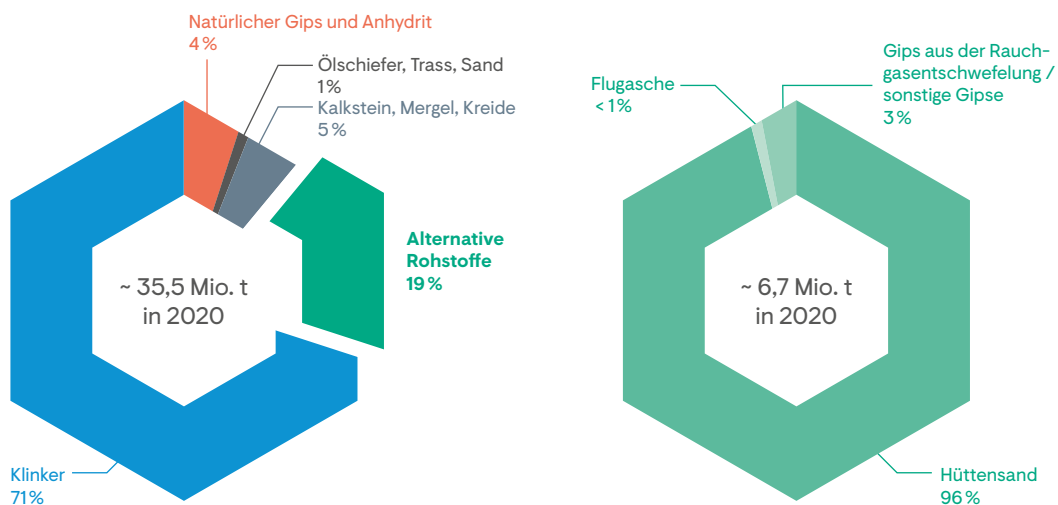
Schlacken aus Müllverbrennungsanlagen (MVA-Schlacken) fielen in 2020 deutschlandweit in Höhe von rd. 6 Mio. t an [23]. Sie eignen sich aufgrund ihrer Inhomogenität und meist hohen Anteile an Schwermetallen ohne weitere Aufbereitung nicht als Zementbestandteil. Derzeit wird intensiv an der Aufbereitung dieser Stoffe geforscht, um sie entsprechend nutzbar zu machen [14], [24] (siehe Abschnitt 2.3.2).

Flugaschen

Flugaschen entstehen als Nebenprodukt bei der Verbrennung von Braun- und Steinkohle zur Stromerzeugung in Kraftwerken. Zur Herstellung von Zementen können sowohl kieselsäure- als auch kalkreiche Flugaschen eingesetzt werden. Ersterer weisen puzzolanische Eigenschaften auf und reagieren mit dem Calciumhydroxid des Klinkers zu festigkeitsbildenden Phasen. Kalkreiche Flugaschen können zusätzlich hydraulische Eigenschaften aufweisen. In der Zementindustrie kommen infolge ihrer höheren Gleichmäßigkeit überwiegend die kieselsäurereichen Steinkohlenflugaschen zum Einsatz. Von den insgesamt in der Zementherstellung eingesetzten rd. 0,25 Mio. t an Flugasche werden rd. 0,18 Mio. t als alternativer Rohstoff zur Klinkerherstellung und rd. 0,07 Mio. t als Zementhauptbestandteil eingesetzt (entspricht rd. 0,2% der zur Klinker- und Zementherstellung eingesetzten Stoffe) [12]. Eine ungleich höhere Bedeutung hat die Verwendung von Flugasche bei der Herstellung von Beton als Betonzusatzstoff (ca. 2 Mio. t in 2020).

Mit dem Ausstieg aus der Kohleverstromung bis spätestens 2038 wird in Deutschland keine Flugasche mehr erzeugt. Auch hier muss sich die Ze-

Abbildung 12: Bestandteile von Zement in Deutschland 2020



Quellen: VDZ, Deutsche Emissionshandelsstelle, Statistisches Bundesamt, Fachverband Eisenhüttenschlacken



ment- und Betonindustrie darauf einstellen, die bislang verfügbaren Mengen an Flugasche durch andere Stoffe zu ersetzen. Ob und in welchem Umfang sich bereits deponierte Aschen und andere Kraftwerksnebenprodukte künftig für einen Einsatz in der Zement- und Betonindustrie eignen, ist Gegenstand aktueller Untersuchungen.

Calciumsulfat

Calciumsulfat wird dem Zement bei seiner Herstellung zur Regelung des Erstarrens und der Festigkeitsentwicklung zugegeben. In Form von Gips und Anhydrit bzw. einer Mischung davon liegt Calciumsulfat als natürlicher Rohstoff vor. Gips entsteht aber auch als Nebenprodukt in Rauchgasentschwefelungsanlagen (REA-Gips) [25]. Im Jahr 2020 wurden rund 11% der in Deutschland für die Zementherstellung benötigten rd. 1,8 Mio. t Calciumsulfat durch REA-Gips (rd. 0,2 Mio. t) abgedeckt. Für die verbleibenden rd. 89% wurden natürlicher Gips bzw. Anhydrit (rd. 0,9 Mio. t bzw. 0,7 Mio. t) verwendet.

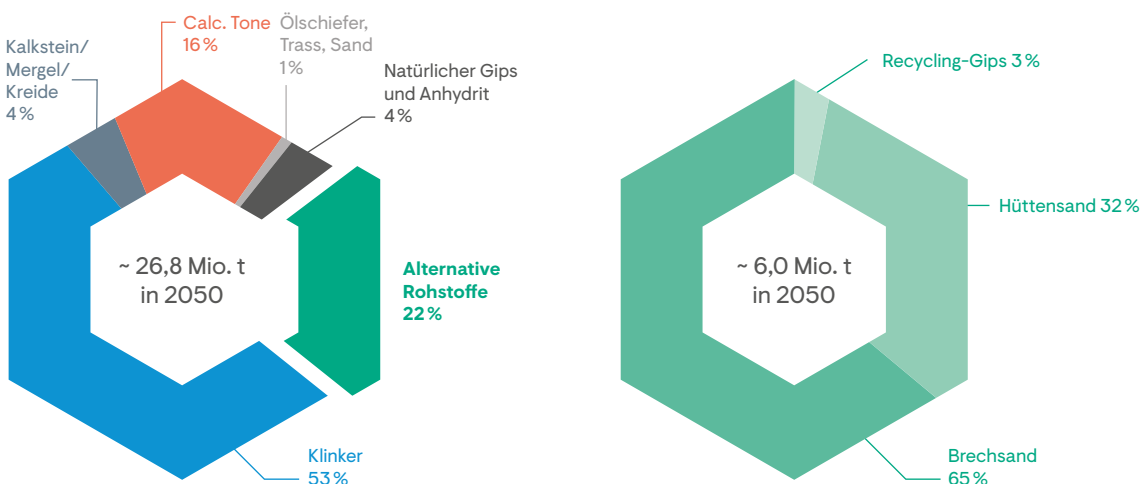
Die derzeit noch in den deutschen Stein- und Braunkohlekraftwerken produzierten rd. 7 Mio. t REA-Gips werden wie die Flugasche durch den Ausstieg aus der Kohleverstromung bis 2038 entfal-

len. Die derzeit über das Gipsrecycling verfügbaren Mengen an RC-Gips reichen noch nicht aus, um die entfallenden REA-Gips-Mengen für die Zementherstellung zu ersetzen. Die darüber hinaus notwendigen Mengen an Calciumsulfaten müssten über natürliche, vorzugsweise heimische Gipslagerstätten abgedeckt werden. Die Erhöhung des Anteils an RC-Gips für die Zementherstellung ist Gegenstand aktueller Forschungsprojekte.

Betonbrechsand („Recyclingmehl“)

Als neuer Stoffstrom bietet sich gemahlener Betonbrechsand – neben dem Einsatz als Rohmehlkomponente für die Klinkerherstellung (siehe Abschnitt 2.3.2) – auch für den Einsatz als Zementbestandteil an [26, 27, 28]. In Abhängigkeit seiner Zusammensetzung kann durch aktive Carbonatisierung (Mineralisierung) des enthaltenen Zementsteins eine puzzolanische Reaktivität erzeugt werden, die u.a. die Festigkeitsentwicklung von Zementen begünstigt [28]. So kann die Einbindung von CO₂ mit der weiteren Reduktion des Klinkerfaktors in Zementen kombiniert werden. Je nach Herkunft und Behandlung des Altbetons können Brechsande z.B. höhere Chlorid- bzw. Sulfatgehalte aufweisen, was beim Einsatz als Zementbestandteil berücksichtigt werden muss.

Abbildung 13: Bestandteile von Zement in Deutschland im Szenario 2050





Es gibt bereits zwei bauaufsichtliche Zulassungen für Zemente mit Betonbrechsanden als Nebenbestandteil. Derzeit wird ein europäischer Normentwurf prEN 197-6 zu Zementen mit Betonbrechsand („Recyclingmehl“) als Zementbestandteil erarbeitet. Entsprechende Mengen stünden grundsätzlich zur Verfügung – pro Jahr fallen in Deutschland rd. 25 Mio. t Betonbruch an, bei deren Aufbereitung Brechsand entsteht.

Die vorliegende Studie geht davon aus, dass etwa 75 % der in 2050 benötigten Menge an ungebranntem Kalkstein (5,2 Mio. t, [1]) als Zementhauptbestandteil durch Betonbrechsand (3,9 Mio. t) substituiert werden kann.

Brechsande können auch aus Ziegelmehl bestehen: Werden keramische Bauprodukte wie Mauerwerksziegel oder Dachziegel beim Gebäudeabbruch getrennt aufbereitet, können sie in fein gemahlener Form ein puzzolanisches Reaktionspotenzial aufweisen und in geringen Mengen Klinker, Hüttensand oder Flugasche im Zement substituieren. Das technische Potenzial dieser Stoffe ist Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten und noch nicht abschließend geklärt. Da in Deutschland jährlich etwa 10 Mio. t an Abbruchziegeln und anderen ziegelreichen Stoffgemischen anfallen, dürfte eine relevante Menge als Ressource für die Zementherstellung zur Verfügung stehen [29].

Kalkstein

Kalkstein ist in Deutschland in großem Maße geologisch verfügbar und kommt in erster Linie als Rohstoff für die Klinkerherstellung zum Einsatz. Darüber

hinaus ist Kalkstein aber auch ein weitestgehend inerte Zementbestandteil, der in einer Menge von 1,8 Mio. t verwendet wird. Dieser Anteil beträgt somit rund 5 % der Zementeinsatzstoffe [12]. Etwa ein Viertel der in Deutschland verkauften Zemente sind Portlandkalksteinzemente (überwiegend CEM II/A-LL) [12]. Diese Zemente sowie auch Portlandkompositzemente werden seit vielen Jahren erfolgreich für verschiedenste Betonanwendungen eingesetzt. Zumeist enthalten sie nicht mehr als 20 M.-% Kalkstein, um in Betonen für möglichst viele Expositionsklassen eingesetzt werden zu können. Die Forschung zeigt, dass sogar Zemente mit bis zu 50 M.-% Kalkstein zur Herstellung von Konstruktionsbetonen geeignet sind, wenn die Betontechnologie entsprechend angepasst wird [30], (siehe Abschnitt 2.5.2).

Natürliche Puzzolane

Natürliche Puzzolane sind im Allgemeinen Stoffe vulkanischen Ursprungs oder Sedimente, die reaktives Siliciumdioxid und/oder Aluminium enthalten. In Deutschland sind dies im Wesentlichen rheinischer Trass, der vulkanischen Ursprungs ist (Tuff), und bayerischer Trass (Suevit), der durch einen Meteoriteneinschlag entstanden ist. Beide reagieren mit dem Calciumhydroxid des Klinkers festigkeitsbildend. Die beiden Puzzolane kommen nur in wenigen Lagerstätten in Deutschland vor. Die eingesetzte Menge beträgt pro Jahr derzeit rund 0,03 Mio. t, das sind weniger als 0,1 % der gesamten Zementproduktion des Jahres 2020 [12]. Künftig ist ein zunehmender regionaler Einsatz von Tuff und Suevit als puzzolanische Zementkomponente wahrscheinlich.

Gebannter Ölschiefer

Gebannter Ölschiefer wird aufgrund lokal begrenzter Vorkommen in Deutschland nur in geringem Maße eingesetzt (2020: 0,2 Mio. t bzw. 0,6 % der Zementproduktion [12]). Er weist hydraulische sowie puzzolanische Eigenschaften auf. Zur Herstellung klinkereffizienter Zemente wird gebannter Ölschiefer künftig auch in verstärktem Maße herangezogen werden.

Calcinierte Tone

Natürliche getemperte Puzzolane sind thermisch aktivierte Tone, Schiefer, Sedimentgesteine oder Stoffe vulkanischen Ursprungs. Das puzzolanische Potenzial wird abhängig vom Material durch eine thermische Behandlung meist zwischen 600 und 1000 °C (Calcination) erzeugt. Derzeit werden natürlich getemperte Puzzolane nur in sehr geringem Umfang zur Zementproduktion eingesetzt.

Calcinierte Tone eignen sich als puzzolanischer Zementbestandteil. So lassen sich aus ihnen z.B. in Kombination mit ungebranntem Kalkstein als weiterem Hauptbestandteil leistungsfähige Zemente herstellen [31, 32, 33]. Für calcinierte Tone als Zementbestandteil können Tonqualitäten verwendet werden, die i.d.R. für keramische Produkte oder Ziegelerzeugnisse nicht herangezogen werden können. Entsprechende ergiebige Lagerstätten sind vorhanden (Abbildung 14) und reichen aus, um rückläufige Mengen an Flugasche und Hüttensand großteils zu kompensieren. Zudem können auch alternative Rohstoffe, wie z.B. tonhaltige Waschlamm, herangezogen werden. Viele Zementhersteller erproben die Herstellung und Verwendung calcinierter Tone. Es gibt bereits konkrete Pläne für die Produktion entsprechender tonhaltiger Zemente. Der Bedarf an calcinierten Tonen wird in Deutschland kontinuierlich zunehmen und bis 2050 voraussichtlich etwa 4,3 Mio. t betragen. Hierfür würden etwa 5,6 Mio. t Roh-ton benötigt.

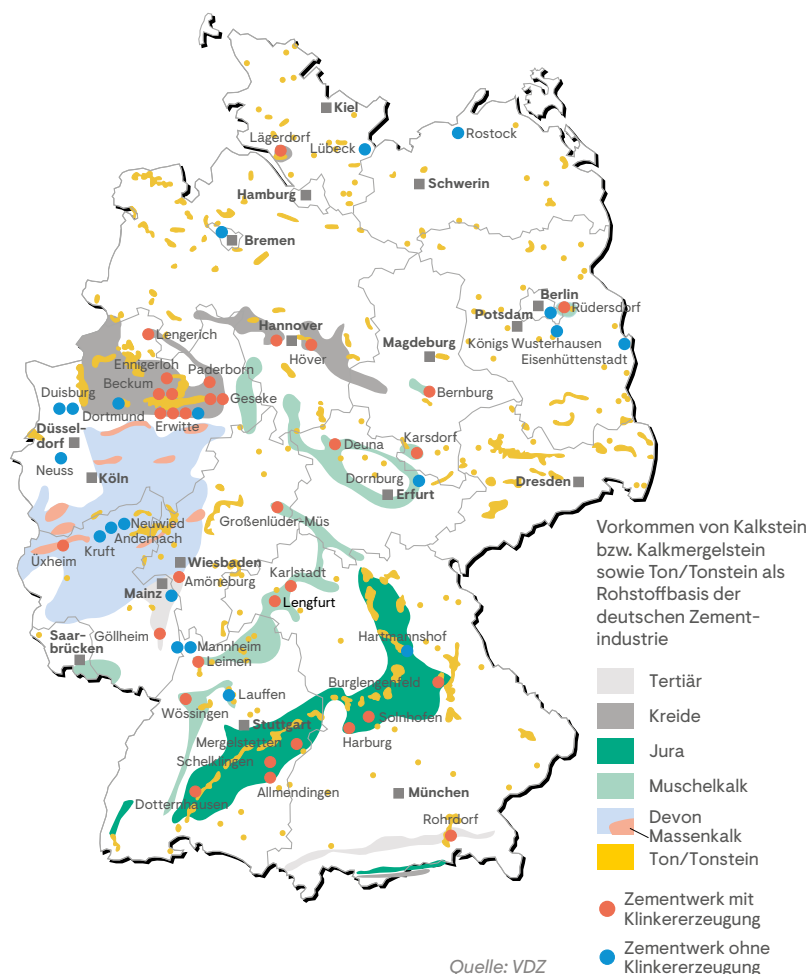
2.4.3 Alternative Zemente und Bindemittel

Bislang existiert noch kein durchgängiges Bindemittelkonzept, mit dem Portlandzementklinker in größerem Umfang ersetzt werden könnte. Nach derzeitigem Stand der Technik und Forschung kommen mittelfristig folgende alternative Klinker-/Bindemittelsysteme infrage: Calcium-Sulfoaluminat-Zemente (CSA-Zemente), Calciumhydrosilicate (CHS) sowie die Carbonatisierung von Calcium-Silicat(hydraten). Für ihre Herstellung werden teils Rohstoffe benötigt, die überregional nicht in den erforderlichen Mengen zur Verfügung stehen. Bis 2050 werden sie voraussichtlich nicht mehr als 5% des Portlandzementklinkers bei der Zementproduktion ersetzen. Eine signifikante Absenkung des Bindemittelanteils im Beton ist durch die Verwendung alternativer Klinker-/Bindemittelsysteme allein nicht zu erwarten, sodass die Einsparungen an natürlichen Ressourcen als vergleichsweise gering eingeschätzt werden.

2.5 Beton: Ressourceneffizienz, Wiederverwendung und Recycling

Beton ist ein bewährter Massenbaustoff und insofern kommt der Frage, wie Rohstoffe im Betonbau noch effizienter eingesetzt und im Kreislauf ge-

Abbildung 14: Zementwerke und Rohstoffvorkommen in Deutschland



führt werden können, eine immer größere Bedeutung zu. In allen Phasen, von der Herstellung des Betons bis zu seiner Wiederverwendung oder dem Recycling, geht es darum, alle unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten möglichen Potenziale im Hinblick auf Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft zu heben.

2.5.1 Ressourcen heute

Im Jahr 2020 wurden in Deutschland etwa 100 Mio. Kubikmeter Beton und weitere zementgebundene Baustoffe (rd. 242 Mio. t) produziert. Dafür wurden rd. 30 Mio. t Zement, rd. 192 Mio. t mineralische Gesteinskörnungen, rd. 17 Mio. t Wasser sowie rd. 0,2 Mio. t Betonzusatzmittel verwendet. Als alternative Rohstoffe kamen rund 2,0 Mio. t Flugaschen sowie etwa 0,9 Mio. t Recycling-Gesteinskörnung aus dem Betonrecycling zum Einsatz (Abbildung 15).

Für die Schonung von Ressourcen ist es essenziell, bereits eingesetzte Primärrohstoffe als sog. alternative oder Recycling-Rohstoffe im Kreislauf zu führen. Ziele und Methoden einer solchen „Circular Economy“ werden zum Beispiel in [34, 35] beschrieben. Im Betonbau beginnt die „Circular Economy“ bereits bei der Herstellung des Betons mit der Aufbereitung nicht verbauten Frischbetons, der in Deutschland in der Regel ausgewaschen wird. Die daraus wiedergewonnene Gesteinskörnung und das Restwasser mit Feinstoffen werden zur Herstellung von neuem Frischbeton wiederverwendet.

Am Ende seines Lebensweges sollte Beton wiederverwendet oder stofflich verwertet werden [36]. Nach den geltenden Regelwerken kann recycelte Gesteinskörnung > 2 mm aus Betonbruch (Betonspplitt, Typ 1) bis zu einem Anteil von 45 Vol.-% bzw. aus gemischtem Bauschutt (Bauwerksplitt, Typ 2) bis zu einem Anteil 35 Vol.-% in neuem Beton eingesetzt werden [37]. Gemäß Neufassung der DIN 1045-2 dürfen künftig auch Gesteinskörnungen (Typ 1) ≤ 2 mm (Betonbrechsand) in Beton in begrenztem Maß verwendet werden.

Aus den jährlich anfallenden mineralischen Bauabfällen werden bereits heute Recycling-Baustoffe für verschiedene Anwendungen hergestellt. Recycelte Gesteinskörnungen werden jedoch derzeit

größtenteils nicht separat für eine Nutzung als Gesteinskörnung in Beton [36] aufbereitet, sondern in erster Linie im Erd- und Straßenbau verwertet.

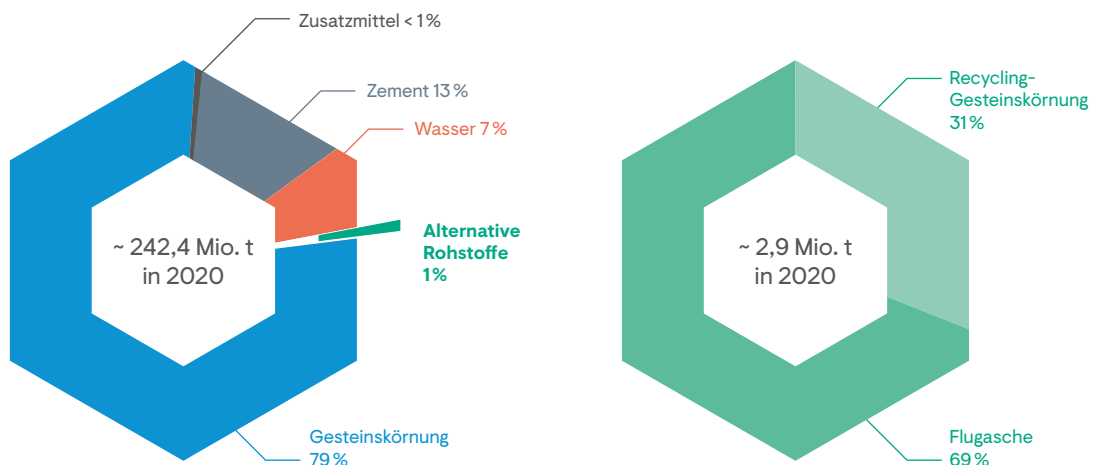
2.5.2 Ressourcen morgen

Abbildung 16 zeigt eine Abschätzung der für die Betonherstellung im Jahr 2050 notwendigen Stoffmengen. Dabei spielt die verstärkte Verwendung von Recycling-Gesteinskörnungen anstelle von natürlichem Kies und Naturstein im Beton eine besondere Rolle. In Abhängigkeit von verschiedenen Annahmen wird in dieser Studie der Anteil an recycelten Gesteinskörnungen, der in Betonen in 2050 verwendet werden kann, auf ungefähr 53 Mio. t geschätzt.

Recycling-Gesteinskörnungen – Verfügbarkeit und Aufbereitung

Die notwendigen Mengen an Abbruchbeton können aus dem zukünftig zu erwartenden Bauschutt-Aufkommen generiert werden, u.a. weil das „anthropogene Lager“ kontinuierlich wächst und damit nach der Nutzung für eine Wiederverwendung zur Verfügung steht [38, 39]. Grundsätzlich sollte Abbruchbeton der Industrie zur Zement- und Betonherstellung zur Verfügung gestellt werden. Fallweise bedarf es einer ökologischen und öko-

Abbildung 15: Bestandteile von Beton 2020



Quellen: VDZ, Statistisches Bundesamt, Bundesverband Mineralische Rohstoffe e.V., VGB Power Tech, Umweltproduktdeklarationen (EPDs) für Beton, Deutsche Bauchemie



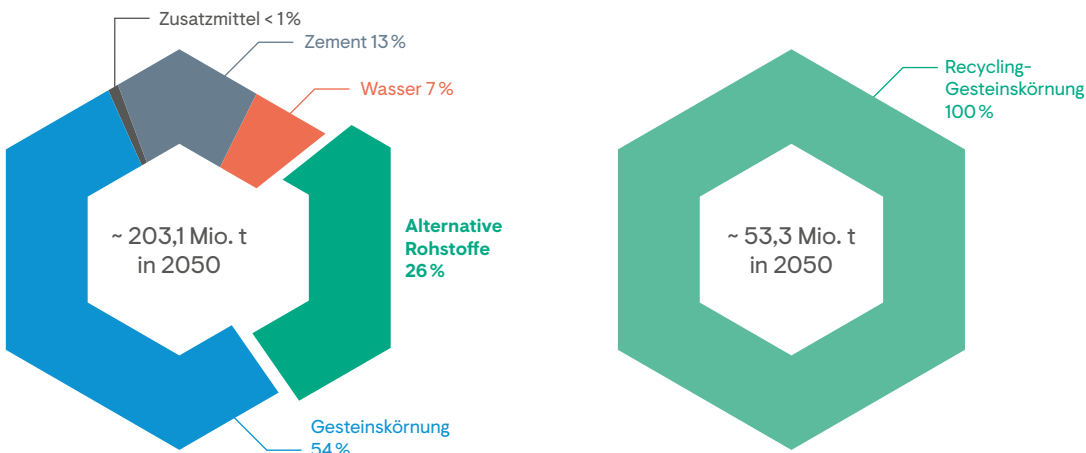
nomischen Bewertung, ob Abbruchbeton als Gesteinskörnung im Beton wiederverwendet oder im Erd- und Straßenbau verwertet wird. In [40] wurde ein ökonomisches Bewertungskonzept entwickelt, mit dem die ökologische Vorteilhaftigkeit der Verwendung von Recycling-Materialien in „Urban Mining“-Projekten abgeschätzt werden kann.

Weitere Fortschritte bei der Trennung und Aufbereitung von Abbruchbeton, ein auf die Lage von Betonwerken abgestimmtes Netz von Recyclinganlagen, die Fortschreibung relevanter Regelwerke sowie Marktanforderungen werden dazu führen, dass künftig größere Mengen an Recycling-Gesteinskörnung im Beton eingesetzt werden. Eine wesentliche Herausforderung besteht darin, die Bestandteile von Festbeton noch besser auftrennen zu können. Weiterentwicklungen bei der Aufbereitungstechnik, z.B. beim Brechen, bei der Siebung und Sichtung bzw. bei neueren Verfahren wie der elektrodynamischen Fragmentierung [41], könnten hier zu einer Verbesserung führen. Dabei gilt es auch, neue Materialverbünde, die sich derzeit in der Entwicklung befinden, wie z.B. mit alternativen Bewehrungen aus Carbon-/Textilfasern, in den Blick zu nehmen [42]. Hochwertig aufbereitete, weitgehend vom Zementstein befreite Gesteinskörnungen aus dem Rückbau können genauso verwendet werden wie Kies und Na-

turstein aus natürlichen Vorkommen. Die bislang verarbeitungstechnisch teilweise erforderlichen höheren Leimgehalte in Betonen mit Recycling-Gesteinskörnung können dann sukzessive entfallen. Mit einer Wiederverwendung des verbleibenden Zementsteins, der sich aufgrund seiner mineralischen Zusammensetzung gleichermaßen als alternativer Rohstoff für die Klinker- als auch die Zementherstellung eignet, ließe sich der Kreislauf des Betons vollständig schließen (siehe Abschnitte 2.3.2 und 2.4.2).

Die Grundlage für eine erfolgreiche Kreislaufführung von Baustoffen wird zum Teil schon vor Beginn eines Bauvorhabens gelegt. Bereits bei der Planung und später bei der Errichtung von Bauwerken müssen die Voraussetzungen geschaffen werden, um Betonbauteile am Nutzungsende möglichst wiederverwenden oder sortenrein abbrechen und die Bestandteile recyceln zu können. Zur hochwertigen Nutzung des Bauschutts als recycelte Gesteinskörnung im Beton oder als alternativer Rohstoff im Zement ist folglich ein geringer Anteil an Fremdbestandteilen beim Rückbau anzustreben. Beton und Stahl lassen sich dabei im Vergleich zu Putzen und anderen Beschichtungen vergleichsweise einfach trennen. Einige Bundesländer machen bereits entsprechende Vorgaben [43].

Abbildung 16: Bestandteile von Beton im Szenario 2050



Quelle: VDZ

Weitere Maßnahmen in der Planungs-, Errichtungs- und Nutzungsphase von Bauwerken können sein:

- konstruktive Trennung von Bauteilen mit unterschiedlichen Baustoffen
- konstruktive Trennung von Tragwerk und Ausbau, z.B. durch Beton-Skelett-Tragwerke
- Planung der Wiederverwendbarkeit von Betonfertigteilen
- Einsatz von Sichtbeton statt beschichteter oder verkleideter Oberflächen
- Vermeidung von Schadstoffbelastungen bei Errichtung und Nutzung.

Effizienter Einsatz von Betonausgangsstoffen

In Zukunft wird es darauf ankommen, Beton weniger im Sinne von „all purpose“-Beton einzusetzen, der sich für viele Expositionsklassen gleichzeitig eignet. Statt dessen gilt es, die Betonzusammensetzung noch gezielter auf die jeweiligen technischen Anforderungen, z.B. für Innen- oder Außenbauteile, abzustimmen. In Bezug auf Ressourceneinsparungen ist zu berücksichtigen, dass einer Verringerung des Zementanteils im Beton eine Erhöhung des Gehalts an Gesteinskörnung gegenübersteht, weshalb dem Einsatz von Recycling-Gesteinskörnung eine besondere Bedeutung zukommt. Das neue Konzept der BetonBauQualität (BBQ)⁶ [44] unterstützt eine bedarfsgerechte Differenzierung bei Planung, Betonherstellung und Bauausführung, sodass auch der Ressourceneinsatz gezielter auf das Anwendungsprofil des Betons ausgerichtet und somit effizienter gestaltet werden kann.

Klinkereffiziente Zemente, wie z.B. CEM II/C-M (Abbildung 11) und CEM II/B-LL, haben hinsichtlich ihrer technischen Eigenschaften sowie der Verfügbarkeit notwendiger Ausgangsstoffe das Potenzial, in weiten Teilen des Betonbaus hierzulande eingesetzt zu werden. Dadurch werden Portlandzementklinker und für seine Herstellung notwendige Rohstoffe eingespart und CO₂-Emissionen reduziert [45, 46]. In [30] wurde gezeigt, dass sich Zemente mit bis zu 50 M.-% Kalkstein grundsätzlich für Konstruktionsbetone eignen, wenn die Betontechnologie, u.a. durch Absenkung der Wasser-Zement-Werte (kurz: w/z-Werte) und den Einsatz von Fließmitteln, entsprechend angepasst wird. Die Vorteile des bei niedrigeren w/z-Werten dichteren Betongefüges können hierbei die Aus-

wirkungen höherer Anteile an inerten bzw. wenig reaktiven Zementbestandteilen ausgleichen. Hierzu müssen die bauordnungsrechtlichen Randbedingungen geschaffen werden. Die hierzu notwendigen Arbeiten haben begonnen.

Auch die weitere Optimierung der Packungsdichte aller Ausgangsstoffe von Beton [47, 48], der Einsatz mehrstufiger Intensiv-Mischverfahren [49] und ggf. von Ultraschall [50] bieten Möglichkeiten, natürliche Ressourcen zu sparen. Wird der Klinkeranteil durch die verstärkte Nutzung von Kalkstein oder calcinierten Tonen weiter abgesenkt, erhärten die Betone langsamer. Vor diesem Hintergrund kann der Nachweis der Betondruckfestigkeit im Alter von 56 Tagen – anstelle der heute üblichen 28 Tage – dazu beitragen, den Einsatz solcher klinkereffizienten und ressourcenfreundlichen Zemente im Beton zu fördern. Entsprechend verlängerte Ausschulfristen und Nachbehandlungszeiten können sich auf den Bauablauf auswirken und sind entsprechend zu berücksichtigen. Die Ausbildung der Mitarbeitenden, die Kommunikation zwischen allen Beteiligten und die entsprechende Qualitätssicherung entlang der Wertschöpfungskette gewinnt daher weiter an Bedeutung.

Verlängerung der Nutzungsdauer von Bauwerken

Lange Nutzungsdauern und die Möglichkeit, bestehende Bauwerke auf künftige Bedürfnisse hin flexibel anzupassen, sind eine wichtige Anforderung an das nachhaltige Bauen. Durch eine Verlängerung der Nutzungsdauer bestehender Bauwerke oder -teile kann der Bedarf für Neubauten und damit die Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen reduziert werden [51]. Durch Umbauten, Modernisierungen und (energetische) Sanierungen wird die vorhandene Bauwerkssubstanz neuen Anforderungen angepasst [52, 53]. Erhebungen zeigen, dass im Vergleich zum Neubau bis zu zwei Drittel der lebenszyklusweit erforderlichen Ressourcen eingespart werden können [53, 54]. Derzeit wird das Modernisierungs- und Sanierungspotenzial in Deutschland nicht voll ausgeschöpft [55]. So wird bei der Planung von Stahlbetonbauwerken üblicherweise von einer planmäßigen Nutzungsdauer von 50 Jahren bzw. bei anspruchsvollen Infrastrukturbauwerken von 100 Jahren ausgegangen. Im üblichen Hochbau ist allerdings nur selten die Dauerhaftigkeit des Stahlbetons der Grund für den

⁶ Kernstück des BBQ-Konzepts ist die Verbesserung der Kommunikation entlang der gesamten Wertschöpfungskette von der Planung über die Betonherstellung bis zur Bauausführung – DAfStb-Richtlinie „Betonbauqualität für Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton (BBQ-Richtlinie)“.



Rückbau, sondern meist eine Veränderung der Nutzungsanforderungen [56]. Oft wird sich für einen Neubau statt für einen Umbau bzw. eine Sanierung entschieden, weil sich dadurch bislang die eigenen Anforderungen meist einfacher realisieren und die Kosten sicherer kalkulieren lassen. Ökobilanzielle Vorteile, die eine energetische Sanierung und weitere Nutzung von Bestandsgebäuden mit hohem Stahlbetonanteil im Vergleich zum Rückbau und der Wiederverwendung der recycelten Materialien mit sich bringen, müssen bei einer Bewertung weiter in den Vordergrund rücken [40].

Um die Umbau-, Modernisierungs- und Sanierungsquote weiter zu erhöhen, sind bereits bei der Planung von Neubauten die Flexibilität der Grundrisse und Raumhöhen sowie Nutzlastreserven zu berücksichtigen [52, 57]. Zudem sind Systeme für eine lebenszyklusweite Erfassung der Rohstoffanspruchnahme, d.h. für eine Rohstoffbilanz in der Erstellungs- und Nutzungsphase sowie für Umbau-, Modernisierungs- bzw. Sanierungsmaßnahmen, zu entwickeln und zu etablieren. Hierzu wird in [52] die

Entwicklung eines „Ressourcenpasses“ für Gebäude mit Analogien zum Gebäudeenergiepass vorgeschlagen, der u.a. Angaben zum Materialbedarf in den verschiedenen Phasen des Lebenszyklus und zur entsprechenden Materialintensität enthält.

Wiederverwendung von Betonbauteilen

Die Wiederverwendung ganzer Betonbauteile ist ein bislang weitgehend ungenutztes Potenzial und hat aus Sicht der Nachhaltigkeit viele Vorteile. Schätzungen gehen davon aus, dass derzeit deutlich weniger als 1% aller Bauteile wiederverwendet werden [58]. Für die Wiederverwendung bieten sich besonders gut demontierbare Fertigteile, z.B. Stützen, Balken, Decken und Wandelemente an [59, 60]. Diese Bauteile enthalten große Mengen an Rohstoffen, Arbeitsleistung und Energie. Gründe für die geringe Wiederverwendungsquote sind vor allem fehlende modulare Eigenschaften bzw. Demontagefähigkeit sowie offene, u.a. abfall- und produktrechtliche, Fragen zur Genehmigung des Wiedereinsatzes und zur Haftung bzw. Gewährleistung [60].





Die erzielbaren Einsparungen an Rohstoffen und Energie sowie CO₂-Emissionen sind als relativ hoch einzuschätzen, sodass sich auch längere Transportwege und entsprechende Aufwendungen für die Aufbereitung und Gütesicherung rechnen würden [59, 61]. Ein mehrfacher universeller Einsatz von Betonelementen wird durch eine modulare Bauweise gefördert [62].

In Zukunft dürften dreidimensionale Planungswerkzeuge (z.B. BIM-Systeme) die Wiederverwendung von demontierten und aufbereiteten Betonteilen vereinfachen. Die Bauteileigenschaften und auch ihre Zusammensetzung werden idealerweise bereits bei der Errichtung des Bauwerkes oder nach der Demontage digital erfasst, sodass von jedem Bauteil ein „digitaler Zwilling“ existiert. Somit entsteht eine Bauteildatenbank, die vom Planer für den Entwurf neuer Tragwerke genutzt werden kann. Nach Beurteilung des jeweiligen Zustands rückgebauter Betonelemente, durch z.B. Materialprüfung oder Monitoring, können dann die Gebrauchstauglichkeit und Restnutzungsdauer ermittelt werden. Diese Überlegungen spiegeln sich auch in der geplanten Entwicklung von Ressourcenpässen für Bauwerke wider, die einen wichtigen Bestandteil des sogenannten „Urban Mining“ darstellen.

2.5.3 Ressourceneffiziente Betonbauteile und Technologien

Die wichtigsten Entscheidungen für die Ressourceneffizienz eines Gebäudes oder eines Infrastrukturbauwerkes werden in der Konzeptions- und Planungsphase getroffen [63]. Beton wird heute in vielen Anwendungen in Kombination mit anderen mineralischen Baustoffen, wie zum Beispiel Ziegel- oder Kalksandsteinmauerwerk, eingesetzt. Mit dieser Art des (hybriden) Bauens werden die Stärken der Baustoffe gezielt kombiniert. Bauteile mit reduziertem Betoneinsatz können bei einer für den jeweiligen Anwendungszweck angemessenen Leistungsfähigkeit dazu beitragen, in signifikantem Umfang Ressourcen einzusparen.

Flach- und Hohldecken

Mit vorgespannten Flach- bzw. Hohldecken besteht bereits heute die Möglichkeit, den Materialeinsatz zu optimieren, wenn alle zu berücksichtigenden Randbedingungen, wie z.B. Schall- und Brandschutz, dies zulassen. Spannbeton-Fertigdecken benötigen im Vergleich zu anderen Betondeckensystemen bei vergleichbaren statischen Anforderungen an die Decke bis zu 50 %

weniger Beton und bis zu 75 % weniger Stahl [64, 62]. Beim Deutschen Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb) wurde eine entsprechende Richtlinie „Bauteile aus Fertigteilplatten“ erarbeitet, deren Veröffentlichung in 2022 erwartet wird. Eine ähnliche Methode zur Materialeinsparung in Gebäudedecken besteht im gezielten Einbringen von Hohlräumen durch den Einbau von Hohlkörpern in Stahlbetondecken [65, 63]. Mit hochfesten und ultrahochfesten Betonen lassen sich zudem schlankere, materialsparende Bauteile selbst bei hohen Beanspruchungen erzielen [66].

Verschiedene, teils neue Technologien können künftig dazu beitragen, den Ressourceneinsatz der Betonbauweise weiter zu reduzieren. Dazu gehören u.a. Ansätze wie Carbonbeton, Gradientenbeton und Infraleichtbeton, additive Fertigung sowie hybride Bauweisen, z.B. Holz/Beton-Verbundbauweise, die im Folgenden vorgestellt werden.

Carbonbeton

Carbonbeton ist ein Verbundwerkstoff aus Beton und einer Bewehrung aus Kohlenstofffasern (Carbon). Beim Vergleich eines Doppel-T-Trägers aus Carbonbeton bzw. Stahlbeton mit jeweils äquivalenter Tragfähigkeit oder beim Vergleich einer Carbonbeton- mit einer Stahlbetonbrücke werden Möglichkeiten der Einsparung des Betons von bis zu 50 % in [67, 68] angegeben. Für Carbonbeton ergeben sich auch breite Einsatzbereiche, wenn bestehende Bauwerke mechanisch verstärkt oder instandgesetzt werden, insbesondere wenn Stahlbeton aus technischer und wirtschaftlicher Sicht an Grenzen stößt [68].

Gradienten- und Infraleichtbeton

Bei Gradientenbeton wird die Betonzusammensetzung über den Querschnitt eines Bauteils variiert. Das Prinzip beruht darauf, dass Beton in tragenden Bauteilen nicht über den ganzen Querschnitt gleich stark beansprucht wird. So hat Gradientenbeton z.B. nach außen ein dichtes Gefüge mit hoher Tragfähigkeit und weist zugleich im Kern hohe Dämmeigenschaften durch z.B. Lufteinschlüsse auf. In Bereichen mit geringer Belastung kann nach [63] die Dichte solcher Bauteile so weit verringert werden, dass im Vergleich zu einem vollmassiven Bauteil Materialeinsparungen von bis zu 60 % möglich sind. Infraleichtbetone ermöglichen auf ähnliche Weise u.a. durch ihre poröse Gesteinskörnung und einen entsprechend hohen Luftanteil z.B. Außenwandkonstruktionen mit Trag- und Wärmedämmeigenschaften [69].

Additive Fertigung

Bei der generativen oder additiven Fertigung im Betonbau wird durch einen 3D-Drucker Mörtel bzw. Feinbeton Schicht für Schicht aufgetragen und so ein Bauteil erzeugt. Grundsätzlich können bei der Anwendung, z.B. für mehrschalige Wände und komplizierte Bauteilgeometrien, Material- und Bauzeiteinsparungen gegenüber konventionellen Betonierverfahren erreicht werden. Einen Überblick der Potenziale dieser Technologien geben z.B. [70, 71]. Beim DAfStb ist ein Sachstandsbericht „Digitaler Betonbau durch additive Verfahren – Sachstand und Forschungsbedarf“ in Vorbereitung. Eine Zusammenfassung enthält [74].

Hybride Bauweisen

Hybride Bauweisen sind bereits heute weit verbreitet und haben sich bewährt, da sich dadurch die technischen, bauphysikalischen Eigenschaften verschiedener Baustoffe kombinieren lassen. So können z.B. tragfähigere, dünnere Rippen- und Flachdecken erstellt oder ertüchtigt werden, indem z.B. Holzbalken und Beton auf der Baustelle oder im Fertigteilwerk schubfest verbunden werden. Das Holz übernimmt die Zugkräfte und der Beton die Druckkräfte [73]. Für diese Bauweise ist zurzeit noch eine Europäische Technische Zulassung (ETA) bzw. eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) erforderlich. Eine Aufnahme der Bauweise in den Eurocode 5 [72] ist in Vorbereitung.

Wie groß die Effekte der beschriebenen Technologien auf die Einsparung natürlicher Ressourcen am Ende wirklich ausfallen, kann zum Teil derzeit nur sehr grob abgeschätzt werden. Es wird immer im Einzelfall zu entscheiden sein, welche Lösung unter Berücksichtigung aller Randbedingungen aus Tragwerksplanung, Bauphysik, Brandschutz etc. gewählt werden kann. Die Frage der Ressourcenschonung wird künftig in der Planungspraxis einen höheren Stellenwert einnehmen. Dabei können in Zukunft auch völlig neue Konstruktionsansätze eine Rolle spielen, wenn diese, z.B. mit baubionischen Strukturen, die Prinzipien der Natur umsetzen [75, 76].

3

Potenziale zur Schonung natürlicher Ressourcen

Szenario 2050

Potenziale zur Schonung natürlicher Ressourcen – Szenario 2050

Das vorliegende Kapitel zeigt auf, wie natürliche Ressourcen entlang der Wertschöpfungskette von Zement und Beton in Deutschland bis 2050 eingespart werden können. Abgeleitet werden die hierbei beschriebenen Potenziale aus den in Kapitel 2 dargestellten Technologien und Ansätzen:

Zementklinker

Auf der ersten Wertschöpfungsstufe gilt es, die Potenziale zur Verringerung des Kalksteineinsatzes für die Zementklinkerherstellung zu heben. Hierbei spielt der Einsatz von Recycling-Materialien wie Betonbrechsand im Klinkerbrennprozess eine Rolle. Darüber hinaus können alternative Rohstoffe zunehmend an Bedeutung gewinnen. Das gilt beispielsweise für Schlacken aus der Müllverbrennung oder künftige Schlacken aus der Wertschöpfungskette des Stahls, die bislang in der Zementindustrie nicht eingesetzt werden.

Zement

Bei der Mahlung oder dem Mischen verschiedener Bestandteile zum Zement kommen bereits heute mit Hüttensand, Flugasche oder REA-Gips⁷ alternative Rohstoffe aus anderen Industrien zum Einsatz, um den Klinkerfaktor zu verringern. Aufgrund des anstehenden industriellen Strukturwandels und der Energiewende wird erwartet, dass die künftigen Mengen dieser Stoffe rückläufig sind. Diese können einerseits durch den Einsatz von recycelten Materialien, wie zum Beispiel Betonbrechsanden, kompensiert werden. Andererseits werden Primärrohstoffe wie (calcinierte) Tone und ungebrannter Kalkstein in höherem Maße als bisher zur Herstellung klinkereffizienter Zemente eingesetzt.

Beton

Auf der dritten Wertschöpfungsstufe fließen neben möglichen Potenzialen des recyclinggerechten Bauens insbesondere die Nutzung von Recycling-Gesteinskörnungen aus dem Rückbau von Bauwerken sowie die Optimierung von Betonrezepturen in Bezug auf den Ressourceneinsatz ein.

Bauwerk

Traditionell hat es sich bewährt, bei Standardanwendungen Betone einzusetzen, die allen Anforderungen eines Bauwerkes mit nur wenigen Beton-

rezepturen gerecht werden. Oft ist dieses jedoch nicht erforderlich, denn schon heute lassen die Betonnorm oder Anwendungszulassungen für unterschiedliche Anforderungen durchaus unterschiedliche Betonrezepturen zu. Der Weg vom Beton, der alle Anwendungsfälle abdeckt, hin zu einem differenzierten Einsatz verschiedener Betone führt zwar zu mehr Komplexität, letztlich wird er dadurch aber dazu beitragen, dass vermehrt klinker- und ressourceneffiziente Zemente im Beton zum Einsatz kommen können. Gleichmaßen kann dadurch einer Verlängerung der Nutzungsdauer von Bauwerken und Wiederverwendung von Betonkonstruktionen schon beim Bau besser Rechnung getragen werden. Betonkonstruktionen mit aufgelösten Querschnitten und verringertem Betoneinsatz sind eine weitere Möglichkeit, Ressourcen einzusparen.

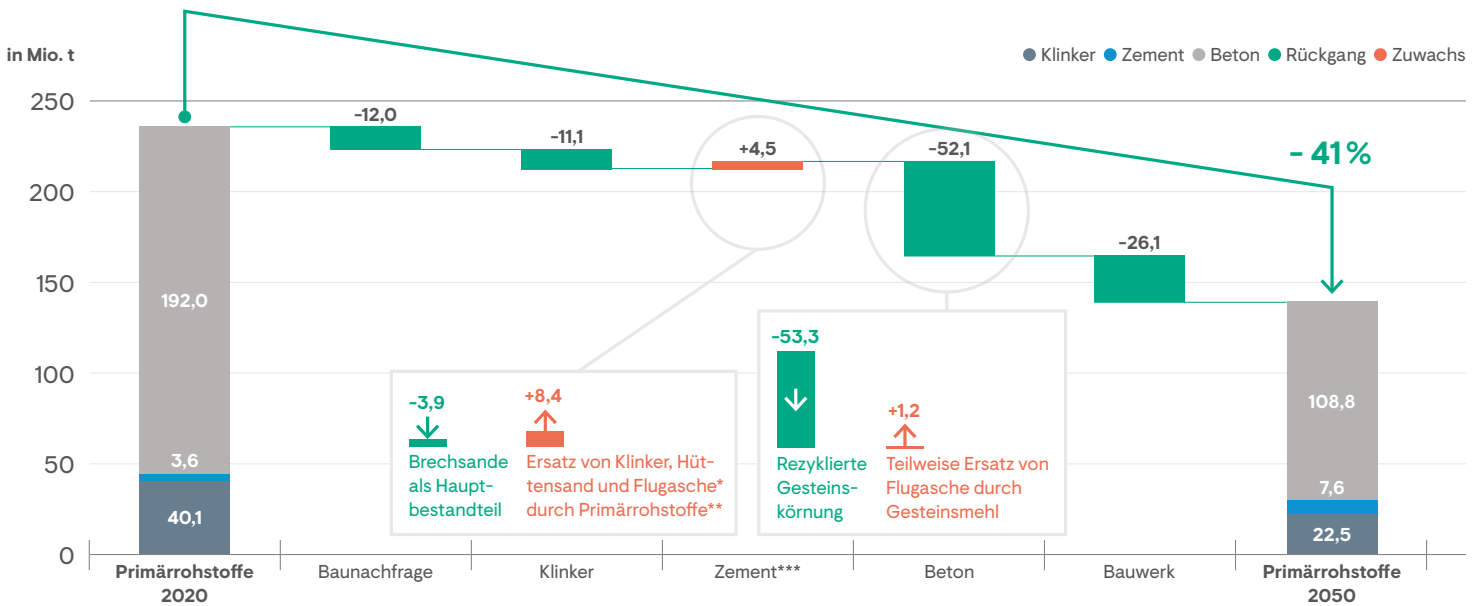
Für die Bestimmung der absoluten Ressourceneinsparung ist auch die Entwicklung der Baunachfrage relevant. Erst in der gemeinsamen Betrachtung von Baunachfrage und der Anwendung deutlich veränderter Technologien ergibt sich die künftige Klinker-, Zement- und Betonnachfrage mit den jeweiligen Rohstoffbedarfen. Bei der Nachfrage nach Beton wird bis 2030 mit einem leichten Anstieg gerechnet und bis 2050 mit einem moderaten Rückgang um 5%.

3.1 Bilanzgrenzen

Das in dieser Studie betrachtete Szenario umfasst ausschließlich mineralische Rohstoffe. Durch Erhebungen des VDZ, des Bundesverbandes mineralische Rohstoffe (MIRO) sowie der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) werden die Einsatzmengen regelmäßig ermittelt, sodass sich Minderungsfortschritte gut beobachten lassen. Brennstoffe werden in der Stoffstrombilanz im Folgenden nicht betrachtet, da sie einen vergleichsweise geringen Anteil an den eingesetzten Materialien ausmachen. Es wird davon ausgegangen, dass die heute in Teilen noch eingesetzten fossilen Brennstoffe bis 2050 durch alternative Brennstoffe und Wasserstoff zu 100% substituiert werden. In Summe dürfte der hieraus resultierende Materialeinsatz in einer ähnlichen Größenordnung liegen wie zum jetzigen Zeitpunkt (ca. 5 Mio. t). Ebenfalls nicht im Szenario betrachtet wurde der Einsatz von Wasser für die Betonherstellung. Hier kann von einem rückläufigen Einsatz ausgegangen werden, der mit dem zunehmenden

⁷ REA-Gips = Gips aus der Rauchgasentschwefelung

Abbildung 17: Einsparpotenziale beim Primärrohstoffeinsatz entlang der Wertschöpfungskette von Zement und Beton im Szenario 2050



Quelle: VDZ

Anmerkungen:

* Ersetzt wird hier die Flugasche sowohl im Zement als auch im Beton.

** Hierunter fallen Kalkstein und calcinierte Tone.

*** Umfasst primäre Hauptbestandteile und Sulfatträger; Klinker wird separat betrachtet.

Marktanteil von klinkerärmeren Zementen einhergeht. Je geringer der Klinkeranteil im Zement ausfällt, desto weniger Wasser wird tendenziell für die Betonherstellung benötigt. Zudem wird auch davon ausgegangen, dass der Anteil von Betonen mit geringeren Wasser/Zement-(w/z)-Werten im Vergleich zu heute ansteigt.

3.2 Ergebnisse und Bewertung

Im betrachteten Szenario wird der Einsatz natürlicher mineralischer Rohstoffe in 2050 um 96,8 Mio. t reduziert, was einem Rückgang von 41% gegenüber dem Status quo im Jahr 2020 entspricht (Abbildung 17).

Baunachfrage

Ein Rückgang der Baunachfrage⁸ im Wohnungsbau, Nichtwohnbau und Tiefbau um rund 5% bis 2050 wird zu einem entsprechend geringeren Bedarf an Beton führen. Gegenüber dem heutigen Niveau von

knapp unter 100 Mio. m³ ist in 2050 mit einer Produktionsmenge von rund 95 Mio. m³ Beton zu rechnen, einem Rückgang, der einer Einsparung von rd. 12,0 Mio. t an natürliche Ressourcen entspricht.

Klinker und Zement

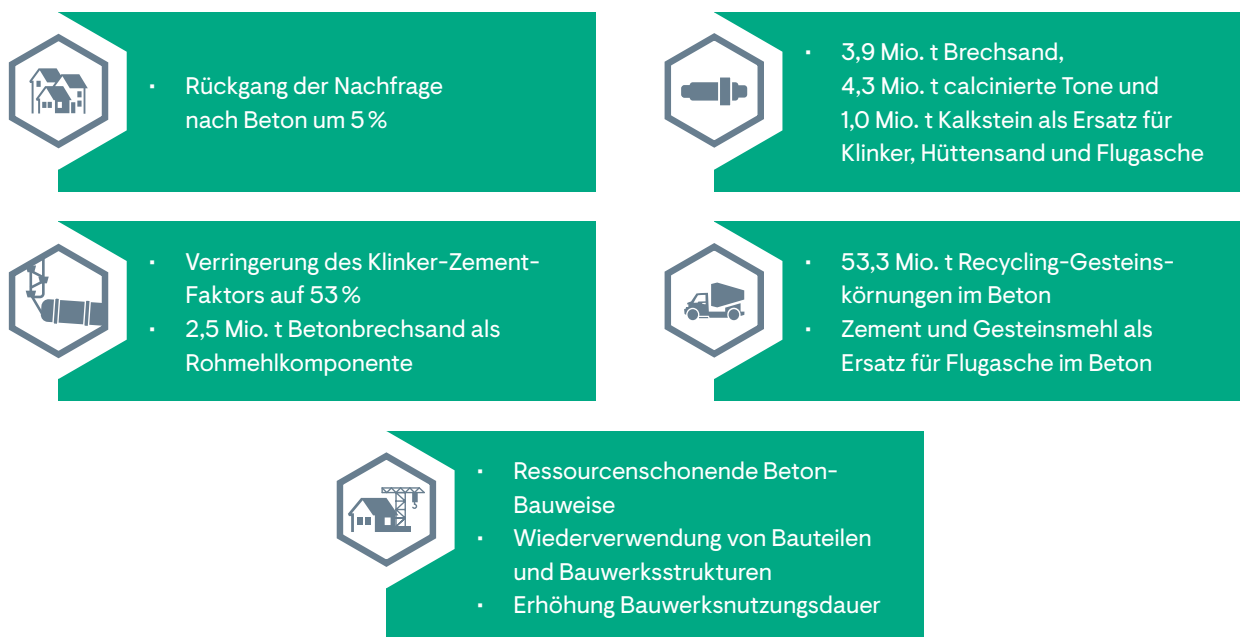
Bei der Klinkerherstellung lässt sich der Primärrohstoffeinsatz um rund 11,1 Mio. t verringern, hierzu tragen zwei Maßnahmen bei: 2,5 Mio. t natürliche Ressourcen lassen sich einsparen, indem 10% des Rohmehls durch Betonbrechsande aus dem Rückbau von Bauwerken ersetzt werden. Bei einer verbesserten Abtrennung der Sandanteile könnte dieser Anteil sogar erhöht werden.

Weitere rund 8,6 Mio. t natürliche Ressourcen werden durch die Reduzierung des Klinkeranteils im Zement erreicht. Hierbei spielen neue klinkereffiziente Zemente eine wichtige Rolle. So wird davon ausgegangen, dass neben klinkereffizienten CEM II/C-Zementen ab 2030 zusätzlich auch CEM VI-Zemente erhebliche Marktanteile erreichen. Auf diese Weise

8 Wohnungsbau: konstante Bautätigkeit bis 2030, anschließend rückläufig; Nichtwohnbau: konstante Bautätigkeit bis 2050; Tiefbau: steigende Bautätigkeit bis 2040, anschließend rückläufig.



Abbildung 18: Annahmen zur Ermittlung der Einsparpotenziale beim Primärrohstoffeinsatz für Zement und Beton im Szenario 2050



Quelle: VDZ

wird eine Absenkung des Klinkerfaktors von derzeit 71% auf 53% in 2050 erreicht, sodass der Klinkerbedarf von heute ca. 25 Mio. t auf etwa 15 Mio. t in 2050 absinkt.

Würde die reduzierte Klinkermenge im Zement allein durch natürliche Materialien wie calcinierte Tone (4,3 Mio. t, entsprechen rd. 5,6 Mio. t an Ton, so wie er in Tongruben gewonnen wird) und Kalkstein (3,1 Mio. t) ersetzt werden, ergäbe sich unter Berücksichtigung einer verringerten Sulfatträgermenge (rd. -0,3 Mio. t) ein Mehrbedarf an natürlichen Rohstoffen von 8,4 Mio. t. Durch den Einsatz von 3,9 Mio. t Brechsand aus Beton- bzw. Mauerwerksbruch wird der zusätzliche Kalksteinbedarf sowie die bereits heute eingesetzte Kalksteinmenge (1,8 Mio. t) teilweise kompensiert. Insgesamt ergibt sich somit gegenüber 2020 ein Mehrbedarf an natürlichen Rohstoffen von 4,5 Mio. t.

Die Hüttensandmengen werden infolge der geplanten Umstellung der Roheisenproduktion auf

das wasserstoffbasierte Direktreduktionsverfahren von derzeit jährlich rund 5 Mio. t auf rund 2 Mio. t in 2050 zurückgehen. Zudem wurde angenommen, dass in 2050 Flugasche für Zement und Beton nicht mehr zur Verfügung steht. Die künftig entfallenden Mengen an REA-Gips für die Zementherstellung werden durch verstärktes Recycling von Gipsabfällen zur Verfügung gestellt⁹. Darüber hinaus werden analog zu heute auch weiterhin Gips und Anhydrit aus natürlichen Quellen benötigt.

Beton

Das größte Einsparpotenzial durch die Kreislaufwirtschaft ergibt sich mit etwa 52,1 Mio. t bei der Betonherstellung. Aus der für 2050 hergeleiteten Betonmenge von rund 203 Mio. t wurde unter Berücksichtigung der DAfStb-Richtlinie zum Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen [37] berechnet, dass etwa 53,3 Mio. t natürliche durch Recycling-Gesteinskörnungen aus dem Abbruch und Rückbau von Bauwerken ersetzt werden können, sodass aus den Bestandteilen des Altbetons wieder

⁹ Bisher reichen die zur Verfügung stehenden Mengen an Recycling-Gips nicht aus, um die entfallenden REA-Gips-Mengen im Zement zu ersetzen. Deshalb gilt es, das Recycling von Gipsprodukten und Bauabfällen auf Gipsbasis zu verbessern.

neuer Beton produziert werden kann. Dieses große Potenzial von etwa einem Drittel der für Beton benötigten Gesteinskörnung ist jedoch an verschiedene Voraussetzungen geknüpft. So wird erwartet, dass die notwendigen Mengen aus dem künftigen Bauschutt-Aufkommen generiert werden können, nicht zuletzt, weil „der Betonanteil in den zum Abriss kommenden Bauwerken zunehmen wird, da der Einsatz von Beton seit den 1950er Jahren deutlich angestiegen ist“ [77]. Dieser Stoffstrom fließt im betrachteten Szenario im Gegensatz zu heute verstärkt in die Betonherstellung¹⁰. Eine verbesserte Erfassung sowie wirtschaftliche Sammlung und insbesondere Aufbereitung der mineralischen Bauabfälle sind weitere wesentliche Bedingungen für die Umsetzung dieses Einsparpotenzials.

Ein gegenläufiger Effekt ergibt sich bei der Betonherstellung durch den Wegfall der rd. 2 Mio. t Flugasche. Diese wird im betrachteten Szenario zu 40 % durch Zement sowie zu 60 % durch Gesteinsmehl (1,2 Mio. t) ersetzt und erhöht hier entsprechend den Bedarf an Primärrohstoffen.

Bauwerk

Im Bauwerk ergibt sich im Szenario ein Einsparpotenzial von insgesamt etwa 26,1 Mio. t natürlichen Ressourcen in 2050. Zum einen ermöglicht die Weiterentwicklung der Betonbauweise Einsparungen von etwa 15,7 Mio. t. Hierbei spielt u.a. eine entsprechend materialeffizientere Gebäudeplanung eine wichtige Rolle. Es werden verstärkt Bauweisen genutzt, die mit einem geringeren Betonvolumen eine gleichbleibende Leistungsfähigkeit erzielen. Beispiele sind Betonteile in Form vorgespannter Flach- und Hohldecken¹¹, aber auch der Einsatz alternativer Bewehrungsmaterialien wie Carbon-/Textilbeton oder neuer Betonieretechniken wie der additiven Fertigung (3D-Druck). Aufgrund der bislang wenig vorhandenen Praxiserfahrungen mit alternativen Bewehrungen und additiver Fertigung baut das Szenario überwiegend auf der Anwendung der „konventionellen“ Stahlbetonweise auf. Es wird angenommen, dass diese bis 2050 zu 20 % durch materialeffizientere Bauweisen ersetzt wird und so zu einer durchschnittlichen Einsparung von 30 % der für die entsprechenden Bauteile benötigten Betonmenge führt.

Durch die Verlängerung der Bauwerkslebensdauer und die Wiederverwendung von Betonbauteilen lassen sich in 2050 weitere knapp 10,4 Mio. t natürliche Rohstoffe einsparen¹². Langfristig ließen sich mit Blick auf die Wiederverwendung von Bauteilen hier weitere Einsparpotenziale heben, wenn eine modulare Bauweise und die Demontagefähigkeit von Bauwerken bereits in der Planungsphase stärker berücksichtigt werden.

Primärrohstoffeinsatz 2050

Nach Ausschöpfen der ambitionierten Minderungspotenziale zeigt sich, dass in dem hier betrachteten Szenario im Jahr 2050 138,9 Mio. t Primärrohstoffe für die Herstellung von Klinker, Zement und Beton benötigt werden (-41% im Vergleich zu 2020). In der Klinker- bzw. Betonproduktion kann ihr Einsatz gegenüber 2020 um 44 % auf 22,5 Mio. t bzw. 108,8 Mio. t gesenkt werden. Lediglich im Bereich der neben Klinker weiteren Zementbestandteile werden aufgrund der geringeren Verfügbarkeit von Hüttensand und Flugasche gegenüber dem Status quo mehr Primärrohstoffe, vor allem Ton und Kalkstein, benötigt (+111%, 7,6 Mio. t).

Abbildung 18 zeigt zusammenfassend die in dieses Szenario eingeflossenen Annahmen für das Jahr 2050.

3.3 Rohstoffbedarf der Zukunft

Es wurde gezeigt, dass entlang der Wertschöpfungskette von Zement und Beton eine erhebliche Einsparung natürlicher Ressourcen bzw. Rohstoffe möglich ist. Im betrachteten Szenario kann unter optimalen Bedingungen der Primärrohstoffbedarf der Zement- und Betonherstellung annähernd halbiert werden. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass auf natürliche Rohstoffe auch künftig nicht verzichtet werden kann. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund, dass die beschriebenen Recycling-Mengen (Brechsande und Recycling-Gesteinskörnungen) ambitioniert sind. Der Rohstoffmix der Zukunft wird sich demnach in zunehmendem Maße aus Recycling-Materialien, wiederverwendeten Bauteilen und Bauwerksstrukturen, aber weiterhin auch maßgeblich aus

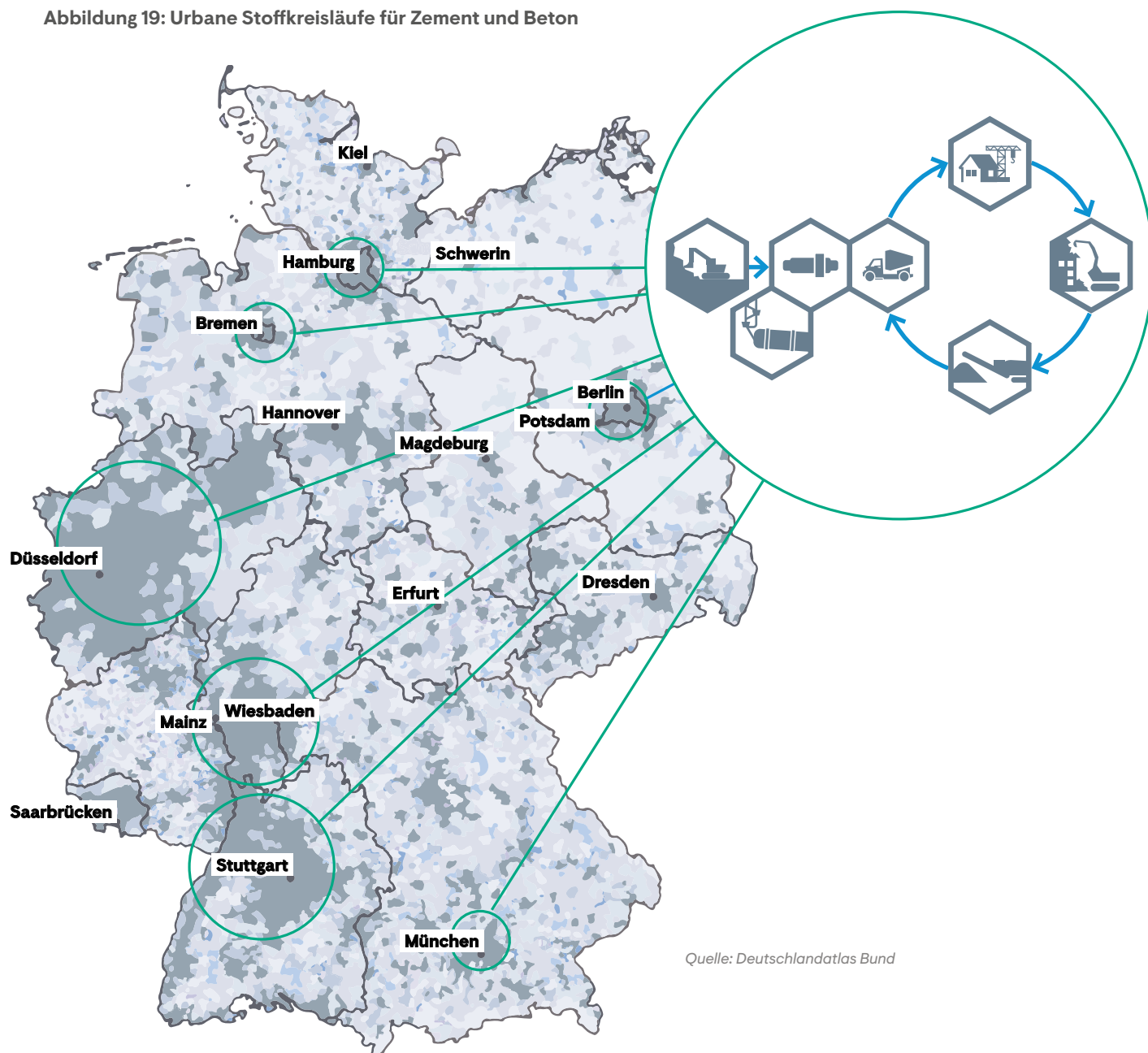
¹⁰ Heute wird ein großer Teil der für die Betonherstellung nutzbaren Materialien in ungebundener Form im Straßen-, Deponie- und Erdbau verwertet [78].

¹¹ Diese Studie geht von einem deutlichen Anstieg des Marktanteils von heute knapp 3 % auf 50 % in 2050 aus.

¹² Das Potenzial zur Schonung natürlicher Ressourcen durch die Verlängerung der Bauwerkslebensdauer sowie der Wiederverwendung von Bauwerksstrukturen und Bauteilen basiert auf [79.] Hier wurde für den europäischen Zementmarkt eine Materialeinsparung von ungefähr 5 % abgeleitet, die für diese Studie herangezogen wurde.



Abbildung 19: Urbane Stoffkreisläufe für Zement und Beton



den aus natürlichen Vorkommen gewonnenen heimischen Mineralien, wie z.B. Kalkstein, Kies, Sand, Naturstein, Ton und Gips, zusammensetzen.

Mit dem Rohstoffmix ändert sich auch die regionale, geografische Verteilung der Ressourcen in dem Maße, wie Recyclingstoffe verwendet werden. Hier steht neben der geologischen Verfügbarkeit vermehrt das sogenannte anthropogene Lager im Fokus, das sich aus den bisher errichteten Bauwerken bzw. den darin verbauten Bau- und Rohstoffen zusammensetzt. Die größten Lagerstätten

zur Herstellung von Recyclingstoffen befinden sich in der Regel dort, wo die Bevölkerungsdichte und damit der Bedarf nach Gebäuden und Infrastruktur hoch ist (Abbildung 19). In vielerlei Hinsicht wird es eine Herausforderung sein, diese Stoffströme für die Zement- und Betonherstellung zu erschließen. Dabei ist die räumliche Nähe von Aufkommen, Aufbereitung und Nutzung dieser Stoffe entscheidend, da insbesondere mit wachsender Transportentfernung der ökobilanzielle Vorteil gegenüber der Verwendung primärer Rohstoffe geringer wird.

4

Handlungsstrategien und Voraussetzungen für eine ressourcenschonende Betonbauweise

Handlungsstrategien und Voraussetzungen für eine ressourcenschonende Betonbauweise

Die Zement- und Betonindustrie stellt mit ihren Baustoffen unverzichtbare Werkstoffe für modernes, nachhaltiges Bauen bereit und nimmt eine Schlüsselposition in der gesamten Wertschöpfungskette Bau ein. Sie stellt sich ihrer besonderen Verantwortung für die Ressourcenschonung und die Förderung einer Kreislaufwirtschaft beim Bauen und sucht nach Wegen, ihren Primärrohstoffeinsatz weiter deutlich zu reduzieren.

Um die in dieser Studie dargestellten Potenziale zur Schonung natürlicher mineralischer Rohstoffe zu realisieren, bedarf es eines gemeinsamen Handelns aller am Bauen Beteiligten und eines gemeinsamen Ansatzes hin zu mehr Materialeffizienz, Wiederverwendung und Recycling in allen Stufen des Bauprozesses. Die Art und Weise, wie geplant, ausgeschrieben, beschafft und gebaut wird, ist hieran konsequent auszurichten. Eine effiziente und erfolgreiche Kreislaufwirtschaft im Hoch- wie im Tiefbau erfordert von allen Baubeteiligten ein Denken in Stoffströmen aus einer Lebenszyklus-Perspektive. Es gilt, neue Wege zu gehen, um einen noch achtsameren Umgang mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen zu erzielen.

Das vorliegende Kapitel beschreibt vor diesem Hintergrund zentrale Handlungsfelder, um die ermittelten Einsparpotenziale für natürliche Ressourcen entlang der Wertschöpfungskette von Zement und Beton zu heben.

4.1 Nachhaltiges Stoffstrommanagement

Um die großen Potenziale einer ressourcenschonenderen Herstellung und Anwendung von Zement und Beton zu realisieren, wird es maßgeblich darauf ankommen, geeignete Stoffströme zu identifizieren, zu mobilisieren und idealerweise wieder in den Herstellungsprozess einzubringen.



4.1.1 Urban Mining

Die Bewirtschaftung des anthropogenen Lagers¹³ mit dem Ziel aus langlebigen Baustoffen alternative Rohstoffe zu gewinnen – das sogenannte „Urban Mining“¹⁴ – stellt ein zentrales Handlungsfeld auf dem Weg zur ressourcenschonenden Kreislaufwirtschaft im Bausektor dar. Als „strategischer Ansatz des Stoffstrommanagements“ [38], umfasst dieses Konzept eine systematische Erfassung und Kartierung von alternativen Rohstoffen und ihrer Einbauweisen in Bauwerken. Neben dem „Wo?“ und „Wie viel?“ kann auf diesem Wege auch besser evaluiert werden, wann Bauwerke rückgebaut werden und darin verbaute Stoffe für eine weitere Verwendung wieder zur Verfügung stehen. Letztlich muss es gelingen, für das anthropogene Lager einen vergleichbar umfassenden Informationsstand wie bei Primärrohstoffen zu erreichen. Herausfordernd dabei ist nicht nur, den „alten“ Bauwerksbestand¹⁵ sowie die neu hinzukommenden Bauwerke in ihrer Gesamtheit zu erfassen. Auch die im Rahmen von Sanierungen oder An-/Umbauten erfolgten Veränderungen müssen für ein erfolgreiches Urban Mining festgehalten werden. Hierzu stellen die **Digitalisierung** des

¹³ Ein anthropogenes Lager ist ein durch menschliche Tätigkeiten entstandenes Stofflager, wie beispielsweise ein Gebäude, Infrastrukturen oder Halden für Abraum.

¹⁴ Urban Mining ist die integrale Bewirtschaftung des anthropogenen Lagers mit dem Ziel, aus langlebigen Gütern sowie Ablagerungen alternative Rohstoffe zu gewinnen [81].

¹⁵ Dies betrifft auch die Erfassung von Deponien, die wie Bauwerke zurückgebaut und deren Stoffe separiert, aufbereitet und verwertet werden können (Landfill Mining). Dabei können nicht nur Ressourcen geschont, sondern auch Treibhausgase reduziert sowie Flächen wieder nutzbar gemacht werden.

Planens und Bauens, u.a. unter den Stichworten BIM, OpenBIM¹⁶ oder digitaler Zwilling, sowie die Erstellung von Bauwerksressourcenpässen und Rückbaukonzepten wichtige Instrumente dar, die es in Zukunft in der Baupraxis konsequent einzusetzen gilt.

4.1.2 Strategischer Rückbau, Aufbereitung und Logistik

Beim Abbruch eines Bauwerks werden heute üblicherweise Bauteile und Materialien nach und nach rückgebaut. Dieser selektive Prozess, bei dem Schadstoffe erkundet und entfernt werden, bei dem ein Bauwerk in viele Abfallfraktionen getrennt wird, entspricht den anerkannten Regeln der Technik¹⁷ und ist ein elementarer Bestandteil einer Kreislaufwirtschaft. In Zukunft wird es darauf ankommen, den Rückbau weiter zu optimieren, um möglichst viele Bauteile wiederzuverwenden oder die eingesetzten Baustoffe zu recyceln. Langfristig lassen sich vor allem über die Wiederverwendung von Bauwerkstrukturen und Bauteilen weitere Potenziale zur Ressourcenschonung heben. Dies setzt allerdings voraus, dass Bauwerke entsprechend konzipiert werden (z.B. in modularer Weise), um einen einfachen Rückbau zu ermöglichen. Aktuell entstehen bereits erste digitale Plattformen, wie Concular oder Madaster, um das Angebot an ge-

brauchten Bauteilen zu erfassen und wieder für das Bauen nutzbar zu machen. Diese Ansätze weisen in die richtige Richtung, wenngleich die Wiederverwendung von Bauteilen heute noch eine untergeordnete Rolle spielt.

Ist eine Wiederverwendung ganzer Bauteile technisch oder wirtschaftlich nicht möglich, kommt deren Aufbereitung für das Recycling eine entscheidende Rolle zu. Die Wahl der **Aufbereitungsverfahren** beeinflusst dabei maßgeblich, wie effizient ein bestehendes anthropogenes Lager genutzt werden kann. Mechanische Verfahren zur Aufbereitung von Bauabfällen – zum Zerkleinern, Sortieren und Klassieren – können bei besonders heterogenen Werkstoffverbänden an ihre Grenzen stoßen. Es wird daher auch darauf ankommen, diese „klassischen“ Methoden weiterzuentwickeln und ggf. ganz neue Verfahren zur Zerkleinerung (z.B. elektrodynamische Fragmentierung) oder sensorbasierte Ansätze zur Sortierung von Massenströmen verstärkt einzusetzen [84].

Kurze Transportwege und eine bedarfsgerechte **kontinuierliche Versorgung** mit Recycling-Material sind entscheidend für die Wirtschaftlichkeit und ökologische Effizienz einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft Bau. Um einen ökobilanziellen Vorteil zu erreichen, dürfen Transportentfernungen der Recycling-Gesteinskörnung – vom Standort des Rückbaus über die Aufbereitung bis hin zur Beton-



¹⁶ OpenBIM erweitert die Konzepte von BIM u.a. durch Verwendung offener Formate und einer einheitlichen Fachsprache [82].

¹⁷ Die Gewerbeabfallverordnung (GewAbfVO) sieht die Trennung von Bau- und Abbruchabfällen in die Fraktionen Glas, Kunststoff, Metalle, Holz, Dämmmaterial, Bitumengemische, Baustoffe auf Gipsbasis, Beton, Ziegel sowie Fliesen und Keramik vor (vgl. § 8 Abs. 1 GewAbfVO) [83].

herstellung – in der Regel nicht sehr viel größer sein als bei Beton, der mit Kies, Sand und Naturstein hergestellt wurde. Insofern müssen nach Möglichkeit bereits eine Aufbereitung und Qualitätssicherung vor Ort beim Abriss sowie eine Wiederverwendung von Recycling-Materialien auf nahe gelegenen Baustellen von vornherein berücksichtigt werden. Die digitale Erfassung und Transparenz laufender Bauprojekte sowie lokaler Aufbereitungsmöglichkeiten in urbanen Räumen bilden hierfür eine wichtige Voraussetzung. Des Weiteren werden zusätzliche stadtnahe, preislich wettbewerbsfähige Flächen benötigt, auf denen Unternehmen der Recyclingwirtschaft z.B. Beton- und Mauerwerksbruch aufbereiten und lagern können.

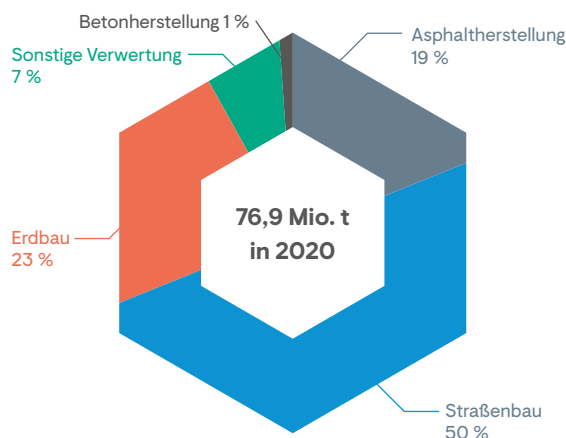
4.2 Entstehung grüner Leitmärkte

Die Förderung der Nachfrage nach ressourcenschonendem Bauen stellt ein zentrales Handlungsfeld dar. Einerseits gilt es dabei, Hemmnisse für den Einsatz von Recycling-Materialien abzubauen, andererseits aktiv Anreize für deren Verwendung zu setzen.

4.2.1 Hemmnisse abbauen

Am Beispiel des Betonrecyclings lässt sich veranschaulichen, welche Hemmnisse einer flächendeckenden Verwendung von Recycling-Materialien heute noch im Wege stehen. Mit einer entsprechenden Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) [37] liegt zwar seit vielen Jahren ein bauaufsichtlich eingeführtes Regelwerk für die Herstellung und den Einsatz von Recyclingbeton vor¹⁸. Bislang werden in Deutschland jedoch nur etwa 1 % der insgesamt eingesetzten Gesteinskörnung für Beton in Form von Recycling-Material abgedeckt (Abbildung 20). Das liegt derzeit im **Abfallrecht** sowie in der **Wahrnehmung** dieses Baumaterials begründet. Beim Rückbau eines Bauwerks gelten die daraus gewonnenen Mengen entsprechend der Definitionen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) als Abfall. Auch aufbereitete Fraktionen von Beton- und Mauerwerksbruch gelten als Recycling-Gesteinskörnung solange als Abfall, bis daraus wieder Beton hergestellt wird. Hieraus folgt

Abbildung 20: Verwertung von Recycling-Gesteinskörnungen in Deutschland 2020



Quellen: Statistisches Bundesamt, Initiative Kreislaufwirtschaft Bau

Anmerkung: Die verbleibenden 143,7 Mio. t mineralischer Bauabfälle des Jahres 2020 wurden auf anderen Wegen überwiegend verwertet, z.B. im Berg- und Deponiebau oder in der thermischen Verwertung. Nur ein geringer Anteil musste auf Deponien entsorgt werden.

einerseits ein erhöhter Aufwand im Betonwerk, z.B. im Rahmen erforderlicher Anlagenehmigungen sowie für die Prüfung, Überwachung und Dokumentation.

Andererseits haftet den Recycling-Gesteinskörnungen leider oft noch ein **negatives Image** als Baustoff „zweiter Klasse“ an, obwohl sie den aus Primärmaterial hergestellten Gesteinskörnungen in nichts nachstehen. Folglich sollte die Abfalleigenschaft künftig bereits nach der Aufbereitung bzw. der Herstellung der Recycling-Gesteinskörnungen enden, um ihren Einsatz für Betonhersteller zu erleichtern und dem negativen Abfallimage entgegenzuwirken. Hierbei sollten Terminologien und Bezeichnungen von Recycling-Materialien, u.a. in Regelwerken, grundsätzlich überdacht werden. Auch beim Umgang mit potenziellen **Schadstoffen** in Recycling-Materialien gilt es, Regelwerke so auszugestalten, dass Recycling-Materialien gegenüber Primärrohstoffen nicht benachteiligt werden. Letztlich ist ein Ausgleich zwischen dem Schutz von Gesundheit, Boden und Grundwasser einerseits und der Verwendung von Recycling-Gesteinskörnungen andererseits anzustreben.

¹⁸ Grobe Recycling-Gesteinskörnungen (> 2 mm) aus betonhaltigem Abbruchmaterial können bereits heute problemlos im Beton verwendet werden. Der Anteil hängt dabei vom Ausgangsmaterial und dem Anwendungsfall (z.B. Innen- oder Außenbauteil) ab und kann bis zu 45 Vol.-% bezogen auf die Gesteinskörnung > 2 mm im Beton betragen.



Ein weiteres Hemmnis für den breiteren Einsatz von Recycling-Gesteinskörnung bei der Zement- und Betonherstellung liegt auf der Stufe der **Aufbereitung** und der derzeitigen Verwertungspraxis. Beim Brechen von Beton fallen bis zu rd. 30 M.-% als **Feinfraktion** an (≤ 2 mm), die bislang laut den einschlägigen Normen nicht im Beton eingesetzt werden dürfen. Die aktuelle Forschung zeigt jedoch, dass sich auch diese Feinfraktion in gewissem Umfang für die Beton-, Zement- und sogar Klinkerherstellung eignen. Hier kommt z.B. die Verwendung als Zementhaupt- oder Nebenbestandteil infrage [26, 85, 86]. Eine europäische Norm EN 197-6 für Zement ist in Vorbereitung, wonach bis zu 20 M.-% Feinstanteile aus recycelten, mineralischen Baustoffen in Kompositzementen eingesetzt werden können. Mit der Neufassung der Betonnorm DIN 1045-2 wird künftig auch in begrenztem Maße der Einsatz von Betonbrechsanden im Beton ermöglicht. Es gilt, noch weitere Anwendungsfelder für den Einsatz von Recycling-Gesteinskörnung ≤ 2 mm zu finden, um ihr Potenzial zur Ressourcenschonung weiter auszuschöpfen.

In den kommenden Jahren werden höhere Mengen an Betonbruch erwartet. Insbesondere ist es wichtig, neben der derzeitigen **Verwertungspraxis** (dieses Material wird zum großen Teil zur Aufwertung von Böden und als Verfüllmaterial genutzt) die Verwendung in der Zement- und Betonherstellung zu etablieren.

4.2.2 Anreize setzen

Neben dem Abbau der beschriebenen Hemmnisse sollte darüber hinaus der Einsatz von Recycling-Materialien entlang der Wertschöpfungskette von Zement und Beton gezielt gefördert werden, damit ein wachsendes Angebot entsteht und zunehmend auf eine kontinuierliche Nachfrage trifft. Dabei muss vor allem die **Wirtschaftlichkeit** der Herstellung verbessert und gegenüber Primärmaterialien bestehende Kostennachteile ausgeglichen werden.

Hierbei kann zum einen direkt bei der **Herstellung** bzw. der **Aufbereitung** mineralischer Bauabfälle angesetzt werden. Durch gezielte Förderung der Bauschutt-Aufbereitung und Weiterentwicklung der Verfahren sollte die Herstellung qualitativ hochwertiger Recycling-Materialien für die Herstellung von Zement und Beton verbessert werden¹⁹. Zugleich sollten Länder und Kommunen dabei unterstützen, in räumlicher Nähe zu Ballungsräumen zusätzliche Flächen für die Lagerung und Aufbereitung von Baurestmassen zur Verfügung zu stellen. Dies sind wesentliche Voraussetzungen, um das Angebot an Recycling-Materialien lokal zu erhöhen.

Zum anderen können auch auf der **Produktebene** der Einsatz von Recycling-Materialien gefördert und eventuelle Kostennachteile gegenüber Primärmaterialien ausgeglichen werden. So kann die öffentliche Hand bei eigenen Projekten in den Ausschreibungen gezielt auf Recycling-Beton abstellen, im privaten Bau kann dieser in den entsprechenden Förderprogrammen adressiert werden. Darüber hinaus bieten sich weitere Möglichkeiten, die Wettbewerbsfähigkeit von Recycling-Materialien über steuerliche Anreize zu erhöhen. Auf diesem Wege ließen sich zielgenaue Anreize setzen, ohne dabei die Baukosten wesentlich zu erhöhen. Solche Maßnahmen zeigen deutliche Vorteile gegenüber einer gelegentlich geforderten Primärroh-/baustoffsteuer, deren Lenkungswirkung umstritten ist und die das Bauen weiter verteuern würde [87].

¹⁹ Beispielsweise ermöglicht das europäische Beihilferecht seit 2022 eine Investitionsförderung für Maßnahmen zur Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft.

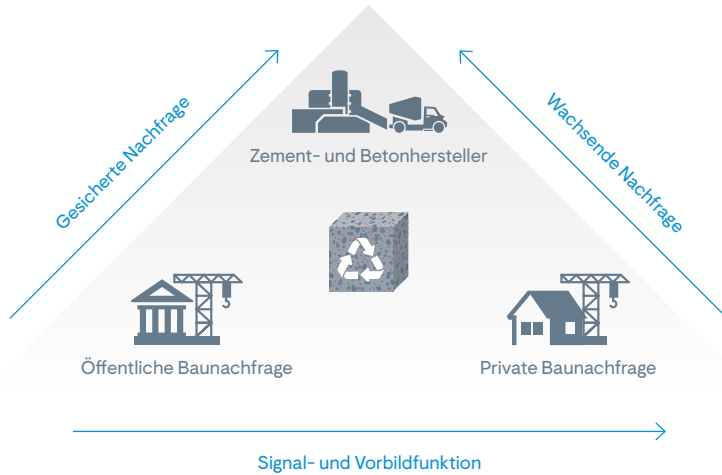




Voraussetzungen für eine ressourcenoptimierte und wettbewerbsfähige Betonbauweise

- **Die gesamte Wertschöpfungskette bei der Schonung natürlicher Ressourcen in den Blick nehmen**, beginnend bei der Klinker- und Zementherstellung über die Produktion des Betons bis hin zum Bauwerk (Wiederverwendung, Rückbau/Abbruch und Recycling der Baustoffe).
- **Kommunikation entlang der Wertschöpfungskette von Zement und Beton intensivieren**, um gemeinsam Konzepte für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft Bau zu entwickeln.
- **Urban Mining fördern** und systematisch Baustoffe sowie ihre Bestandteile und Einbauweisen dokumentieren (z.B. mit Bauwerksressourcenpässen). Der Digitalisierung des Planens und Bauens und der Anwendung von Building Information Modeling (BIM) kommen dabei eine große Bedeutung zu.
- **Wiederverwendbarkeit von Bauteilen verbessern**, durch Baukonstruktionen (z.B. modular), die den selektiven Rückbau erleichtern, und Nutzung digitaler Plattformen zur Erfassung und Bewertung gebrauchter Bauteile.
- **Aufbereitungsverfahren zum Baustoffrecycling weiterentwickeln** (z.B. sensorbasiert, elektrodynamische Fragmentierung).
- **Urbane Räume als Zentren der Baustoffaufbereitung etablieren**, u.a. durch zusätzliche Gewerbeflächen. Gewährleistung kurzer Transportwege und einer kontinuierlichen Versorgung mit Recycling-Materialien.
- **Verwendung von Recycling-Materialien aus Betonbruch in der Zement- und Betonherstellung etablieren**.
- **Recycling-Gesteinskörnungen direkt nach Herstellung als Produkt einstufen** – und nicht erst beim Einbau. Negatives Image und Benachteiligung von Recycling-Baustoffen gegenüber Baustoffen basierend auf Primärmaterial verhindern.
- **Wettbewerbsfähigkeit von Recycling-Materialien verbessern**, u.a. durch Förderprogramme, steuerliche Anreize.
- **Vorbildfunktion der öffentlichen Hand stärken** – Bauen mit ressourcenschonenden Zementen und Betonen fördern. Recyclingquoten unter Berücksichtigung lokaler Verfügbarkeit als effektives Instrument zur Initialisierung erster Absatzmärkte (Abbildung 21).
- **Recycling-Materialien am Markt erkennbar machen**. Zertifizierung und Labeling (z.B. durch das Concrete Sustainability Council (CSC)), oder ganzer Bauwerke (z.B. durch DGNB) sind wichtige Bausteine.
- **Heimische primäre Rohstoffquellen sichern und Genehmigungsverfahren beschleunigen**. Kalkstein, Kies, Sand, Naturstein und Tone spielen im Rohstoffmix der Zukunft weiterhin eine wichtige Rolle. Ein entsprechender Abbau muss gewährleistet sein.

Abbildung 21: Nachhaltige öffentliche Beschaffung



Quelle: VDZ, angelehnt an Darstellung in [89]

Bund, Länder und Kommunen können im Rahmen der **öffentlichen Beschaffung** Vertrauen für neue Produkte oder Bauweisen mit Recycling-Materialien schaffen. Im Ende 2020 novellierten Kreislaufwirtschaftsgesetz hat das Land Baden-Württemberg seine Vorbildfunktion beim Bauen hervorgehoben [88]. So sind in Ausschreibungen „geeignete und gütegesicherte Recycling-Baustoffe gleichberechtigt mit Baustoffen“ zu berücksichtigen, die mit Primärmaterial hergestellt wurden (vgl. §2 Abs. 4 Nr. 1 LKreiWiG). Das Land Berlin hat mit der in 2021 novellierten Verwaltungsvorschrift Beschaffung und Umwelt [43] ebenfalls verbindliche Standards für öffentliche Bauvorhaben definiert, die zur Ressourcenschonung beitragen. So ist bei Verwendung von Ortbeton der maximal zulässige Anteil von Recycling-Gesteinskörnungen nach der jeweils gültigen DAfStb-Richtlinie [37] einzubringen. Dabei wird auch thematisiert, wie vorzugehen ist, falls die benötigten Materialien am Markt nicht verfügbar sind. Ferner ist „für Neubauten ein Recyclingkonzept zu entwickeln, das beschreibt, wie bei einem zukünftigen Rückbau des Gebäudes zu verfahren ist“ (Nr. 26, [43]). Diesen

Weg können auch andere Bundesländer und Kommunen gehen. Bei der Vergabe entsprechender Bauaufträge müssten gleichwohl etwaige zusätzliche Kosten für den Einsatz von Recycling-Materialien und für die Erstellung von Rückbaukonzepten berücksichtigt werden.

In diesem Zusammenhang werden auch regelmäßig **Recycling-Quoten** diskutiert. Diese können aus Sicht der Baustoff-Aufbereiter erste gesicherte Absatzmärkte für Recycling-Materialien und eine entsprechende Investitionssicherheit (z.B. mit Blick auf den benötigten Maschinenpark) schaffen [89]. Gleichzeitig muss jedoch bei Einführung einer Quote berücksichtigt werden, dass Recycling-Materialien lokal oder regional nicht immer verfügbar und lange Transportentfernungen ökologisch nachteilig sind. Für diese Fälle muss es auch künftig möglich sein, Primärrohstoffe zu verwenden. Eine flexible Ausgestaltung möglicher Quotenregelungen, die begrenzte Verfügbarkeiten von Recycling-Materialien berücksichtigt, ist daher essenziell.

Um die Marktakzeptanz von Recycling-Materialien schrittweise zu steigern, gilt es zunächst auch, diese am Markt klar als solche erkennbar zu machen. Ein entsprechendes **Labeling** dieser Produkte oder eine externe **Zertifizierung** können hier wichtige Bausteine sein. Werden Zemente und Betone entsprechend gekennzeichnet, erleichtert dies die Bewertung ihres Beitrags zur Ressourcenschonung für die Nutzer. Öffentliche Ausschreibungen könnten so gezielt auf entsprechende Labels oder Zertifizierungssysteme Bezug nehmen. Das CSC (Concrete Sustainability Council) bietet ein Zertifizierungssystem an, das am Markt etabliert ist und in einer ganzheitlichen Betrachtung die wesentlichen Bereiche des Qualitäts-, Umwelt-, Energie- und Arbeitsschutzmanagements erfasst. Je nach Anforderungsniveau können sich Betonhersteller ihre Werke und einzelne Betone entsprechend zertifizieren lassen. Das CSC vergibt dazu Zertifikate in Bronze, Silber, Gold oder Platin.

Betonhersteller, die im Besitz eines CSC-Zertifikats (silber oder höher) sind, können sich seit 2020 auch nach dem „R-Modul“ zertifizieren lassen. Bedingung für die Vergabe ist neben der Nachweisbarkeit der Herkunft der Recycling-Materialien aktuell ein Ersatz von mindestens 10 % der groben Gesteinskörnung durch Recycling-Gesteinskörnung [90]. Ein höherer Anreiz für die Verwendung von Recycling-Gesteinskörnungen könnte durch die Anhebung dieser Schwelle geschaffen werden.

Sowohl das CSC-Zertifikat als auch das ergänzende R-Modul sind im Gebäudezertifizierungssystem der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB), im Rahmen der Regierungspolitik für „grüne“ Beschaffung, aber auch bei den weltweit führenden privaten Zertifizierungssystemen von Gebäuden, BREEAM und LEED, anerkannt.

4.3 Kommunikation und Qualifizierung

In der **Aus- und Weiterbildung** nimmt der schonende Umgang mit Ressourcen einen zunehmend höheren Stellenwert ein, den es gilt, weiter auszubauen. Entsprechende Initiativen, wie das Bil-RessNetzwerk („Bildung für Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“²⁰) seien, beispielhaft genannt und können dabei als Orientierung dienen.

Bei der **Planung von Bauprojekten** kommt nicht nur dem Einsatz von Recycling-Materialien eine zunehmend wichtige Bedeutung zu. Darüber hinaus liegt der Fokus auf Konstruktionsprinzipien, die eine entsprechende Wiederverwendung des Bauwerks oder einen späteren Einsatz als recyclinggerechte Baustoffe adressieren. Das schließt auch Konzepte für eine Umnutzung, den Rückbau und die Wiederverwendung von Betonbauteilen ein und berücksichtigt auch ein mehrfaches Recycling von Materialien [92]. Grundvoraussetzung hierfür ist in allen Fällen eine gute Kommunikation entlang der gesamten Wertschöpfungskette über verschiedenste Gewerke hinweg. Dies umfasst auch Zementproduzenten, Betonhersteller, Planer und Architekten, Bauherren sowie die öffentliche Bauverwaltung.

Mit der neuen DIN 1045-1000 „**Grundlagen der Betonbauqualitätsklassen (BBQ)**“ [44] wird es erstmals einen entsprechenden schnittstellenübergreifenden Ansatz für die am Bau Beteiligten geben. Je nach Komplexität werden Betonbauwerke einer BBQ-Klasse zugeordnet und Planungs-, Beton- und Bauausführungsklassen adressiert. Für diese können die Planungshilfe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) „Nachhaltig bauen mit Beton“ vertraglich vereinbart [93] und Anforderungen an Kommunikation, Planung, Bau-



ausführung und Baustoffe festgelegt werden. Hier werden u.a. Hinweise für Ausschreibungs- und Ausführungsgespräche für Betonbauwerke gegeben. Unter dem Stichwort „Nutzung von örtlich vorhandenen und verfügbaren Ressourcen“ bietet das BBQ-Konzept die Möglichkeit, gemeinsame Ziele für Ressourceneffizienz und Klimaschutz zu formulieren und umzusetzen.

In Zukunft dürfte auch die Digitalisierung das Zusammenwirken aller Beteiligten unterstützen. Im CEN/TC 442, dem **europäischen Normungsgremium Building Information Modeling**, werden Methoden und Prozesse für den Datenaustausch im Bauwesen entwickelt. Ein Kernelement hiervon ist das sogenannte PDT-Konzept (Produktdaten-vorlagen/Product Data Template). Hier werden künftig „Materialpässe“ zur Verfügung stehen, mit denen Bauteil- und Baustoffhersteller Informationen zu ihren Produkten in maschinenlesbarer Form bereitstellen. Die Summe aller Eigenschaften bzw. Informationen, hinterlegt in einem 3D-Modell des Bauwerks (Digitaler Zwilling), eröffnet somit auch die Möglichkeit, das recyclinggerechte Planen und Konstruieren, sowie den gezielten Rückbau und die Wiederverwendung der Bauteile und Baustoffe zu unterstützen.

²⁰ Das Netzwerk wurde 2012 auf Anregung des Bundesumweltministeriums ins Leben gerufen und zielt auf die Vernetzung möglichst vieler wichtiger Akteure innerhalb und außerhalb des Bildungswesens, die für die Verankerung von Ressourcenbildung in den verschiedenen Bildungsbereichen (schulische Bildung, berufliche Bildung, Hochschulbildung, Weiterbildung) verantwortlich sind [91].



Letztlich ist auch die **Kommunikation zwischen Zement-/Betonherstellern und Aufbereitern** mineralischer Bauabfälle hinsichtlich der Anforderungen an Recycling-Gesteinskörnungen eine wesentliche Voraussetzung für die Umsetzung der in der Studie aufgezeigten Einsparpotenziale. Hier gilt es, ein gegenseitiges Verständnis der jeweiligen Produktionsprozesse und Qualitätsanforderungen sowie der Logistik zu entwickeln, mit dem Ziel, langfristige Lieferbeziehungen aufzubauen.

4.4 Sicherung primärer Rohstoffe

Natürliche heimische Rohstoffe wie Kalkstein, Kies, Sand, Naturstein und Ton werden auch bei einem breiten Einsatz von Recycling-Materialien auf lange Sicht unverzichtbar für die Zement- und Betonherstellung in Deutschland sein.

Mit Blick auf die sich verringenden Hüttensand- und Flugaschemengen werden Tone im künftigen Rohstoffmix eine noch wichtigere Rolle spielen. In calcinierter Form werden sie als Zementbestandteil zum Einsatz kommen (**calcinierter Tone**). Hierzu können Tonqualitäten verwendet werden,

die sich nicht für die Ziegel- und Keramikindustrie eignen. Dabei kommen Tone als alternativer Rohstoff, z.B. aus der Kieswäsche oder aus Abraum, aber auch Tone aus primären Rohstoffquellen zum Einsatz. Zudem ist die Verwendung der calcinierten Tone für die Zementherstellung an verschiedene Herausforderungen geknüpft. In **Landesentwicklungs- bzw. Regionalplänen** sollten Tonvorkommen vor allem in räumlicher Nähe zu bestehenden Zementwerken als Vorranggebiete für die Rohstoffgewinnung ausgewiesen und mit Vorsorgezeiträumen von mindestens 30 Jahren berücksichtigt werden. Dies gilt gleichermaßen auch für Vorkommen von Kalkstein, Kies, Sand und Naturstein, da diese auch weiterhin für die Zement- und Betonherstellung der Zukunft unabdingbar sind. Nur auf diesem Wege kann für die Unternehmen die nötige **Investitionssicherheit** für die Transformation zu einer echten Kreislaufwirtschaft Bau sowie zu einer klimaneutralen Baustoffproduktion geschaffen werden. Die Erschließung neuer Tongruben und die Errichtung von Anlagen zur Calcination erfordern bislang umfangreiche **Genehmigungsverfahren**. Hier müssen Wege gefunden werden, die Verfahrensdauern deutlich zu verkürzen.



Die Corona-Pandemie und die geopolitische Lage haben in den vergangenen Jahren verdeutlicht, wie anfällig grenzüberschreitende Lieferketten sind und welche empfindlichen Abhängigkeiten zu einzelnen Handelspartnern bestehen. Anders als bei fossilen Energieträgern kann Deutschland die Nachfrage nach Steine-Erden-Rohstoffen mit der **heimischen Produktion** überwiegend decken [94]. Hierdurch verkürzen sich im Vergleich zu Importen nicht nur die Transportdistanzen, vielmehr ist die heimische Rohstoffgewinnung auch ein wichtiger Wirtschaftsfaktor. So ist die Baustoff-Steine-Erden-Branche deutschlandweit Grundlage für mehr als 350.000 Beschäftigte [95].

Im gemeinsamen Dialog zwischen Politik, Wirtschaft und Gesellschaft gilt es, die Relevanz heimischer Rohstoffe zu verdeutlichen. Denn nur durch die Gewinnung von Rohstoffen vor Ort können wichtige politische Ziele, wie der Ausbau der erneuerbaren Energien und nachhaltiger Verkehrsinfrastrukturen oder die Schaffung bezahlbaren Wohnraums erreicht werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Verein Deutscher Zementwerke, Hrsg. Dekarbonisierung von Zement und Beton: Minderungspfade und Handlungsstrategien; Eine CO₂-Roadmap für die deutsche Zementindustrie. Düsseldorf, 2020
- [2] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Hrsg. World Population Prospects 2019. Verfügbar unter: <https://population.un.org/wpp/DataQuery/>
- [3] United Nations Environment Programme, International Resource Panel, Hrsg. Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth: A report of the Working Group on Decoupling to the International Resource Panel. Paris, 2011 [Zugriff am: 24.05.2022] Verfügbar unter: <https://www.resourcepanel.org/reports/decoupling-natural-resource-use-and-environmental-impacts-economic-growth>
- [4] Ensure sustainable consumption and production patterns. In: United Nations, Hrsg. The Sustainable Development Goals Report 2021. New York, [Zugriff am: 24.05.2022]. Verfügbar unter: <https://sdgs.un.org/goals/goal12>
- [5] G7 Alliance on Resource Efficiency [Zugriff am: 24.05.2022] Verfügbar unter: <https://www.g7are.com/>
- [6] Ministry of the Environment Government of Japan; Institute for Global Environmental Strategies, Hrsg. G20 Resource Efficiency Dialogue [Zugriff am: 24.05.2022] Verfügbar unter: <https://g20re.org/>
- [7] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Hrsg. Deutsches Ressourceneffizienzprogramm III – 2020 bis 2023: Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Berlin, 2020 [Zugriff am: 24.05.2022] Verfügbar unter: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/ressourceneffizienz_programm_2020_2023.pdf
- [8] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Hrsg. Rohstoffstrategie der Bundesregierung: Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nicht-energetischen mineralischen Rohstoffen. Berlin, 2020 [Zugriff am: 24.05.2022] Verfügbar unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/rohstoffstrategie-der-bundesregierung.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- [9] Langsdorf, S.; Duin, L. Absolute Reduktion der Ressourcennutzung: Vorreiter Niederlande – Ein Vorbild für Deutschland? Berlin, 2021 [Zugriff am: 17.06.2021] Verfügbar unter: https://www.ecologic.eu/sites/default/files/publication/2021/Langsdorf_Duin_Reduktion-Ressourcennutzung-NL.pdf
- [10] Statistisches Bundesamt, Hrsg. Anschlussgrad sowie Wasserabgabe an Haushalte, gewerbliche und sonstige Abnehmer: Öffentliche Wasserversorgung in Deutschland von 1991 bis 2019 [Zugriff am: 24.05.2022]. Verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Tabellen/ww-01-wasserabgabe1991-2019.html>
- [11] Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, Hrsg. Rohstoffversorgung und Ressourcenproduktivität in der deutschen Zementindustrie: Analyse des Status quo und Perspektiven. Wuppertal, 2015. Verfügbar unter: https://zement-verbindet-nachhaltig.de/images/studien/Studie_Rohstoffversorgung_Ressourcenproduktivitaet_C3%44t_Zementindustrie.pdf
- [12] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, Hrsg. Zahlen und Daten: Zementindustrie in Deutschland 2021; Stand August 2021. Berlin, 2021
- [13] Hoenig, V.; Koring, K.; Fleiger, P.; Müller, C.; Palm, S.; Reiners, J. Energieeffizienz bei der Zementherstellung. Cement International. 2013, 11(3/4), S.50-67; S.46-65
- [14] Hoenig, V.; Knöpfelmacher, A.; Vennemann, B.; Ebert, D.; Deike, R. Eignung der aufbereiteten Feinfraktion von MVA-Schlacken als Rohstoffkomponente im Zementherstellungsprozess. In: Thiel, Stephanie; Thome-Kozmiensky, E.; Senk, D.G.; Wotruba, H.; Antrekowitsch, H.; Pomberger, R. Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 7: Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen. Neuruppin, 2020, S.136-151
- [15] Ruppert, J.; Wagener, C.; Palm, S.; Scheuer, W.; Hoenig, V. Prozesskettenorientierte Ermittlung der Material- und EnergieeffizienzPotenziale in der Zementindustrie. Dessau-Roßlau, 2020 (UBA-Texte 48/2020) [Zugriff am: 10.03.2020] Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-03-06_texte_48-2020_material_energieeffizienz_zementindustrie.pdf
- [16] Hoenig, Volker; Schall, Albrecht; Sultanov, Nazar; Papkalla, Stefan; Ruppert, Johannes. Status and prospects of alternative raw materials in the European cement sector – ECRA study for Cembureau. Düsseldorf, 2022
- [17] Mineral Products Association; Cinar Ltd; VDZ gGmbH, Hrsg. Options for switching UK cement production sites to near zero CO₂ emission fuel – Technical and financial feasibility: Summary report; Feasibility Study for the Department for Business Energy and Industrial Strategy; A report funded by an SBRI Competition, TRN 1674/10/2018. London, 2019
- [18] Verein Deutscher Zementwerke, Hrsg. Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2020. Düsseldorf, 2021
- [19] Global Cement and Concrete Association, Hrsg. Concrete Future: The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete. London, 2021
- [20] Merkel, T. Daten zur Produktion und Nutzung von Eisenhüttenschlacken im Jahr 2020. FEhS Report. 2021, 28, S.37-38
- [21] Algermissen, D. Zukünftige Schlackenerzeugung in einer CO₂-armen Stahlindustrie, Mineralische Nebenprodukte und Abfälle. In: Thiel, S.; Thome-Kozmiensky, E.; Senk, D.G.; Wotruba, H.; Antrekowitsch, H.; Pomberger, R. Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 7: Aschen, Schlacken,



- Stäube und Baurestmassen. Neuruppin, S.182-191
- [22] Ehrenberg, A. Converting electric arc furnace slag into a (latent) hydraulic binder. *Cement International*. 2019, 17(1), S.54-66
- [23] Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland, Hrsg. Jahresbericht 2019. Düsseldorf, 2019 [Zugriff am: 08.02.2022] Verfügbar unter: <https://www.itad.de/service/downloads/itad-jahresbericht-2019-webformat.pdf>
- [24] Kikuchi, R., Hrsg. Recycling of municipal solid waste for cement production: Pilotscale test for transforming incineration ash of solid waste into cement clinker. *Resources, Conservation and Recycling*. 2001, 31(2), S.137-147
- [25] Wirtschaftsverband Mineralische Nebenprodukte, Hrsg. REA-Gips: Produktinformation. Düsseldorf, 2018-06. Verfügbar unter: <https://www.win-ev.org/produkte/produkte-aus-steinkohlekraftwerken/rea-gips/index.html>
- [26] Müller, C.; Severins, K.; Spanka, G. Brechsand als Zementhauptbestandteil: Leitlinien künftiger Anwendung im Zement und Beton. *Beton*. 2020, (9), S.336-345
- [27] Skocek, J.; Zajac, M.; Ben Haha, M. Carbon Capture and Utilization by mineralization of cement pastes derived from recycled concrete. *Nature Scientific Reports*. 2020, (10), Nr. 5614
- [28] Zajac, M.; Skocek, J.; Skibsed, J.; Ben Haha, M. CO₂ mineralization of demolished concrete wastes into a supplementary cementitious material – a new CCU approach for the cement industry. *RILEM Technical Letters*. 2021, (6), S.53-60
- [29] Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie, Hrsg. Re-Use und Recycling von Ziegeln: Status Quo und Perspektiven. Berlin, 2020 [Zugriff am: 10.03.2020] Verfügbar unter: <https://www.bvse.de/gut-informiert-mineralik/nachrichten-mineralik/5498-ressourcenschonung-durch-re-use-und-recycling-von-ziegeln.html>
- [30] Müller, C.; Palm, S.; Graubner, C.-A.; Proske, T.; Hainer, S.; Rezvani, M.; Neufert, W.; Reuken, I. Zemente mit hohem Kalksteingehalten – Dauerhaftigkeit und praktische Umsetzbarkeit. *Beton*. 2014, 64(1-2), S.43-50
- [31] Beuntner, N. Zur Eignung und Wirkungsweise calcinierter Tone als reaktive Bindemittelkomponente im Zement. Berlin, 2019 (DAfStb: Schriftenreihe 628)
- [32] Schulze, S.; Rickert, J. Puzzolane aus Calcinerung kalkhaltiger und dotierter Tone – Untersuchungen zu deren Hydratationsverhalten im Zement. Düsseldorf, 2020 (IGF-Forschungsvorhaben 19744 N)
- [33] Scrivener, K.; Favier, A., Hrsg. Calcined clays for sustainable concrete: Proceedings of the 1st international conference on calcined clays for sustainable concrete (Lausanne 23.-25.06.2015). Heidelberg, 2015 (RILEM Bookseries 10)
- [34] Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, Hrsg. Circular Economy – Kreisläufe schließen, heißt zukunftsfähig sein. Stuttgart, 2019
- [35] Asam, C. Ressourceneffizienzpotenziale in der Kreislaufwirtschaft des Bauwesens. VDI-Bautechnik Jahresausgabe. 2019, 94, S.151-155
- [36] Bundesministerium für Bildung und Forschung, Hrsg. Ressourcenschonender Beton – Werkstoff der nächsten Generation: R-Beton [Zugriff am: 30.10.2018] Verfügbar unter: <https://www.r-beton.de/>
- [37] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Hrsg. Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620: Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN EN 1992-1-1. Berlin; 2010-09 (DAfStb-Richtlinie)
- [38] Müller, F.; Lehmann, C.; Kosmol, J.; Keßler, H.; Bolland, T. Urban Mining – Ressourcenschonung im Anthropozän. Dessau-Roßlau, 2017 [Zugriff am: 01.06.2022] Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/urban-mining-ressourcenschonung-im-anthropozan>
- [39] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Hrsg. Materialströme im Hochbau – Potenziale für eine Kreislaufwirtschaft. Bonn, 2016 (Zukunft Bauen – Forschung für die Praxis 6)
- [40] Mostert, C.; Sameer, H.; Glanz, D.; Bringezu, S.; Rosen, A. Neubau aus Rückbau – Wissenschaftliche Begleitung der Planung und Durchführung des selektiven Rückbaus eines Rathausanbaus aus den 1970er-Jahren und der Errichtung eines Neubaus unter Einsatz von Urban Mining (RückRat). Bonn, 2021 (BBSR Online-Publikation 15/2021)
- [41] Ditterich, S.; Thome, V.; Seifert, S.; Höhn, A.-L. Verwertungspotenzial von elektrodynamisch aufbereitetem Altbeton. In: Thomé-Kozmiensky, K.J. (Hrsg.). Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 2. Neuruppin, 2015, S.632-638
- [42] Kortmann, J.; Kopf, F.; Hillemann, L.; Jehle, P. Recycling von Carbonbeton – Aufbereitung im großtechnischen Maßstab gelungen! In: Verein Deutscher Ingenieure, Hrsg. VDI-Bautechnik Jahresausgabe 2019, 94, S.38-44
- [43] Neufassung der Verwaltungsvorschrift für die Anwendung von Umweltschutzanforderungen bei der Beschaffung von Liefer-, Bau- und Dienstleistungen (Verwaltungsvorschrift Beschaffung und Umwelt – VwVBU) – Anhang 1 Umweltschutzanforderungen bei der Beschaffung (Leistungsblätter). Berlin, 2021
- [44] Norm DIN Entwurf 1045-1000 2022-06. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton: Teil 1000: Grundlagen und Betonbauqualitätsklassen (BBQ)
- [45] Müller, C.; Palm, S.; Hermerschmidt, W. Dauerhaftigkeitseigenschaften von Betonen mit CEM II/C-M (S-LL)- und CEM II/B-LL-Zementen: Auswertung vorhandener Studien. *Beton*. 2019, 69(10), S.362-371
- [46] Neufert, W.; Reuken, I.; Müller, C.; Palm, S.; Graubner, C.-A.; Proske, T.; Rezvani, M. Leistungsfähigkeit klinkereffizienter Zemente mit Hüttensand und Kalkstein. *Beton*. 2017, 67(3), S.89-97
- [47] Schließer, A.; Garrecht, H. Einfluss von Kornform und -dichte auf die Packungsdichte von mineralisch gebundenen Baustoffen. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Hrsg.

- Beiträge zur 3. DAfStb-Jahrestagung mit 56. Forschungskolloquium (DAfStb-Forschungskolloquium 56; Stuttgart 11.12.11.2015). Stuttgart, 2015
- [48] Trninic, D. Berechnungsmodelle und Software zur Optimierung der Packungsdichte von Korngemischen für ressourceneffizienten Beton. Graz, 2013. TU Graz, Master-Arb., 2013
- [49] Landmann, M.; Khripacheva, I.; Döring, I.; Palzer, U. Gerührt, nicht geschüttelt – neue Mischmethode. In: Verband Deutscher Betoningenieure, Hrsg. Frühlingstagung der VDB Regionalgruppe 14. (Leipzig 14.03.2019), Tagungsunterlagen
- [50] Remus, R.; Rößler, C.; Ludwig, H.-M.; Orben, J. Powerultraschallgestützte Betonherstellung: Scale Up der Laborexperimente. BFT International. 2017, 83(5), S.48-54
- [51] University of Cambridge, Institute for Sustainability Leadership, Hrsg. Material economics – industrial transformation 2050 – pathways to net-zero emissions from EU heavy industry. Cambridge, 2019
- [52] Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, Hrsg. Alte Orte, neuer Glanz – ressourceneffizientes Bauen und Wohnen im Bestand: Ergebnisse des ‚Zukunftsdialogs Rohstoffproduktivität und Ressourcenschonung‘. Wuppertal, 2008
- [53] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Hrsg. Leitfaden Nachhaltiges Bauen. Berlin, 2013
- [54] Dreßßen, T.; Graubner, C.-A.; Hauer, B.; Hegger, J.; Hierlein, E.; Roth, C.; Schießl, P.; Wiens, U. Grundsätze des nachhaltigen Bauens mit Beton – Inhalte und Anwendungsbeispiel. Beton. 2012, 62(9), S.328-337
- [55] Hüttmann, M. Graue Energie – Abreißen oder sanieren? In: Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, Hrsg. BUND-Jahrbuch 2018 Ökologisch Bauen und Renovieren: Nachhaltige Orientierung für Bauherren. Stuttgart, S.16-19
- [56] Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, Hrsg. Rohstoffversorgung und Ressourcenproduktivität in der deutschen Zementindustrie: Analyse des Status quo und Perspektiven. Wuppertal, 2015. Verfügbar unter: https://zementverbindet-nachhaltig.de/images/studien/Studie_Rohstoffversorgung_Ressourcenproduktivitaet_C3A4t_Zementindustrie
- [57] Pichlmeier, F. Ressourceneffizienz im Bauwesen – Von der Planung bis zum Bauwerk. Berlin, 2019
- [58] Salem, E. Wiederverwendung von Bauteilen im Bauwesen – eine technisch wirtschaftliche Analyse. Wien, 2020. Wien, TU, Masterarb., 2020
- [59] Landesamt für Bauen und Verkehr, Bautechnisches Prüfamt, Hrsg. Wiederverwendung von Fertigteilen aus Beton, Stahl- und Spannbeton: Fassung 24.08.2012. Cottbus, 2012
- [60] Dechantsreiter, U.; Horst, P.; Mettke, A.; Asmus, S.; Schmidt, S.; Knappe, F.; Reinhardt, J.; Theis, S.; Lau, J.J. Instrumente zur Wiederverwendung von Bauteilen und hochwertigen Verwertung von Baustoffen. Dessau-Roßlau, 2015 (UBA-Texte 93/2015)
- [61] Asam, C. Die Wiederverwendung von Betonfertigteilen als Beitrag zum nachhaltigen Bauen. IEMB Info. 2007, (2), S.1-8
- [62] Friedrich, T. InnoLiving® – ein Betonbau für die Zukunft modular und energieeffizient. Beton- und Stahlbetonbau. 2021, 116(4), S.A4-A6
- [63] Kaiser, O.S.; Krauss, O. Systemische Ansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz im Bauwesen. Berlin, 2015 (VDI ZRE Kurzanalyse 12)
- [64] Bundesverband Spannbeton-Fertigdecken, Hrsg. Die Zukunft Spannbeton-Fertigdecken: schnell – flexibel – wirtschaftlich. Berlin, 2019
- [65] Albrecht, C.; Albert, A.; Pfeffer, K.; Schnell, J. Bemessung und Konstruktion von zweiachsig gespannten Stahlbetondecken mit abgeflachten rotationssymmetrischen Hohlkörpern. Beton- und Stahlbetonbau. 2012, 107(9), S.590-600
- [66] Fischer, O.; Gehrlein, S.; Lechner, T.; Mensinger, M.; Ndogmo, J.; Seidl, G. Entwicklung ressourcenschonender, modularer Betonkonstruktionen aus Ultrahochleistungsbeton (UHPC). Stuttgart, 2017 (IRB-Forschungsbericht F 3053)
- [67] Seifert, W.; Lieboldt, M.; Curbach, M. Ressourcenverfügbarkeit und Konsequenzen bei der Planung von Betonbauwerken. Beton. 2019, 69(9), S.321-322
- [68] Seifert, W.; Lieboldt, M. Ressourcenverbrauch im globalen Stahlbetonbau und Potenziale der Carbonbetonbauweise – Globale Herausforderungen des Bauwesens. Beton- und Stahlbetonbau. 2020, 115(6), S.469-478
- [69] Lösch, C.; Rieseberg, P. Infralichtbeton – Entwurf, Konstruktion, Bau. Stuttgart, 2018
- [70] Flatt, R.J.; Wangler, T., Hrsg. Digital Concrete 2018: Special Issue. Cement and Concrete Research. 2018, 112
- [71] Küppers, M., Hrsg. Digital Concrete 2020: Sonderheft. CPT Worldwide – Construction Printing Technology. 2020, (2)
- [72] Schänzlin, J. Eurocode 5:2022 – Zur Bemessung von Holz-Beton-Verbunddecken. In: Karlsruher Institut für Technologie, Hrsg. Karlsruher Tage 2018 – Holzbau: Forschung für die Praxis (Karlsruhe 4.-5.10.2018). Karlsruhe, 2018, S.85-103
- [73] Holschemacher, K.; Kieslich, H. Holz-Beton-Verbund. In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. Beton-Kalender 2021. Berlin, 2021, S.421-531
- [74] Mechtcherine, V.; Dressler, I.; Empelmann, M.; Gehlen, C.; Glock, C.; Kuhn, A.; Lanwer, J.-P.; Lowke, D.; Müller, S.; Neef, T.; Nerella, V.N.; Stephan, D.; Vasilic, K.; Weger, D.; Wiens, U. Digitaler Betonbau durch additive Verfahren – Sachstand und Forschungsbedarf. Beton- und Stahlbetonbau. 2021, 116(11), S.881-900
- [75] Wörner, M.; Schmeer, D.; Schuler, B.; Pfänder, J.; Garrecht, H.; Sawodny, O.; Sobek, W. Gradientenbetontechnologie – Von der Mischungsentwicklung über den Bauteilentwurf bis zur automatisierten Herstellung. Beton- und Stahlbetonbau. 2016, 111(12), S.794-805
- [76] Haist, M.; Bergmeister, K.; Curbach, M.; Forman, P.; Gaganelis, G.; Gerlach, J.; Mark, P.; Moffatt, J.; Müller, C.; Müller, H.S.; Reiners, J.; Scope, C.; Tietze, M.; Voit, K. Nachhaltig



- konstruieren und bauen mit Beton. In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. Beton-Kalender 2022: Nachhaltigkeit; Digitalisierung; Instandhaltung. Berlin, 2022, S.421-531
- [77] Bundesverband Baustoffe, Steine und Erden, Hrsg. Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2040 in Deutschland. Berlin, 2022
- [78] Bundesverband Baustoffe Steine und Erden, Hrsg. Mineralische Bauabfälle Monitoring 2018 – Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2018. Berlin, 2021
- [79] University of Cambridge Institute for Sustainability Leadership, Ed. Material economics – industrial transformation 2050 – pathways to net-zero emissions from EU heavy industry. Cambridge, 2019 Available at: <https://materialeconomics.com/publications/industrial-transformation-2050>
- [80] Glossar – Anthropogenes Lager. Verfügbar unter: <https://www.ressource-deutschland.de/instrumente/glossar/a/>
- [81] Urban Mining. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfallressourcen/abfallwirtschaft/urban-mining#strategie-zur-kreislaufwirtschaft>
- [82] BIM oder openBIM? Das ist die große Frage! Verfügbar unter: <https://www.accasoftware.com/de/open-bim-vs-closed-bim?>
- [83] Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen (Gewerbeabfallverordnung – GewAbfV) – Vom 18. April 2017. Bundesgesetzblatt: Teil I. 2017, (22), S.896-904
- [84] Müller, Anette. Baustoffrecycling _ Entstehung, Aufbereitung, Verwertung. Wiesbaden, 2018
- [85] Holcim Susteno 4 – Ressourcenschonender Zement, der den Baustoffkreislauf schliesst: Produktblatt [Zugriff am: 08.06.2022]. Verfügbar unter: <https://www.holcimpartner.ch/de/produkte/zement/susteno>
- [86] Deutsches Institut für Bautechnik, DIBt, Hrsg. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-3.17-2188 Portlandhüttenzement CEM II/A-S 42,5 N (rc) "Königs Wusterhausen": Geltungsdauer vom 15.09.2021 bis 15.09.2026 [Zugriff am: 08.06.2022] Verfügbar unter: https://www.dibt.de/pdf_storage/2021/Z-3.17-2188%281.3.17-22%2121%29.pdf
- [87] Fluchs, Sarah; Schaefer, Thilo; Wendland, Finn. Primärbaustoffsteuer – Kurzanalyse. Köln, 2022
- [88] Gesetz des Landes Baden-Württemberg zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Gewährleistung der umweltverträglichen Abfallbewirtschaftung (Landes-Kreislaufwirtschaftsgesetz – LKreiWiG) – Vom 17. Dezember 2020. Gesetzblatt für Baden-Württemberg. 2020, (46), S.1233-1245
- [89] Fischer, Andreas; Küper, Malte. Green Public Procurement – Potenziale einer nachhaltigen Beschaffung – Emissionsvermeidungspotenziale einer nachhaltigen öffentlichen Beschaffung am Beispiel klimafreundlicher Baumaterialien auf Basis von grünem Wasserstoff. Köln, 2021 (IW-Policy Paper 23) [Zugriff am: 08.06.2022] Verfügbar unter: <https://www.iwkoeln.de/studien/andreas-fischer-malte-kueper-potenziale-einer-nachhaltigen-beschaffung.htm>
- [90] Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie, BTB, Hrsg. R-Modul : Concrete Sustainability Council – Technisches Handbuch, Stand 10.12.2020. Berlin, 2020. Verfügbar unter: https://www.csc-zertifizierung.de/?edd_action=free_downloads_process_download&download_id=2157&price_ids=2157
- [91] Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, IZT, Hrsg. Netzwerk „Bildung für Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“ – Nachhaltigkeit in den neuen Ausbildungsordnungen [Zugriff am: 08.06.2022] Verfügbar unter: <https://www.bilress.de/>
- [92] Willkomm, W. Konstruktionsalternativen für recyclingfähige Gebäude. In: Abfallverwertung im Bauwesen. 19. Seminar im Rahmen der UTECH Berlin '97 (17.02.1997). Berlin, 1997, S. 55-82 nicht vorhanden
- [93] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Hrsg. Nachhaltig bauen mit Beton – Planungshilfe des DAfStb. Berlin, 2021 [Zugriff am: 08.06.2022] Verfügbar unter: http://www.dafstb.de/application/nachhaltigkeit/2021-10-29_DAfStb-Planungshilfe_Nachhaltig_Bauen_mit_Beton_final.pdf
- [94] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hrsg. Deutschland – Rohstoffsituation 2020. Hannover, 2022
- [95] DIW Econ, Hrsg. Volkswirtschaftliche Bedeutung der Baustoff-Steine-Erden-Industrie einschließlich indirekter und induzierter Effekte – Eine Studie im Auftrag des Bundesverbands Baustoffe – Steine und Erden. Berlin, 2021 [Zugriff am: 08.06.2022] Verfügbar unter: <https://www.bv-miro.org/wp-content/uploads/bbs-DIW-Studie-Volkswirtschaftliche-Bedeutung.pdf>

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Stoffkreisläufe entlang der Wertschöpfungskette von Zement und Beton
- Abbildung 2: Ressourcenschonung entlang der Wertschöpfungskette im Szenario 2050
- Abbildung 3: Voraussetzungen und Handlungsfelder für eine ressourcenschonende Betonbauweise
- Abbildung 4: Primärrohstoffeinsatz gesamt sowie für Zement und Beton in Deutschland 2020
- Abbildung 5: Herstellung von Zement und Beton sowie mögliche Verwertungswege am Nutzungsende
- Abbildung 6: Elemente in der Erdkruste
- Abbildung 7: Ein Kubikmeter Beton
- Abbildung 8: Zusammensetzung von Klinker, Brennstoffaschen und alternativen Rohstoffen
- Abbildung 9: Rohstoffeinsatz in der Klinkerherstellung 2020
- Abbildung 10: Brennstoffeinsatz der deutschen Zementindustrie im Jahr 2020
- Abbildung 11: Zusammensetzung besonders klinkereffizienter CEM II/C-M- und CEM VI-Zemente
- Abbildung 12: Bestandteile von Zement in Deutschland 2020
- Abbildung 13: Bestandteile von Zement in Deutschland im Szenario 2050
- Abbildung 14: Zementwerke und Rohstoffvorkommen in Deutschland
- Abbildung 15: Bestandteile von Beton 2020
- Abbildung 16: Bestandteile von Beton im Szenario 2050
- Abbildung 17: Einsparpotenziale beim Primärrohstoffeinsatz entlang der Wertschöpfungskette von Zement und Beton im Szenario 2050
- Abbildung 18: Annahmen zur Ermittlung der Einsparpotenziale beim Primärrohstoffeinsatz für Zement und Beton im Szenario 2050
- Abbildung 19: Urbane Stoffkreisläufe für Zement und Beton
- Abbildung 20: Verwertung von Recycling-Gesteinskörnungen in Deutschland 2020
- Abbildung 21: Nachhaltige öffentliche Beschaffung





Impressum

Herausgeber

Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ)
Toulouser Allee 71
40476 Düsseldorf
T +49 (0)211 45 78 0
F +49 (0)211 45 78 296
vdz@vdz-online.de
www.vdz-online.de

Verantwortlich

Dr. Martin Schneider

Projektkoordinierung

Dr. Jörg Rickert

Projektteam

Birgit Bäumer
Dennis Behrouzi
Dr. Matthias Böhm
Dr. Wibke Hermerschmidt
Dr. Volker Hoenig
Dr. Helmut Hoppe
Dr. Stefan Kubens
Dr. Klaus Lipus
Manuel Mohr
Dr. Christoph Müller
Dr. Sebastian Palm
Jochen Reiners
Dr. Thomas Richter
Dr. Johannes Ruppert
Albrecht Schall
Katrin Severins
Nazar Sultanov

Design

arndtteunissen GmbH, Düsseldorf

Konzeption und Gestaltung

Servicedesign GmbH, Heidelberg

Druck

Stolzenberger Druck und
Werbung GmbH & Co. KG, Leimen

Bildnachweis

S. 1: Stefanie Grebe, Düsseldorf [Ausschnitt]
S. 5: SCHWENK Zement GmbH & Co. KG
S. 7: HeidelbergCement AG/Steffen Fuchs
S. 9: SCHWENK Zement GmbH & Co. KG
S. 13: Märker Zement GmbH
S. 20: VDZ/Annalena Krause
S. 24: VDZ
S. 29: Deutsche Bundesstiftung Umwelt
S. 30: Bundesverband Spannbeton-Fertigdecken
S. 39: DanBu.Berlin/stock.adobe.com
S. 40: IZB
S. 42: Fraunhofer IBP
S. 45: CSC
S. 46: Wikipedia/Guckheim
S. 53: Stefanie Grebe, Düsseldorf [Ausschnitt]

Zitierung

Verein Deutscher Zementwerke, VDZ,
Hrsg. Ressourcen der Zukunft für Zement und Beton –
Potenziale und Handlungsstrategien. Düsseldorf, 2022

Online-Ausgabe unter

www.vdz-online.de/ressourcenschonung

Diese Publikation wurde klimaneutral gedruckt,
auf Recyclingpapier, das mit dem Blauen Engel
und nach FSC® zertifiziert ist.



