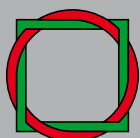


# Rohstoffversorgung und Ressourcenproduktivität in der deutschen Zementindustrie

Analyse des Status quo und Perspektiven



Initiative für Nachhaltigkeit in der deutschen Zementindustrie



**Wuppertal Institut**  
für Klima, Umwelt, Energie  
GmbH



ZEMENT  
VERBINDET  
NACHHALTIG



## Auftraggeber

Industriegewerkschaft  
Bauen-Agrar-Umwelt

Industriegewerkschaft  
Bergbau, Chemie, Energie

Sozialpolitische Arbeitsgemeinschaft  
der Deutschen Zementindustrie e.V.

in Verbindung mit dem

Verein Deutscher Zementwerke e.V.

## Bearbeitung

Wuppertal Institut  
für Klima, Umwelt, Energie GmbH

Döppersberg 19  
42103 Wuppertal

Tel.: +49 (0)202 - 2492 - 0  
Fax: +49 (0)202 - 2492 - 108

Prof. Dr. Stefan Bringezu  
(Projektleitung)  
Dipl.-Ing. Michael Ritthoff  
Dipl.-Volksw. Sören Steger  
Dipl.-Soz. Wiss.  
Bettina Bahn-Walkowiak

Abschluss: Oktober 2015

Diese Studie ist ein Beitrag der Sozialpartner zur Initiative für Nachhaltigkeit in der deutschen Zementindustrie.

[www.zement-verbindet-nachhaltig.de](http://www.zement-verbindet-nachhaltig.de)

## Bildnachweis

Titelblatt (von links oben nach rechts unten):  
VDZ (1-4),  
CEMEX Deutschland AG / Armin Okulla (5),  
HeidelbergCement AG / Steffen Fuchs (6)



ZEMENT  
VERBINDET  
NACHHALTIG



<b>Zusammenfassung</b> .....	8
<b>Einführung und Ziel der Studie</b> .....	11
<b>1 Einsatzstoffe und Flächennutzung in der deutschen Zementindustrie</b> .....	12
1.1 Zementindustrie in Deutschland .....	12
1.2 Rohstoffeinsatz .....	13
1.3 Brennstoffeinsatz .....	15
1.4 Flächennutzung.....	15
1.5 Nachnutzung stillgelegter Abbaustätten.....	17
1.6 Zwischenergebnis .....	18
<b>2 Rohstoffproduktivität – Definition und Messung</b> .....	20
2.1 Definition von Rohstoffproduktivität.....	20
2.2 Messung von Rohstoffproduktivität.....	20
2.2.1 Einführung und mögliche Indikatoren.....	20
2.2.2 Anwendbarkeit der Indikatoren auf Firmen- und Produktebene .....	24
2.2.3 Relevanz der Indikatoren für die Zement- und Betonherstellung.....	24
2.3 Zwischenergebnis .....	25
<b>3 Potenziale zur Steigerung der Rohstoffproduktivität</b> .....	26
3.1 Herstellungsprozess.....	26
3.1.1 Potenziale zur Minderung des thermischen Energiebedarfs .....	26
3.1.2 Potenziale zur Minderung des elektrischen Energiebedarfs .....	27
3.2 Primärrohstoffe und Sekundärrohstoffe.....	28
3.2.1 Weitere natürliche Rohstoffe .....	29
3.2.2 Sekundärrohstoffe aus der Verwertung industrieller Nebenprodukte .....	29
3.3 Alternative Zemente und Bindemittel.....	30
3.4 Zementanwendung im Beton.....	31
3.4.1 Rezyklierte Gesteinskörnungen.....	31
3.4.2 Alternative Betone .....	33
3.4.3 Alternative Betonausgangsstoffe .....	33
3.4.4 Betone mit verbesserter Leistung .....	34
3.4.5 Verlängerung der Nutzungsdauer.....	35
3.4.6 Vorfertigung .....	36
3.5 Zwischenergebnis – Grenzen und Potenziale der Rohstoffproduktivität .....	36
<b>4 Rohstoffpolitik und Rohstoffproduktivität</b> .....	38
4.1 Politische und rechtliche Rahmenbedingungen .....	38
4.1.1 Zielorientierung im internationalen und EU-Kontext ..38	
4.1.2 Ökonomische Instrumente in anderen EU-Mitgliedsstaaten .....	39
4.1.3 Abfall- und produktbezogene Regelungen.....	40
4.1.4 Normen und Richtlinien .....	41
4.2 Von ProgRess I zu ProgRess II – Die Entwicklung des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms .....	42
4.2.1 Indikatoren und Ziele in ProgRess II.....	42
4.2.2 Handlungsansätze.....	44
4.3 Zwischenergebnis – Umsetzungsmöglichkeiten und Mitwirkungsoptionen der deutschen Zementindustrie .....	44
<b>5 Ergebnisse und Schlussbetrachtung</b> .....	48
Literatur und Materialien .....	51



**Abbildungen**

Abbildung 1: Versand und Verbrauch von Zement in Deutschland .....	12
Abbildung 2: Entwicklung des inländischen Zementversands nach den Hauptzementarten CEM I - III .....	13
Abbildung 3: Übersicht der von ProgRess I berücksichtigten Rohstoffe.....	20
Abbildung 4: Schema und Indikatoren des sozio-industriellen Metabolismus .....	21
Abbildung 5: Produktionsschritte der Zementherstellung.....	27
Abbildung 6: Erhöhung des Energieverbrauchs beim Betonrecycling in Abhängigkeit vom Aufbereitungsverfahren und der gewählten Allokation .....	32
Abbildung 7: Unterschiede hinsichtlich der Umweltbelastungen zwischen einer Brücke aus herkömmlichem und aus hochfestem Beton.....	34
Abbildung 8: Übersicht der von ProgRess I und II berücksichtigten Ressourcen und Rohstoffe.....	42

**Tabellen**

Tabelle 1: Rohstoffeinsatz der deutschen Zementindustrie .....	14
Tabelle 2: Thermischer Energieeinsatz bei der Zementherstellung in Deutschland.....	15
Tabelle 3: Fossiler Brennstoffeinsatz bei der Zementherstellung in Deutschland.....	16
Tabelle 4: Flächenäquivalente der jährlich neuen Abgrabungen durch oberflächennahe Rohstoffgewinnung in 2013 .....	16
Tabelle 5: Übersicht der D-, R- und T-Indikatoren des Materialinputs.....	22
Tabelle 6: Material-, Rohstoff- und Ressourcenproduktivität der deutschen Volkswirtschaft .....	23
Tabelle 7: Bedeutsamste Rohstoffe in DMI, RMI und TMR: Anteile am jeweiligen Gesamtindikator in absteigender Reihenfolge für EU-27 im Jahr 2008.....	24
Tabelle 8: Gegenüberstellung der Ziele und Indikatoren von ProgRess I und ProgRess II.....	43
Tabelle 9: Übersicht der von ProgRess II (Entwurf) vorgeschlagenen Maßnahmen mit Relevanz für die Zementindustrie .....	44

## Zusammenfassung

Die deutsche Zementindustrie steht am Anfang einer für die Volkswirtschaft elementaren Wertschöpfungskette (Zement-Beton) und liefert einen essenziellen Grundstoff für andere Sektoren, insbesondere für die Bauwirtschaft. Zur Herstellung des Zements sind die Unternehmen und ihre Mitarbeiter auf eine langfristig planbare Versorgung mit mineralischen Rohstoffen angewiesen. Gleichzeitig trägt die Branche dadurch in nicht unerheblichem Maße zum Abbau einheimischer Rohstoffe bei. Im Kontext nationaler und europäischer Rohstoffstrategien, wie beispielsweise des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms (ProgRess) ist daher auch die deutsche Zementindustrie angehalten, ihren Beitrag zur Erfüllung der ambitionierten rohstoffpolitischen Ziele, u.a. die Verdopplung der Rohstoffproduktivität bis 2020, zu leisten.

Vor diesem Hintergrund untersucht die vorliegende Studie, in welcher Weise die Zementindustrie einschließlich der nachgelagerten Betonindustrie bereits heute zur Ressourcenschonung beiträgt und welche Perspektiven sich für eine weitere Steigerung der Ressourcenproduktivität sowie eine nachhaltige Versorgung der Branche mit Primär- und Sekundärrohstoffen aus heutiger Sicht bieten.

### Einsatzstoffe und Flächennutzung in der Zementindustrie

Zement als Grundstoff für Beton und Mörtel ist einer der wichtigsten heute verwendeten Baustoffe weltweit. Seine Herstellung erfolgt überwiegend aus einheimischen Rohstoffquellen. Entsprechend stark hängt die Zementindustrie vom Zugang zu diesen Ressourcen ab. Hierbei spielen nicht nur die geologische Verfügbarkeit der Zementrohstoffe eine wichtige Rolle, sondern auch die politischen und rechtlichen Rahmenbedingungen, die Akzeptanz bei der Bevölkerung, mögliche Umweltauswirkungen und Flächennutzungskonkurrenzen.

Im Jahr 2014 wurden in Deutschland ca. 32,1 Mio. t Zement produziert. Zur Herstellung dieser Produktionsmenge hat die deutsche Zementindustrie 50,1 Mio. t Rohstoffe eingesetzt – davon allein 8 Mio. t in Form von Sekundärrohstoffen, mit denen rund 16 % des Gesamtrohstoffbedarfs gedeckt

werden konnten. Der damit hergestellte Zement wird im Wesentlichen als Ortbeton oder für Betonfertigteile verwendet. Rechnet man die für die Zuschlagstoffe benötigten Mengen an Primärrohstoffen hinzu, liegt der Rohstoffeinsatz für die Betonherstellung in Deutschland pro Jahr in einer Größenordnung von 180 bis 190 Mio. t.

Neben dem Einsatz von Primär- und Sekundärrohstoffen verwendet die deutsche Zementindustrie auch große Mengen an Brennstoffen, vor allem zur Herstellung des Portlandzementklinkers. Allerdings spielen fossile Brennstoffe in Deutschland nur noch eine untergeordnete Rolle. So wird der thermische Energiebedarf überwiegend (63,4 % in 2014) durch Sekundärbrennstoffe gedeckt, wie z.B. Altreifen, Altöle, Gewerbe- und Siedlungsabfälle oder Altholz. Der Anteil der fossilen Brennstoffe (v.a. Braun- und Steinkohle) ging kontinuierlich von 74,3 % im Jahr 2000 auf aktuell 36,6 % zurück.

Die deutsche Zementindustrie fördert den Großteil ihres Primärrohstoffbedarfs selbst. Die Mehrzahl der Zementwerke in Deutschland ist nicht zuletzt aus ökologischen und ökonomischen Gründen direkt bei den entsprechenden Abbaustätten von Kalkstein oder Mergel angesiedelt, so dass der wichtigste Rohstoff direkt vor Ort zu Klinker und Zement verarbeitet werden kann. Die jährlich neue Flächeninanspruchnahme zur Gewinnung der Rohstoffe für Zement (im Wesentlichen Kalkstein) beträgt 57 ha, darüber hinaus wird für die Extraktion von Sand und Kies eine Fläche von 424 ha in Anspruch genommen. Wird auch der Braunkohleeinsatz bei der Zementherstellung (ca. 2,2 Mio. t) in der Flächenberechnung berücksichtigt, erhöht sich der Flächenbedarf in der deutschen Zementindustrie um 7 ha. Alle im Betrieb befindlichen und genehmigten Abbaustätten der Zementindustrie erstrecken sich auf eine Fläche von etwa 5.600 ha. Gemessen an der gesamten Abgrabungsfläche zur Gewinnung oberflächennaher Rohstoffe in Deutschland entspricht dies einem Anteil von ca. 3 bis 4 %.

Die von der Zementindustrie beanspruchten Flächen werden über einen längeren Zeitraum, aber zeitlich befristet genutzt. Bereits während sowie im Anschluss an die Abbautätigkeit werden diese zumeist renaturiert, re-

kultiviert oder in wenigen Fällen als Deponieraum genutzt. Da die Renaturierung von Steinbrüchen eine herausragende Rolle einnimmt, sind die Abbaustätten für die Artenvielfalt von großer Bedeutung.

### Indikatoren zur Messung von Rohstoffproduktivität

Der Begriff „Material-, Rohstoff- bzw. Ressourcenproduktivität“ bezieht sich in der vorliegenden Untersuchung grundsätzlich auf den Einsatz stofflicher Ressourcen. Aktuell werden zahlreiche Indikatoren und Messzahlen entwickelt, die bereits gut geeignet sind, die Entwicklung der Rohstoffproduktivität abzubilden.

Bei der Messung der Material-, Rohstoff- bzw. Ressourcenproduktivität wird die ökonomische Wertschöpfung in Beziehung gesetzt zum Einsatz stofflicher (Primär-)Ressourcen. Sie kann auf volkswirtschaftlicher Ebene durch Indikatoren abgebildet werden. Der Direkte Material Input (DMI) gehört zu den gängigen Indikatoren, dessen Erfassungsbasis schrittweise erweitert werden kann, um den lebenszyklusweiten Rohstoffaufwand (RMI) bis hin zum gesamten Primärmaterialaufwand (TMR) zu bestimmen.

Die Materialproduktivität in Deutschland ist zwischen 2000 und 2012 um rund 52 % angestiegen. Geringer fiel hingegen der Anstieg der Rohstoff- und Ressourcenproduktivität aus (mit 34 % bzw. 4 %), da hierbei zusätzlich vorgelagerte Materialinputs inklusive der ausländischen Rohstoffbasis berücksichtigt werden.

Listet man alle abiotischen und biotischen Ressourcenkategorien nach ihrer mengenmäßigen Bedeutung, so stehen Sand und Kies bei DMI (34 %) und RMI (29 %) an erster Stelle, nur beim umfassenderen TMR wird Sand und Kies (17 %) in puncto Relevanz von der Braunkohle (19 %) übertroffen. Kalkstein und Gips rangieren bei DMI (8 %) und RMI (8 %) an dritter Stelle, beim TMR (5 %) an sechster.

### Grenzen und Potenziale der Rohstoffproduktivität bei der Zement- und Betonherstellung

Entscheidend für die Steigerung der Ressourcenproduktivität sind technologisch-organisatorische Maßnah-



men entlang der Wertschöpfungskette von Zement und Beton. Dabei geht es zum einen um Maßnahmen, die bei der Zementproduktion ansetzen können. Zum anderen geht es um Maßnahmen in nachgeschalteten Prozessen, beispielsweise bei der Betonherstellung. Die Produktion von Zement erfolgt heute in Prozessen und Anlagen, die schon einen langen Optimierungsprozess durchlaufen haben. Auch wenn sich ein Großteil der Anlagen zur Herstellung von Zement und Zementklinker bereits seit vielen Jahren in Betrieb befindet und größere sowie teils modernere Anlagen grundsätzlich verfügbar sind, ist das Effizienzpotenzial bei bestehenden Technologien relativ gering und kann kaum wirtschaftlich erschlossen werden. Ähnliches gilt auch für die Möglichkeit, die schon bisher eingesetzten Sekundärrohstoffe noch stärker zu nutzen. Im Gegenteil ist unter der Annahme einer gleich bleibenden Zementproduktion fraglich, ob Sekundärrohstoffe wie Flugaschen, Hüttsand oder Gießereialtsande angesichts des laufenden Strukturwandels im Energiesektor und in der industriellen Produktion im bisherigen Umfang bereitstehen werden. Dies bedeutet nicht zuletzt, dass die Zementindustrie auch langfristig auf die sichere Versorgung mit Primärrohstoffen angewiesen sein wird.

Deutlich größeres Potenzial wird bei der Entwicklung alternativer Zemente und Bindemittel gesehen, die sich zu energie- und ressourcenschonenderen Alternativen zu den bisher auf dem Markt befindlichen Zementen entwickeln könnten. Sie befinden sich derzeit noch im Entwicklungsstadium. Wichtig für ihre Weiterentwicklung ist insbesondere auch eine dauerhaft zuverlässige Rohstoffbasis.

Die Zementherstellung selbst ist nur einer von mehreren Ansatzpunkten zur Verbesserung der Rohstoffproduktivität entlang der Wertschöpfungskette von Zement und Beton. So besteht vor allem bei den Betonausgangsstoffen ein Potenzial zur Ressour-

schonung. Perspektivisch ist damit zu rechnen, dass künftig größere Mengen mineralischer Bauabfälle für die Erzeugung von rezyklierten Gesteinskörnungen zur Verfügung stehen werden. Für deren hochwertige Erzeugung muss jedoch noch weitere Entwicklungs- und Forschungsarbeit geleistet werden. Weitere Potenziale zur Erhöhung der Rohstoffproduktivität bestehen in der industriellen Vorfertigung von Betonbauteilen sowie perspektivisch auch in der Nutzung von ultrahochfesten Betonen. Im Idealfall kann beides verknüpft werden. Wesentlich ist hierbei, dass die Möglichkeiten zur verbesserten Qualitätssicherung (Kontrolle der Zusammensetzung, der Bauteilbemessung usw.) genutzt werden, um insgesamt zu einer Verringerung der Ressourceninanspruchnahme bei verbesserter Funktionalität der Bauwerke zu gelangen.

#### **Rohstoffproduktivität im Kontext des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms**

Die Rohstoffproduktivität wird neben technologisch-organisatorischen Aspekten auch wesentlich von politischen Rahmenbedingungen beeinflusst. Hierzulande und auf Grund seiner Vorbildfunktion in der EU von zentraler politischer Bedeutung ist das „Deutsche Ressourceneffizienzprogramm“ (ProgRess), mit dem das Wirtschaftswachstum vom Einsatz natürlicher Ressourcen weitgehend entkoppelt werden soll. Der im August 2015 zur öffentlichen Konsultation vorgelegte Entwurf für die zweite Phase (ProgRess II) sieht wie bereits in Phase 1 die Verdopplung der abiotischen Rohstoffproduktivität bis 2020 gegenüber 1994 vor. Zusätzlich sollen die Gesamtrohstoffproduktivität und der absolute Rohstoffverbrauch erfasst werden. Vor diesem Hintergrund werden volkswirtschaftliche, kreislaufwirtschaftliche und produktspezifische Indikatoren und Ziele definiert, die künftig weiter zu konkretisieren sind. Der Fokus des Programms liegt dabei auf informa-

torischen Instrumenten, um die Akteure in die Lage zu versetzen, die Ressourceneffizienzpotenziale in ihrem Bereich erkennen und heben zu können.

ProgRess II enthält mehrere Handlungsfelder, die für die Zement- und Betonindustrie relevant sein dürften. Neben dem Fokus auf die Steigerung der Ressourceneffizienz in der Produktion sowie die Förderung zur Erforschung ressourcenschonender Lösungen für Planung, Konstruktion, Bauausführung und Sanierung einschließlich der Aus- und Weiterbildung entsprechender Fachkräfte ist der Ausbau einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft zu nennen. So strebt die Bundesregierung an, die Erfassung und das Recycling ressourcenrelevanter Mengenabfälle zu optimieren und unterstützt hierfür unter anderem den verstärkten Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen im Hoch- und Tiefbau. Hier wird zu klären sein, welche Einsparungen an Primärrohstoffen angesichts möglicher gegenläufiger Effekte gesamtwirtschaftlich realisiert werden können, wenn Verwertungsströme vom Tief- in den Hochbau umgelenkt werden. Zudem sind mögliche ökologisch nachteilige Nebeneffekte des Einsatzes von RC-Beton (z.B. ein höherer spezifischer Zementbedarf) zu untersuchen.

Insgesamt ergeben sich drei wesentliche Ansatzpunkte, um den Rohstoffeinsatz entlang der Wertschöpfungskette von Zement und Beton in Zukunft noch effizienter, ressourcenschonender und klimafreundlicher zu gestalten:

- die weitere Steigerung des Einsatzes von Sekundärbrennstoffen;
- die Erhöhung des Einsatzes von RC-Gesteinskörnungen bei der Betonherstellung;
- die Förderung von Innovationen in der Material- und Energieeffizienz.



## Einführung und Ziel der Studie

Die deutsche Zementindustrie verfolgt mit ihrer Initiative für Nachhaltigkeit das Ziel, die Branche zukunftsfähig aufzustellen und ihre Entwicklung auf die wachsenden wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Anforderungen abzustimmen. Die politischen Rahmenbedingungen stellen dabei besondere Herausforderungen dar. Zum einen ist damit zu rechnen, dass die Emissionen von Treibhausgasen, die bei der Zementherstellung in großem Umfang entstehen, über das Emissionshandelssystem mittel- bis langfristig verteuert werden. Zum anderen stellt sich die Frage, welche Auswirkungen nationale und europäische Rohstoffstrategien – z. B. das Deutsche Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess) (BMU 2012) und der europäische Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa (Europäische Kommission 2011a, 2011b) – auf den Sektor haben werden. Beide Initiativen verfolgen den Leitgedanken, die gesamtwirtschaftliche Ressourcenproduktivität in Deutschland bzw. der EU zu steigern.

Die Zementindustrie ist ein wichtiger Wirtschaftszweig innerhalb der deutschen Volkswirtschaft, der einen essenziellen Grundstoff für andere Sektoren, insbesondere die Bauwirtschaft, zur Verfügung stellt und dazu auf eine langfristig planbare Versorgung mit Rohstoffen der Steine-Erden-Gewinnung angewiesen ist. Gleichzeitig trägt die Branche vor allem dadurch in nicht unerheblichem Maße zum Abbau einheimischer Rohstoffe bei. Im Kontext der o.g. Initiativen ist daher auch die deutsche Zementindustrie angehalten, ihren Beitrag zur Erfüllung der ambitionierten rohstoffpolitischen Ziele, u. a. die Verdopplung der Rohstoffproduktivität bis 2020, zu leisten.

Vor diesem Hintergrund untersucht die vorliegende Studie, in welcher Weise die Zementindustrie einschließlich der nachgelagerten Betonindustrie bereits heute zur Ressourcenschonung beiträgt und welche Perspektiven sich für eine weitere Steigerung der Ressourcenproduktivität sowie eine nachhaltige Versorgung der Branche mit Primär- und Sekundärrohstoffen<sup>1</sup> aus heutiger Sicht bieten.

Zement als Grundstoff für Beton und Mörtel ist einer der wichtigsten heute verwendeten Baustoffe weltweit. Sei-

ne Herstellung erfolgt überwiegend aus einheimischen Rohstoffquellen. Dementsprechend stark hängt die Zementindustrie vom Zugang zu und der Versorgung mit einheimischen Rohstoffen ab. Hierbei spielen nicht nur die geologische Verfügbarkeit der Zementrohstoffe eine wichtige Rolle, sondern auch die politischen und rechtlichen Rahmenbedingungen, die Akzeptanz bei der Bevölkerung, mögliche Umweltauswirkungen und Flächennutzungskonkurrenzen. Als Ausgangspunkt für die weitere Analyse soll zunächst dargestellt werden, welcher Rohstoff- und Flächenbedarf für die Zementproduktion in Deutschland aktuell besteht, in welcher Relation dieser zu der mit der Herstellung von Betonzuschlagsstoffen wie Sand und Kies steht und welche möglichen konkurrierenden Trends der Flächennutzung insgesamt zu berücksichtigen sind.

Eine vergleichende Darstellung volkswirtschaftlicher Verfahren zur Messung von Ressourcenproduktivität bildet einen weiteren Schwerpunkt der Studie. Der Begriff „Ressourcenproduktivität“ bezieht sich im Folgenden grundsätzlich auf den Einsatz stofflicher Ressourcen. Aktuell werden zahlreiche Indikatoren und Messzahlen entwickelt, die bereits gut in der Lage sind, die Entwicklung der Rohstoffproduktivität abzubilden. Wichtige Vorarbeiten haben die Europäische Statistikbehörde Eurostat und die Organisation für Entwicklung und Zusammenarbeit in Europa (OECD) geleistet, u. a. durch die Erarbeitung von grundlegenden Methodenkonventionen.

Hierzu gehört in erster Linie ein Set von inputorientierten massenflussbasierten Indikatoren, deren Bezugsbasis schrittweise erweitert wird: von den direkt eingesetzten Materialien (z. B. Zement), zu den Rohstoffen (inkl. des verwendeten Kalksteins und der Energieträger) bis zum gesamten Primärmaterialaufwand (inkl. der ungenutzten Extraktion bei der Rohstoffgewinnung). Diese materialflussbasierten Indikatoren werden gemäß der entwickelten Verfahren in Bezug zum Bruttoinlandsprodukt bzw. zur Wertschöpfung gesetzt, um Material-, Rohstoff- bzw. Ressourcenproduktivität zu bestimmen.

Im Rahmen der Studie werden ausgewählte Indikatoren vergleichend dargestellt und im Hinblick auf ihre Relevanz

für die Zement- und Betonherstellung beurteilt. Die Studie fokussiert mit ihrem volkswirtschaftlichen Untersuchungsansatz dabei auf die Massenströme an natürlichen Rohstoffen.

Entscheidend für die Steigerung der Ressourcenproduktivität sind technologisch-organisatorische Maßnahmen entlang der Wertschöpfungskette. Diese werden ebenfalls im Rahmen des Berichts ausführlich thematisiert. Dabei geht es zum einen um Maßnahmen, die bei der Zementproduktion ansetzen können, z. B. in der Zementklinkerherstellung. Zum anderen geht es um Maßnahmen in nachgeschalteten Prozessen, beispielsweise bei der Betonherstellung. Neue in der Entwicklung befindliche Verfahren werden ebenfalls in den Blick genommen. Insgesamt soll ein Überblick über die wichtigsten Strategien und Ansätze zur Steigerung der Ressourcenproduktivität entlang der Wertschöpfungskette von Zement und Beton erstellt und an Beispielen konkretisiert werden.

Die zuvor behandelten ökonomischen und technischen Fragestellungen sollen schließlich in den politischen Kontext eingeordnet werden. Politische Rahmenbedingungen werden von der Politik unter Beteiligung von Verbänden gestaltet. Daher soll geklärt werden, welche Erwartungen an die Steigerung der Ressourcenproduktivität als erreichbar angesehen werden können und welche branchen- und produktspezifischen Faktoren hierbei zu berücksichtigen sind. Dabei soll auch deutlich werden, in welcher Weise Ressourceneffizienz und Rohstoffsicherung ineinandergreifen und dazu beitragen, die Wettbewerbsfähigkeit der Branche und der gesamten Wirtschaft zu steigern.

<sup>1</sup> Primärrohstoffe werden der natürlichen Umwelt entnommen, Sekundärrohstoffe stammen aus der Verwertung von industriellen Nebenprodukten oder dem Recycling von Abfallstoffen.

## 1 Einsatzstoffe und Flächennutzung in der deutschen Zementindustrie

Kapitel 1 gibt einen kompakten Überblick zu Rohstoffbedarf und Flächennutzung der deutschen Zementindustrie sowie der nachgelagerten Transportbeton- und Betonfertigteilerindustrie. Als Einführung werden zunächst die Zementindustrie als Industriezweig sowie die von der Branche hergestellten Produkte in einem kurzen Überblick dargestellt. Anschließend rücken die bei der Zement- und Betonherstellung eingesetzten Roh- und Brennstoffe und der damit verbundene direkte und indirekte Flächenbedarf in den Mittelpunkt. Zu diesem Zweck kann auf umfangreiches Zahlen- und Quellenmaterial des Vereins Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ) zurückgegriffen werden. Das Branchenportrait und die Bestandsaufnahme in Kapitel 1 bilden den Ausgangspunkt für die Analyse in den nachfolgenden Kapiteln.

### 1.1 Zementindustrie in Deutschland

Der Rohstoffbedarf der deutschen Zementindustrie und die daraus abgeleitete Flächennutzung werden im Wesentlichen bestimmt durch das **Produktionsvolumen** der Zementindustrie.

Im Jahr 2014 wurden in Deutschland ca. 32,1 Mio. t Zement produziert, davon entfielen 6,2 Mio. t Zement (inkl. Zementklinker) auf den Export. Zusätzlich importiert wurden etwa 1,3 Mio. t Zement. Der Versand von in Deutschland produzierten Zementen betrug 2014 rund 25,8 Mio. t. Zusätzlich der Importe entspricht dies einem inländischen Zementverbrauch von 27,1 Mio. t, der folglich zu 96 % durch die einheimische Produktion gedeckt wurde.

Der Verbrauch des Jahres 2014 stieg gegenüber dem Vorjahr um 2,2 % an. Generell ist die Marktentwicklung stark von baukonjunkturellen Einflüssen, aber auch von Witterungseinflüssen abhängig, so dass die jährlichen Veränderungen der Produktions- und Ver-

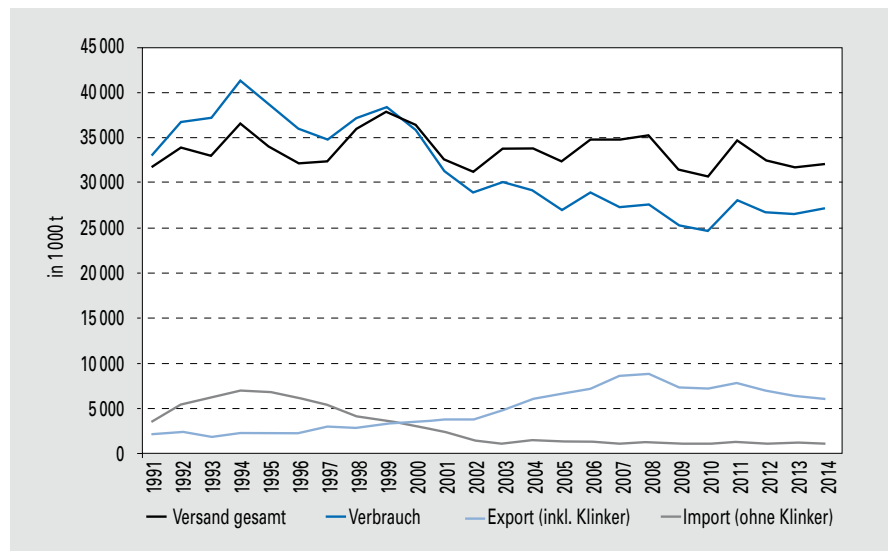


Abbildung 1 Versand und Verbrauch von Zement in Deutschland

Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis von Daten des VDZ

brauchsmengen von Zement mitunter hohe einstellige Prozentwerte erreichen können. Der sich daraus ergebende Trendverlauf der Produktions<sup>2</sup>- und Verbrauchszahlen für Zement ist seit 2004 insgesamt recht stabil (Abb. 1). Während in den 1990er Jahren der inländische Verbrauch höher war als die in Deutschland produzierten Mengen, hat sich dieses Verhältnis spätestens seit 2003 umgekehrt. Nach dem Abklingen des Baubooms in Folge der Wiedervereinigung sank der Zementverbrauch in Deutschland nach 1999 deutlich. Dennoch war die deutsche Zementindustrie in der Lage, ihre Produktion im gleichen Zeitraum weitgehend konstant zu halten und die inländische Nachfragerücklage durch steigende Exporte auszugleichen. Entsprechend erklärt sich der gegenläufige Trend der Im- und Exporte: Waren Anfang der 1990er Jahre steigende Importe notwendig, um die Nachfrage nach Zement in Deutschland zu bedienen, sorgen seit 2002 gestiegene Exporte dafür, die Produktionszahlen in Deutschland stabil zu halten. Derzeit werden knapp 5 % des deutschen Zementverbrauchs durch Importe gedeckt, während rund 20 % des gesamten jährlichen Zementversands exportiert werden.

Der (Primär-)Rohstoffbedarf der deutschen Zementindustrie wird dabei nicht nur durch die absolute Produktionsmenge an Zement insgesamt bestimmt, sondern auch durch die Verteilung dieser Produktionsmenge auf die verschiedenen **Zementarten**. Diese werden über die Zusammenset-

zung ihrer Hauptbestandteile definiert und lassen sich gemäß DIN EN 197-1 in die Hauptzementarten

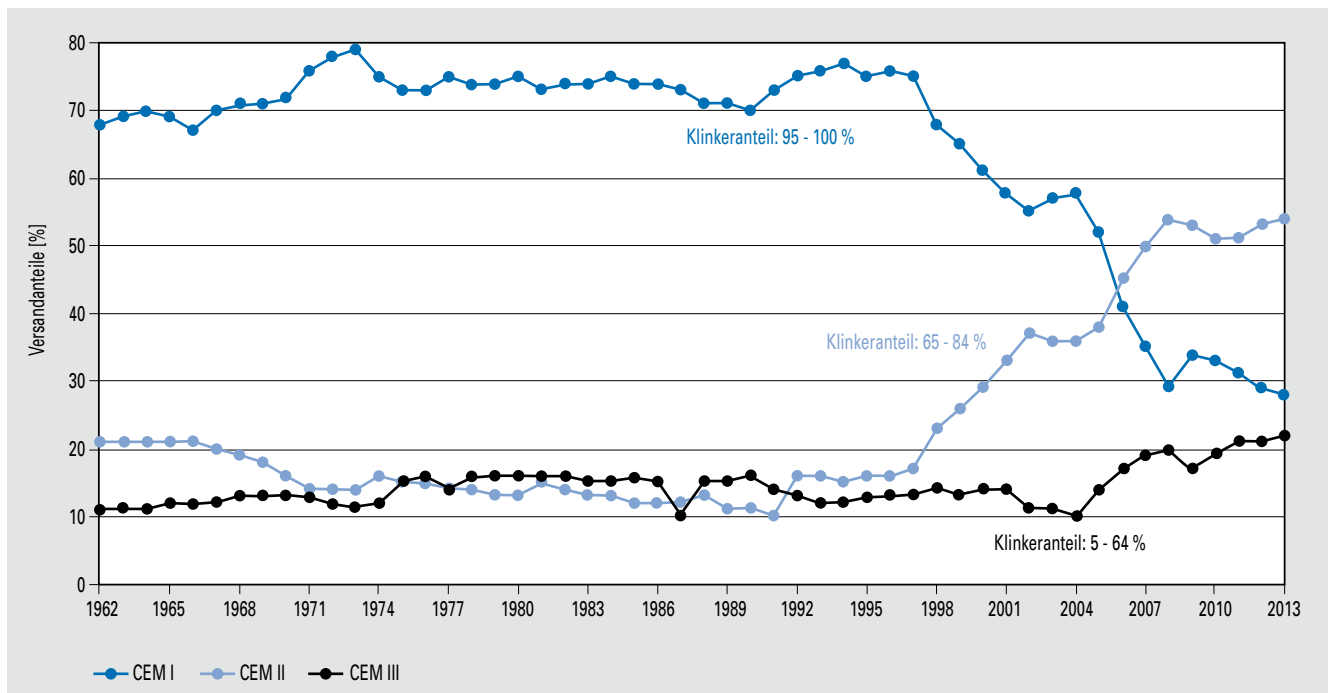
- CEM I – Portlandzement
- CEM II – Portlandkompositzemente
- CEM III – Hochofenzemente
- CEM IV – Puzzolanzemente
- CEM V – Kompositzemente

unterteilen.

Die jeweilige Zementart bestimmt die Zusammensetzung des Produkts und damit auch den Rohstoffeinsatz. So werden für die Herstellung von Portlandzement (CEM I) aufgrund des hohen Klinkeranteils größtenteils Primärrohstoffe eingesetzt. Die Anteile von Portlandzement (CEM I) und Portlandkalksteinzementen (CEM II/LL) am Inlandsversand gingen im Zeitraum 2009 bis 2014 beispielsweise zurück, wohingegen die Anteile von Hochofenzementen (CEM III) und Portlandhüttenzementen (CEM II/S), die relevante Massenanteile von Hüttsand enthalten, am jährlichen Inlandsversand in diesem Zeitraum deutlich zugenommen haben (VDZ 2015a). Damit stieg der Anteil dieser beiden letztgenannten auf Sekundärrohstoffen basierten Zementen am Inlandsabsatz im gleichen Zeitraum von 30,8 % auf 39,3 %.

Im Jahr 2014 wurden 55,6 % des im Inland verbrauchten Zements zur Herstellung von Ort beton verwendet,

<sup>2</sup> Die Analysen beruhen auf Daten des VDZ. Für unsere Darstellung ist die Unterscheidung zwischen Produktion und Absatz/Versand nur von untergeordneter Bedeutung.



**Abbildung 2** Entwicklung des inländischen Zementversands nach den Hauptzementarten CEM I - III

Quelle: VDZ

gefolgt von der Herstellung von Betonfertigteilen (29,0 %), Putz, Mörtel, Estrich und Bauchemie (5,1 %) sowie diversen Einsatzzwecken (z. B. Spritzbeton, Bodenverfestigung) (10,3 %) (VDZ 2015). Die jeweiligen Anteile am Zementverbrauch sind über die Jahre vergleichsweise stabil. Rund zwei Drittel des Zements werden im Hochbau eingesetzt (64,7 % in 2014), bei ebenfalls relativ stabilen Anteilen zwischen Hoch- und Tiefbau im Zeitverlauf (VDZ 2015b).

## 1.2 Rohstoffeinsatz

Für die Herstellung der dargestellten Zementproduktionsvolumina sind große Mengen an Primärrohstoffen notwendig. Es kommen gleichwohl bereits heute in signifikantem und zunehmendem Maße Sekundärrohstoffe zum Einsatz. Die deutsche Zementindustrie hat im Jahr 2014 für die Herstellung von 32,1 Mio. t Zement **Primär- und Sekundärrohstoffe** in Höhe von 50,1 Mio. t eingesetzt. Der Anteil der Primärrohstoffe betrug dabei 84 % (oder 42 Mio. t) des Gesamtrohstoffeinsatzes (ohne Energierohstoffe). Seit 1998 ist der Anteil der alternativen Rohstoffe von 11 % auf 16 % deutlich angestiegen. Diese positive Entwicklung erklärt sich in erster Linie aus den Anstrengungen der deutschen Zementindustrie, ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen

zu reduzieren, indem der Klinkeranteil bei der Zementproduktion auf ein im internationalen Vergleich sehr niedriges Niveau gesenkt wurde.

Seit Ende der 1990er Jahre haben Zementarten mit sehr hohem Klinkeranteil (CEM I Portlandzement) zunehmend an Bedeutung verloren. Gleichzeitig stieg der Anteil jener Zementarten, in denen entweder verstärkt Sekundärrohstoffe zum Einsatz kommen (wie z. B. CEM III Hochofenzemente) oder ungebrannter Kalkstein verwendet wird (CEM II/LL Portlandkalksteinzemente). Portlandzement hat heute nur noch einen Anteil von ca. 30 % am deutschen Zementinlandsversand (Abb. 2). In den letzten Jahren haben sich die Verschiebungen der jeweiligen Anteile verlangsamt. Zwar sank seit 1998 der **Klinker-Zement-Faktor**<sup>3</sup> von 0,78 im Jahr 1998 auf 0,73 im Jahr 2014, gleichzeitig stagniert der Wert aber seit Mitte der 2000er Jahre. Der Klinker-Zement-Faktor lässt sich jedoch nicht beliebig senken, da er zum einen stark von der nur begrenzt zur Verfügung stehenden Menge an Sekundärrohstoffen abhängt und die deutschen Zementhersteller den Wünschen der Kunden nach Erfüllung bestimmter bautechnischer Anforderungen des Zementes nachkommen müssen, die oftmals nur mit einem höheren Klinkeranteil zu erfüllen sind.

Die deutsche Zementindustrie substituiert mittlerweile rund 16 % ihres Rohstoffbedarfs durch Sekundärrohstoffe (insgesamt 8 Mio. t in 2014; vgl. Tab. 1). Dies ist in erster Linie Hochofenschlacke aus der Roheisenerzeugung, welche in Granulationsanlagen mittels Wasser abgekühlt und zu sogenanntem Hüttensand umgewandelt wird. Mit 6,9 Mio. t Hüttensand ist dieses Nebenprodukt der Stahlindustrie der wichtigste alternative Rohstoff in der Zementherstellung, gefolgt von Flugaschen und REA-Gips (jeweils 0,3 Mio. t). In der Klinkerproduktion werden ebenfalls in geringem Umfang (ca. 1,7 % der eingesetzten Rohstoffmenge in 2013) industrielle Nebenprodukte wie Klärschlämme, Flugaschen und Gießereialtsande als Alternative zu Primärrohstoffen eingesetzt (VDZ 2014c).

Ortbeton und Betonfertigteile stellen die beiden bedeutsamsten **Verwendungsarten** von Zement dar. Zusammen induzieren sie 84,6 % des Zementverbrauchs hierzulande über die Wertschöpfungskette von Zement

<sup>3</sup> Der Klinker-Zement-Faktor gibt den Anteil des Klinkers an der Gesamtmenge des produzierten Zements an.

**Tabelle 1** Rohstoffeinsatz der deutschen Zementindustrie

Gruppe	Rohstoff	1998	2009	2010	2011	2012	2013	2014
		in 1.000 t						
Ca	Kalkstein/Mergel/Kreide	45.700	34.580	37.517	40.398	39.070	37.187	38.059
	Sonstige <sup>1)</sup>	180	64	62	51	59	74	75
Si	Sand	1.100	978	1.187	1.245	1.148	1.114	1.150
	Gießereialsand	100	101	148	159	159	158	174
Si-Al	Ton	2.140	802	436	502	1.278	1.093	1.295
	Betonit/Kaolinit	44	47	41	39	38	43	35
Fe	Eisenerz	87	106	132	135	152	143	126
	Sonstige Einsatzstoffe aus der Eisen- und Stahlindustrie <sup>2)</sup>	170	110	92	106	79	104	103
Si-Al-Ca	Hüttensand	4.600	4.480	5.365	5.844	5.927	6.303	6.948
	Flugasche	390	311	316	321	222	313	313
	Ölschiefer	340	230	263	168	142	138	118
	Trass	90	25	29	38	23	32	31
	Sonstige <sup>3)</sup>	300	50	39	21	17	32	46
S	Natürlicher Gips	595	587	620	768	722	703	808
	Natürlicher Anhydrit	475	418	439	505	476	506	477
	Gips aus Rauchgasentschwefelung	420	310	313	350	339	333	321
Al	Einsatzstoffe aus der Metallindustrie <sup>4)</sup>	22	47	55	75	65	47	60
	<b>Gesamt</b>	<b>56.753</b>	<b>43.246</b>	<b>47.054</b>	<b>50.725</b>	<b>49.916</b>	<b>48.323</b>	<b>50.139</b>
	Primär	50.571	37.773	40.664	43.798	43.049	40.959	42.099
	Sekundär	6.182	5.473	6.390	6.927	6.867	7.364	8.040
	Anteil Sekundär in %	10,9	12,7	13,6	13,7	13,8	15,2	16,0

<sup>1)</sup> Kalkschlämme aus der Trink- und Abwasseraufbereitung, Kalkhydrat, Porenbetongranulat, Calciumfluorid

<sup>2)</sup> Kiesabbrand, verunreinigtes Erz, Eisenoxid/Flugasche-Gemisch, Stahlwerksstäube, Walzzunder

<sup>3)</sup> Papierreststoffe, Aschen aus Verbrennungsprozessen, mineralische Reststoffe (z.B. ölverunreinigte Böden)

<sup>4)</sup> Aufbereitungsrückstände von Salzschlacken, Aluminiumhydroxid

Quelle: Eigene Zusammenstellung auf Basis der VDZ-Umweltdaten (verschiedene Jahrgänge)

und Beton. Im Jahr 2014 wurden rund 15,1 Mio. t Zement im Bereich des Ortbetons verbraucht und zu 50,8 Mio. m<sup>3</sup> Beton (vorläufige Zahlen) verarbeitet (BTB 2015). Bei einer angenommenen Trockenbeton-Rohdichte von durchschnittlich 2.400 kg/m<sup>3</sup> ergibt dies eine Betonmenge von ca. 122 Mio. t und somit einen Zementanteil von rund 12 % im Ortbeton. Der Anteil der Gesteinszuschläge als weiterer wichtiger Bestandteil im Beton ist abhängig von dem Mischungsverhältnis der unterschiedlichen Gesteinskörnungen und der gewünschten Betoneigenschaften<sup>4)</sup>. Nach den hier verwendeten Annahmen werden für die Herstellung

der oben genannten 122 Mio. t Ortbeton neben dem Zementeinsatz von ca. 15 Mio. t weitere 92 bis 96 Mio. t mineralische Rohstoffe als Zuschlagsstoffe benötigt.

Für das Segment der Betonfertigteile zeigt sich folgendes Bild: Im Jahr 2014 wurden hierfür 7,9 Mio. t Zement verbraucht. Wendet man dieselben Kennzahlen an wie beim Ortbeton sowie einen Wert von 0,33t/m<sup>3</sup> für den spezifischen Zementeinsatz in Betonfertigteilen an, ergibt dies eine zusätzliche Betonmenge von 23,9 Mio. m<sup>3</sup> oder 57,4 Mio. t für Betonfertigteile (ebenfalls unter der Annahme einer Betondichte von 2.400 kg/m<sup>3</sup>). Wird für Betonfertigteile ein identischer Mengenteil mineralischer Zuschlagsstoffe wie für Ortbeton unterstellt, benötigte man für die Herstellung von Betonfertigteilen im Jahr 2014 neben 7,9 Mio. t

Zement noch weitere 43 bis 45 Mio. t mineralische Rohstoffe als Zuschlagsstoff.

Um den gesamten Rohstoffeinsatz der Wertschöpfungskette von Zement und Beton abzuschätzen, kann, alternativ zu einer Hochrechnung der Menge mineralischer Zuschlagsstoffe pro m<sup>3</sup> Beton über spezifische Koeffizienten, der Rohstoffeinsatz auch über eine Auswertung der Zahlen zur Produktion und Verwendung von Steinen und Erden erfolgen, die sich aus den Statistiken der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe ergeben (BGR 2014). Danach wurden in Deutschland im Jahr 2013 546 Mio. t mineralische Rohstoffe aus natürlichen Lagerstätten gewonnen. Davon waren die für die Zement- und Betonherstellung relevanten Rohstoffe Bausande und -kiese (236 Mio. t), gebrochene Natursteine

<sup>4)</sup> Häufig werden typische Werte von 1800 kg bis 1900 kg/m<sup>3</sup> Frischbeton angegeben (so z. B. HeidelbergCement 2014). Bei einer durchschnittlichen Betonrohndichte von 2400 kg/m<sup>3</sup> entspricht dies einem Anteil von 75 % bis 79 % am Ortbeton.

**Tabelle 2** Thermischer Energieeinsatz bei der Zementherstellung in Deutschland

	in Mio. GJ/a	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Fossil	Steinkohle	10,2	9,0	10,0	9,8	7,8	8,9
	Braunkohle	20,0	20,7	23,7	22,3	19,7	19,5
	Petrolkoks	4,4	3,3	2,1	3,2	3,2	4,1
	Heizöl S	1,1	0,6	0,4	0,3	0,2	0,2
	Heizöl EL	0,2	0,3	0,2	0,7	1,2	0,7
	Erdgas und andere Gase	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,5
	sonstige fossile Brennstoffe	0,5	0,4	0,1	0,1	1,4	0,0
Ersatzbrennstoffe		51,5	53,7	57,7	57,3	56,6	58,6
<b>Gesamt</b>		<b>88,0</b>	<b>88,1</b>	<b>94,4</b>	<b>93,9</b>	<b>90,4</b>	<b>92,5</b>
Anteil fossile Brennstoffe in %		41,5	39,1	38,9	39,0	37,4	36,7
Anteil Ersatzbrennstoffe in %		58,5	61,0	61,1	61,0	62,6	63,4

Quelle: Eigene Zusammenstellung auf Basis der Daten in VDZ 2014a und 2015a

(207 Mio. t) sowie Kalk-, Mergel- und Dolomitsteine (65,6 Mio. t) gleichzeitig die drei relevantesten mineralischen Rohstoffkategorien insgesamt. In einer detaillierten Aufschlüsselung der Verwendung mineralischer Primärrohstoffe im Jahr 2010 kommt eine Studie von SST/DIW (2013) zu dem Ergebnis, dass von der Produktionsmenge an Sand und Kies (229 Mio. t im Jahr 2010) ca. 44,8 % für die Betonherstellung genutzt wurden. Von den produzierten Mengen an gebrochenen Natursteinen (215 Mio. t) gingen demnach 14,4 % in die Betonherstellung und von den 60 Mio. t abgebautem Kalkstein wurden 37,5 Mio. t für die Zementherstellung verwendet.

Werden jene Anteile für Sand/Kies sowie gebrochene Natursteine auf die BGR-Produktionszahlen des Jahres 2013 übertragen, wären demnach für die Produktion von Beton neben den 37,2 Mio. t Kalkstein (plus weiterer 3,8 Mio. t mineralischer Primärrohstoffe, wie Ton oder Ölschiefer für die vorgelagerte Zementherstellung zusätzlich weitere 136 Mio. t an Sand, Kies und gebrochenem Naturstein notwendig gewesen. Nach den Zahlen des Bundesverbandes Mineralische Rohstoffe e.V. veröffentlichte die BGR (2014) eine weitere Statistik über die Verteilung der Produktionsmenge an Sand und Kies nach Verwendungszweck. Demnach wurden im Jahr 2013 von insgesamt 237,7 Mio. t inländisch abgebautem Sand und Kies rund 116,4 Mio. t als Zuschlagsstoffe für Ortbeton und Betonfertigteile verwendet. Unter Berücksichtigung der nicht vollständig identischen Bemessungsgrundlagen liegen die verschiedenen Vorgehensweisen zur Abschät-

zung des Rohstoffeinsatzes für die Betonherstellung insgesamt in sehr ähnlichen Größenordnungen und sind jeweils schlüssig.

Danach dürfte im Jahr 2014 bei einer gegenüber 2013 gestiegenen Produktionsmenge an Ortbeton (von 49,5 Mio. m<sup>3</sup> auf 50,8 Mio. m<sup>3</sup>) der **Rohstoffeinsatz für die Betonherstellung** in Deutschland in einer Größenordnung von 180 bis 190 Mio. t gelegen haben: neben 50 Mio. t für die Zementherstellung waren das schätzungsweise rund 130 bis 140 Mio. t weitere mineralische Rohstoffe in Form von Zuschlagstoffen für die Betonproduktion.

### 1.3 Brennstoffeinsatz

Neben dem Einsatz von Primär- und Sekundärrohstoffen für die Herstellung von Zement und Beton benötigt die Zementindustrie auch große Mengen an Brennstoffen, vor allem zur Herstellung des Portlandzementklinkers. Allerdings spielen fossile Brennstoffe, die dem Gesamtrohstoffbedarf hinzugerechnet werden müssen, bei der Zementherstellung in Deutschland nur noch eine untergeordnete Rolle.

So wird der **thermische Energiebedarf** überwiegend (63,4 % in 2014) durch Sekundärbrennstoffe gedeckt, der Anteil fossiler Energieträger liegt demnach bei etwa 36,6 %. Im Jahr 2014 wurden Brennstoffe mit einem thermischen Energiegehalt von 92,5 GJ eingesetzt (Tabelle 2). Der Anteil der fossilen Brennstoffe ging im betrachteten Zeitraum kontinuierlich von 74,3 % im Jahr 2000 auf aktuell 36,6 % zurück. Diese wurden zunehmend durch Sekundärbrennstoffe wie Altrei-

fen, Altöle, Gewerbe- und Siedlungsabfälle oder Altholz ersetzt.

Die Angaben zum thermischen Energieeinsatz der fossilen Brennstoffe werden in physische Mengeneinheiten umgerechnet, um sie zu dem nichtenergetischen Rohstoffeinsatz in Beziehung setzen zu können. Danach wurden in der deutschen Zementindustrie im Jahre 2014 neben den 42,1 Mio. t primären Rohstoffen zusätzlich ca. 2,6 Mio. t fossile Brennstoffe zur Herstellung von Zement eingesetzt (Tab. 3).

Auch in der Betonherstellung werden fossile Brennstoffe eingesetzt. Allerdings in deutlich geringerem Umfang als in der Zementherstellung. Laut den Zahlen „Erhebung über die Energieverwendung der Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden“ des Statistischen Bundesamtes setzten die Wirtschaftszweige 23.63 (Herstellung von Frischbeton [Transportbeton]) und 23.64 (Herstellung von Mörtel und anderem Beton [Trockenbeton]) im Jahr 2013 leichtes Heizöl und Erdgas im Umfang von zusammen 1,4 Mio. GJ ein. Umgerechnet entspricht dies einer Menge von 13.000 t leichtem Heizöl sowie 21.000 t Erd- bzw. Flüssiggas.

### 1.4 Flächennutzung

Die deutsche Zementindustrie fördert den Großteil ihres Primärrohstoffbedarfs selbst. Die Mehrzahl der Zementwerke in Deutschland ist nicht zuletzt aus ökologischen und ökonomischen Gründen direkt bei den entsprechenden Abbaustätten von

**Tabelle 3** Fossiler Brennstoffeinsatz bei der Zementherstellung in Deutschland

Brennstoff	Umrechnungsfaktor GJ/t	2009	2010	2011	2012	2013	2014
		in 1.000 Tonnen					
Steinkohle	30,1	338,8	299,0	332,2	325,5	259,1	295,7
Braunkohle	9,0	2.212,9	2.290,3	2.622,3	2.467,4	2.179,7	2.157,6
Petrolkoks	31,5	139,6	104,7	66,6	101,5	101,5	130,1
Heizöl S	40,3	27,3	14,9	9,9	7,4	5,0	5,0
Heizöl EL	42,8	4,7	7,0	4,7	16,3	28,0	16,3
Erdgas und andere Gase	40,4	2,6	2,6	5,1	5,1	7,7	12,8
<b>Gesamt</b>		<b>2.725,8</b>	<b>2.718,5</b>	<b>3.040,8</b>	<b>2.923,4</b>	<b>2.581,0</b>	<b>2.617,4</b>

Quelle: Eigene Zusammenstellung, ohne sonstige fossile Brennstoffe. Umrechnungsfaktoren für den Heizwert aus BMWi (2015), Erdgas: eigene Berechnung aus Daten Ritthoff et al. 2002

**Tabelle 4** Flächenäquivalente der jährlich neuen Abgrabungen durch oberflächennahe Rohstoffgewinnung in 2013

	Material	Tonnage	Schüttdichte	durch. Abbau- mächtigkeit	Flächen- äquivalent	Flächen- äquivalent
		in t	in t/m <sup>3</sup>	in m	in m <sup>2</sup>	in km <sup>2</sup>
Baurohstoffe	Bausand, Baukies etc.	236.000.000	1,8	15	8.444.444	8,44
	Quarzsand	9.700.000	1,8	15	359.259	0,36
	Gebrochene Natursteine	207.000.000	2,6	25	3.184.615	3,18
	Kalk- und Dolomitsteine	18.800.000	2,6	25	289.231	0,29
	Kalkstein für Zement	37.200.000	2,6	25	572.308	0,57
	Spezialtone	6.300.000	2,2	10	286.364	0,29
	Rohkaolin	4.300.000	2,2	10	194.455	0,20
	Gips- und Anhydritstein	1.778.000	2,0	10	88.900	0,09
	Bims	353.000	0,3	10	117.667	0,12
	Naturwerkstein	505.000	2,6	5	38.844	0,04
	Betonite	359.000	2,6	20	6.904	0,01
	Kieselerde	51.000	2,6	20	981	0,00
Energierohstoffe	Braunkohle, Rheinland	98.317.000	1,3	35	2.160.813	2,02
	Braunkohle, Lausitz	63.600.000	1,3	11	4.447.552	4,45
	Braunkohle, Mitteldeutschland	19.584.000	1,3	11	1.369.510	1,37
	Braunkohle, Niedersachsen	1.196.000	1,3	20	46.000	0,05
	Torf	6.793.000		2	3.396.500	3,40
	<b>Summe</b>	<b>711.836.000</b>			<b>25.004.347</b>	<b>25,15</b>

Quelle: Eigene Zusammenstellung auf Basis von BGR 2014, VDZ 2014a

Kalkstein oder Mergel angesiedelt, so dass der wichtigste Rohstoff direkt vor Ort zu Klinker und Zement verarbeitet werden kann. Die Zementindustrie ist dadurch nicht nur durch einen vergleichsweise hohen Material- und Energieeinsatz, sondern auch durch einen nennenswerten Flächenbedarf geprägt. Zwar liegen keine aktuellen Erhebungszahlen über die Flächenbelegung der deutschen Zementindustrie vor, doch lässt sich die Größenord-

nung abschätzen. Die letzte verfügbare Erhebung der **Abbaustätten** der Zementindustrie wurde von Tränkle/Röhl (2001) für das Jahr 2000 durchgeführt. Dabei wurden 86 Abbaustätten der deutschen Zementindustrie ermittelt, davon 67 in Betrieb befindliche und 19 stillgelegte. Bei stichprobenartigen Interviews mit drei deutschen Zementherstellern konnte die Datengrundlage aus Tränkle/Röhl im Grundsatz bestätigt werden. 49 der 67 damals in Betrieb befindlichen Abbaustätten (73 %) hatten im Jahr 2000 eine Größe zwischen 25 und 150 ha, wobei sich diese Zahl auf die insgesamt genehmigten Abbauf Flächen und nicht auf die tatsächlichen Betriebsflächen

bezog. Auch diese Größenordnungen konnten durch die geführten Interviews bestätigt werden.

Die Betriebsfläche<sup>5</sup> aller 67 sich in Betrieb befindlichen Abbaustätten wurde mit 2.461 ha angegeben. Die genehmigten Abbauf Flächen sind dagegen mit einer Größe von 5.618 ha mehr als doppelt so groß. Somit wurden im Jahr 2000 also lediglich 43 % der genehmigten Abbauf Flächen auch wirklich für den Abbau genutzt. Zusätzlich zu diesen schon genehmigten Flächen schließen sich weitere, noch nicht genehmigte Erweiterungsflächen von 3.833 ha an, die zusammen mit den schon genehmigten Flächen die

<sup>5</sup> Die Betriebsfläche entspricht der sogenannten verritzten Fläche, d.h. derjenigen Fläche, die tatsächlich zum Abbau der Rohstoffe genutzt wird.



nutzbaren Lagerflächen<sup>6</sup> darstellen. An diesem Flächenbedarf der deutschen Zementindustrie dürfte sich in den letzten Jahren seit der Kompletterhebung von Tränkle/Röhl wenig verändert haben, wenn die Ergebnisse der Interviews als Maßstab genommen werden. Zum Vergleich: Die gesamte Abgrabungsfläche zur Gewinnung oberflächennaher Rohstoffe betrug im Jahr 2013 in Deutschland 161.800 ha (Destatis 2014).

Die jährlich neu hinzukommende Flächeninanspruchnahme (ohne Berücksichtigung rekultivierter Flächen) durch die Gewinnung oberflächennaher Rohstoffe erfolgt über eine Umrechnung der abgebauten Mengen an Rohstoffen in entsprechende Flächenäquivalente (BGR 2014). Dabei wird die jährlich abgebaute Menge über einen Schüttdichtefaktor in eine Volumenangabe umgerechnet, die zusammen mit der durchschnittlichen Abbaumächtigkeit der einzelnen Rohstoffe in Meter eine Fläche in Quadratmetern bzw. Quadratkilometern ergibt. Der Flächenbedarf für den Abbau von Kalkstein für die deutsche Zementindustrie in Deutschland im Jahr 2013 betrug entsprechend der Rechenmethodik der BGR somit 57 ha, was in etwa der Fläche von 80 Fußballfeldern entspricht.

Tabelle 4 veranschaulicht, dass für die Gewinnung des Kalksteins für die Zementherstellung nur rund 7 % der Fläche benötigt wird, die bei der Sand- und Kiesgewinnung abgegraben wird. Laut der genannten Studie von SST/DIW (2013) werden 44,8 % des abgebauten Sandes und Kieses und 14,4 % der gebrochenen Natursteine für die Betonherstellung eingesetzt. Für die Gewinnung der Zuschlagsstoffe für Beton werden folglich mehr natürliche Flächen beansprucht als für den zentralen Bestandteil Zement allein. Legt man die prozentualen Anteile der Betonausgangsstoffe auf die Flächennutzung um und summiert diese mit dem Flächenbedarf der deutschen Zementindustrie, ergibt dies einen jährlichen Flächenbedarf für den Abbau von Primärrohstoffen der Wertschöpfungskette von Zement und Beton von etwa 481 ha (davon 424 ha für Kies und Sand als Betonzuschlagstoff). Dies entspricht einem Anteil von knapp 20 % der im Jahr 2013 neu hinzugekommenen Flächeninanspruchnahme für den Abbau oberflächennaher Rohstoffe.

Wird auch der Braunkohleverbrauch der Zementherstellung in der Flächenberechnung berücksichtigt, erhöht sich der Flächenbedarf der Wertschöpfungskette von Zement und Beton leicht. Bei einer angenommenen durchschnittlichen Abbaumächtigkeit von 24 m (gewichteter Mittelwert der Abbaumächtigkeit der vier Braunkohlegebiete in Tabelle 4), ergibt die Verbrennung von etwas über 2,2 Mio. t Braunkohle in der deutschen Zementindustrie einen zusätzlichen Flächenbedarf von 7 ha. Bezogen auf die Wertschöpfungskette von Zement und Beton erhöht sich der jährliche Flächenbedarf damit geringfügig auf 488 ha. Der rechnerische Flächenbedarf der deutschen Zementindustrie von 57 ha im Jahr 2013 (für den Abbau von Kalkstein) steigt durch den Einsatz von Braunkohle in der Produktion entsprechend auf etwa 64 ha. Während die für die Kalksteingewinnung benötigte Fläche im Wesentlichen von den geologischen Gegebenheiten abhängt, kann durch die Wahl des Energieträgers neben den Treibhausgasemissionen auch in geringem Maße die Flächenbeanspruchung für die Brennstoffversorgung bei der Zementherstellung beeinflusst werden.

### 1.5 Nachnutzung stillgelegter Abbaustätten

Die Flächen für den oberflächennahen Rohstoffabbau werden im Gegensatz zu anderen Flächennutzungsarten wie Verkehrs- und Siedlungsflächen nur zeitlich befristet genutzt. Trotzdem können sich nicht zuletzt infolge der tiefgreifenden Eingriffe in die Landschaft durch die Abbautätigkeiten Nutzungskonflikte mit dem Grundwasserschutz, dem Natur- und Landschaftsschutz sowie zumindest temporär mit der Land- und Forstwirtschaft ergeben. Diese müssen jeweils in Einzelfalluntersuchungen bewertet und gelöst werden. Gleichzeitig werden über Rekultivierungs- bzw. Renaturierungsmaßnahmen die Folgen dieses Eingriffs bereits während des Rohstoffabbaus sowie nach der Stilllegung möglichst weitgehend wieder behoben oder zumindest kompensiert. Diese Maßnahmen müssen schon in den Genehmigungsunterlagen für eine Erweiterung oder Neueröffnung von Abbaustätten in Form von Nachnutzungsplänen ausgewiesen werden.

Die vielfältigen Projekte, die die deutschen Zementhersteller mit unter-

schiedlichen Stakeholdern seit vielen Jahren durchführen und initiieren, spiegeln die Bedeutung der unterschiedlichen Nutzungskonflikte, aber auch das gewachsene Problembewusstsein der deutschen Zementindustrie wider. Im Ergebnis eines dieser Projekte wurde in Tränkle/Röhl (2001) mittels einer Befragung aller Unternehmen der deutschen Zementindustrie u.a. die Art der **Folgenutzung** der stillgelegten Abbaustätten abgefragt. Demnach wurde die Hälfte der stillgelegten Abbaustätten renaturiert, gefolgt von Nachnutzungen als landwirtschaftliche Flächen (15,4 %), forstwirtschaftliche Flächen (14,3 %) und als Deponieflächen (13,3 %). Im sich anschließenden zweiten Projektteil wurde in einer umfangreichen Literaturstudie die Bedeutung von stillgelegten und aktiven Abbaustätten aus naturschutzfachlicher Sicht ausgewertet (Tränkle et al. 2003). Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass gerade aus der Perspektive der Artenvielfalt Abbaustätten von Kalkstein von großer Bedeutung sind. So ist die Artenvielfalt in den Abbaustätten der Zementindustrie häufig höher als in deren Umfeld.

Die hohe **Biodiversität** in sowohl aktiven wie aufgelassenen<sup>7</sup> Abbaustätten ergibt sich aus der 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 extremen Standortbedingungen, die Primärlebensräume für sehr spezialisierte Arten und Lebensgemeinschaften darstellen. Steilwände in Steinbrüchen bilden z. B. häufig geeignete Biotope für Felsenbrüter. Von den Uhus, die in Hessen in Steinbrüchen leben, wurde jeweils in etwa die Hälfte in aktiven und nicht aktiven Steinbrüchen gefunden (Pietsch/Hormann 2012). Das Hessische Ministerium für Umwelt, länd-

<sup>6</sup> „Als ‚Nutzbare Lagerfläche‘ wurde nur der Teil der Lagerstätte interpretiert, der aufgrund geologischer Untersuchungen als abbauwürdig kartiert und nicht durch andere wichtige Formen der Flächennutzung überplant ist, d. h. tatsächlich abgebaut werden kann. (...) Von Ausnahmen abgesehen ergab die Summe der genehmigten Flächen und der noch nicht genehmigten Erweiterungsflächen die nutzbare Lagerstätte“ (Tränkle/Roth 2001, 13).

<sup>7</sup> Aufgelassene Steinbrüche sind Steinbrüche, die nach der Stilllegung nicht wieder verfüllt oder aktiv rekultiviert werden, sondern sich selbst überlassen werden und aufgrund ihrer sehr heterogenen Geländemorphologie eine hohe Habitatvielfalt auf engem Raum aufweisen.

lichen Raum und Verbraucherschutz schätzt sogar, dass 90 % der hessischen Uhus in aktiven Steinbrüchen leben und sich auch von der dortigen Lärmbelastung nicht negativ beeinflussen lassen (HMULV 2007).

Im Projekt „Nachhaltigkeitsindikatoren für ein integriertes Rohstoff- und Naturschutzmanagement“ wurden im Rahmen der Initiative Nachhaltigkeit in der deutschen Zementindustrie am Beispiel eines Zementwerkes in Deutschland entsprechende Indikatoren zur Bewertung der Biodiversität von Abbaustätten und Wirksamkeit von Naturschutzmaßnahmen, die vor, während und nach dem Abbau durchgeführt werden, entwickelt und erprobt. Auf der Grundlage der in diesem Projekt getätigten Erfahrungen werden diese Indikatoren mittlerweile in einer ganzen Reihe von Abbaustätten des beteiligten Unternehmens verwendet (Rademacher/Tränkle 2008).

### 1.6 Zwischenergebnis

Im Jahr 2014 wurden in Deutschland ca. 32,1 Mio. t Zement produziert. Zur Herstellung dieser Produktionsmenge hat die deutsche Zementindustrie

50,1 Mio. t Primär- und Sekundärrohstoffe eingesetzt – davon allein 8 Mio. t Sekundärrohstoffe zur Deckung von 16 % des Gesamtrohstoffbedarfs. Der damit hergestellte Zement wird im Wesentlichen für Ortbeton oder für Betonfertigteile verwendet. Rechnet man die für die Zuschlagstoffe benötigten Mengen an Primärrohstoffen hinzu, liegt der Rohstoffeinsatz für die Betonherstellung in Deutschland in einer Größenordnung von 180 bis 190 Mio. t (ca. 50 Mio. t für die Zementherstellung und schätzungsweise rund 130 bis 150 Mio. t als Zuschlagstoff für die Betonherstellung).

Neben dem Einsatz von Primär- und Sekundärrohstoffen benötigt die Zementindustrie zur Herstellung des hydraulischen Bindemittels auch große Mengen an Brennstoffen. Fossile Brennstoffe spielen dabei heutzutage eine untergeordnete Rolle. So wird der thermische Energiebedarf überwiegend durch Sekundärbrennstoffe (2014: 63,4 %) gedeckt.

Hieraus ergibt sich ein jährlicher Flächenbedarf der Wertschöpfungskette von Zement und Beton von etwa 481 ha. Dies entspricht einem Anteil von

knapp 20 % der im Jahr 2013 neu hinzugekommenen Flächeninanspruchnahme für den Abbau oberflächennaher Rohstoffe. Der rechnerische Flächenbedarf der deutschen Zementindustrie beträgt 57 ha im Jahr 2013 (für den Abbau von Kalkstein). Wird auch der Braunkohleverbrauch der Zementherstellung in der Flächenberechnung berücksichtigt, erhöht sich der Flächenbedarf durch die Verbrennung von etwas über 2,2 Mio. t Braunkohle in der deutschen Zementindustrie um 7 ha. Der Großteil der Flächeninanspruchnahme (424 ha) entfällt auf den Abbau von Kies und Sand.

Die von der Zement- und Betonindustrie beanspruchten Flächen werden nur zeitlich befristet genutzt. Im Anschluss an die Abbautätigkeit und auch währenddessen werden diese zumeist renaturiert, rekultiviert oder in wenigen Fällen als Deponieraum genutzt. Da die Renaturierung von Steinbrüchen eine herausragende Rolle einnimmt, sind die Abbaustätten hinsichtlich der Artenvielfalt von großer Bedeutung. So ist die Biodiversität in den Abgrabungsregionen der deutschen Zementindustrie häufig höher als in dessen Umfeld.



## 2 Rohstoffproduktivität – Definition und Messung

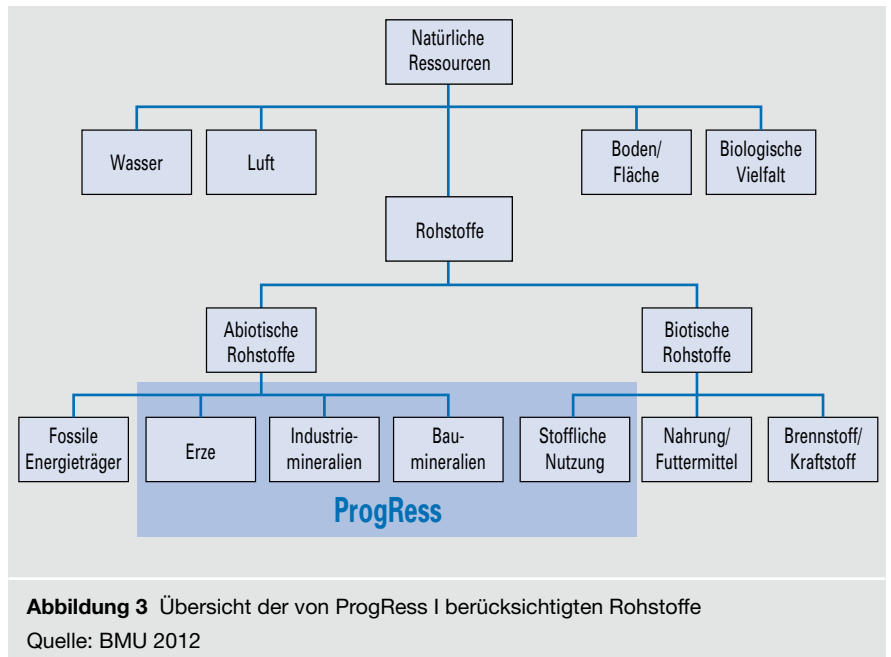
Kapitel 2 beschreibt die Grenzen und Potenziale zur Steigerung der Rohstoffproduktivität entlang der Wertschöpfungskette von Zement und Beton. Dazu wird in Kapitel 2.1 zunächst skizziert, wie Rohstoffproduktivität definiert und gemessen werden kann. Kapitel 2.2 beschreibt dann exemplarisch, welche technologisch-organisatorischen Maßnahmen zur Steigerung der Rohstoffproduktivität hierzulande verfolgt werden können.

### 2.1 Definition von Rohstoffproduktivität

Zu den Ressourcen wirtschaftlichen Handelns gehört neben Kapital und Arbeit auch der Aufwand an natürlichen Ressourcen. Während der effiziente Umgang mit ersteren durch die gängigen Managementpraktiken seit Langem etabliert ist, besteht beim Einsatz von natürlichen Ressourcen Nachholbedarf, um einen sparsamen Einsatz mit möglichst hohem Nutzen zu verbinden.

**Natürliche Ressourcen** werden unterschiedlich weit definiert. Nach einer umfassenden Definition (UBA 2012), die auch im Deutschen Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes I; BMU 2012) Verwendung findet, zählen dazu Rohstoffe, Wasser, Luft, Boden, Fläche und die biologische Vielfalt (Abb. 3). Der Entwurf von ProgRes II (s. 4.2; BMUB 2015) betrachtet Boden und Fläche separat und zählt explizit auch strömende Ressourcen (z. B. Solarenergie und Wind) hinzu.

Die der Natur entnommenen Rohstoffe werden auch Primärrohstoffe genannt im Unterschied zu Sekundärrohstoffen, die entweder als industrielle Nebenprodukte anfallen oder aus der Abfallverwertung stammen. Natürliche Rohstoffe werden in abiotische und biotische Materialien unterteilt. Abiotische Rohstoffe sind mineralischen Ursprungs, zu ihnen gehören fossile Energieträger (z.B. Kohle), Erze (z.B. Eisenerz), Industriemineralien (z.B. Kalkstein) und Baumineralien (z. B. Sand und Kies). Biotische Rohstoffe umfassen „alle natürlich vorkommenden Stoffe tierischer oder pflanzlicher Herkunft“ (Destatis 2015). Dazu zählen beispielsweise Nahrungs- und Futtermittel sowie Brennstoffe.



**Abbildung 3** Übersicht der von ProgRes I berücksichtigten Rohstoffe  
Quelle: BMU 2012

In dieser Studie wird auf den Einsatz von natürlichen Rohstoffen fokussiert. Dies macht insofern Sinn, als deren Einsatz den Beginn der von Produktion, Konsum, Recycling und sonstiger Verwertung induzierten Stoffströme durch das Wirtschaftssystem bis zur finalen Entsorgung bestimmt. Der Rohstoffeinsatz stellt damit zum einen die Versorgung mit Produkten sowie Dienstleistungen sicher und bestimmt zum anderen die damit lebenszyklusweit verbundenen Umweltwirkungen.

### 2.2 Messung von Rohstoffproduktivität

#### 2.2.1 Einführung und mögliche Indikatoren

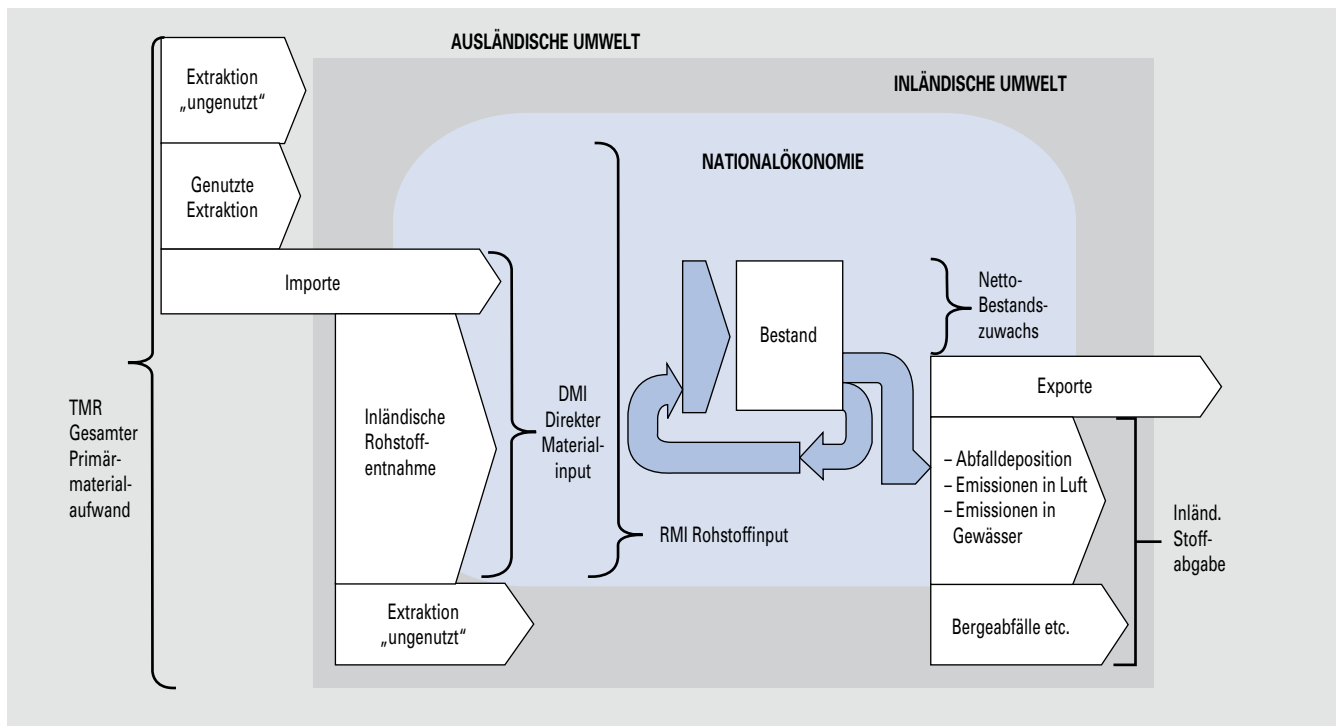
Der Einsatz von Rohstoffen und – weiter gefasst – allen stofflichen Ressourcen soll aus dem Blickwinkel der Ressourceneffizienz möglichst produktiv erfolgen. Um Fortschritte in diese Richtung messen zu können, muss also das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand bzw. von ökonomischem Output zu stofflichem Input bestimmt werden. Als ökonomische Größen werden hierzu auf gesamtwirtschaftlicher und sektoraler Ebene meist das Bruttoinlandsprodukt (BIP) und die Bruttowertschöpfung herangezogen, auf Firmenebene kann hierzu beispielsweise der Umsatz dienen. Diese stehen üblicherweise im Zähler der Produktivitätskennzahlen.

Welcher Indikator im Nenner für den stofflichen Input herangezogen wird,

hängt von der genaueren Fragestellung bzw. Systemperspektive ab. Will eine Firma oder eine Volkswirtschaft ihren Materialeinsatz produktiver gestalten, so wird sie die direkten Bezüge und eventuelle direkte Entnahmen aus der Umwelt betrachten. Die Bezüge oder materiellen Vorleistungen sind jedoch vielfach bereits verarbeitete Produkte, die ihrerseits woanders als Rohstoffe der Umwelt entnommen worden sind. Eine umfassende Systemperspektive muss diese „lebenszyklusweit“ oder „von der Wiege bis zur Bahre“ („cradle-to-grave“) betrachten, d.h. die bezogenen bzw. importierten Vorleistungen müssen entlang ihrer Herstellungsprozesskette bis zur ursprünglichen Entnahme von Rohstoffen aus der Umwelt zurückverfolgt werden.

Als Input-Indikatoren kommen drei sich jeweils erweiternde Kategorien in Betracht: (a) der direkte Materialeinsatz (DMI), (b) der Rohstoffeinsatz (RMI) und (c) der gesamte stoffliche Ressourcenaufwand (TMR) (Eurostat 2001, 2012, OECD 2008, 2015).

Je nachdem, ob Indikatoren des Material-, Rohstoff- oder (stofflichen) Ressourcenaufwands im Nenner der Produktivitätszahl stehen, erhält man **Indikatoren der Materialproduktivität, Rohstoffproduktivität bzw. Ressourcenproduktivität**. Häufig geraten diese Begrifflichkeiten durcheinander<sup>8</sup>. Um die Input-Indikatoren besser zu verstehen, empfiehlt sich ein Blick auf den gesamten sozio-industriellen Stoffwechsel der Wirtschaft (Abb. 4).



**Abbildung 4** Schema und Indikatoren des sozio-industriellen Metabolismus

Quelle: nach Bringezu/Schütz 2014

Die folgenden Ausführungen beziehen sich zunächst auf die volkswirtschaftliche Ebene, bevor abschließend auf die Produktebene eingegangen wird.

Abbildung 4 zeigt schematisch das Stoffflusssystem einer Volkswirtschaft: Stoffliche Inputs bestimmen den Durchsatz und die Veränderungen des Materialbestands. Die Inputs werden zu einem späteren Zeitpunkt zu Emissionen und Abfällen und bestimmen mit ihrem Umfang die Größenordnung der damit verbundenen Umweltbelastungen. Eine Verminderung des Inputs in dieses System entlastet daher

die ökologischen Systeme nicht nur durch verringerte Ressourcenentnahme, sondern auch durch Vermeidung von Abfällen und Emissionen. Der Input dieses Stoffwechselsystems besteht aus unterschiedlichen Komponenten, die in Form der methodisch kohärenten Indikatoren DMI, RMI und TMR beschrieben werden. Diese Indikatoren beschreiben die Basis der gesamten Produktion einer Wirtschaft für die Inlandsnachfrage und die Exporte. Möchte man wissen, welcher materielle Aufwand allein für den Inlandsverbrauch von Produkten und Dienstleistungen betrieben wird, so werden

von den Indikatoren DMI, RMI und TMR jeweils die Exporte subtrahiert (inkl. der notwendigen rohstofflichen Vorleistungen bei den Indikatoren RMI und TMR). So erhält man die Konsumindikatoren DMC, RMC und TMC.

Die Indikatoren DMI, RMI und TMR (und ihre Entsprechungen als Konsum-

<sup>8</sup> Der Begriff „Ressourcenproduktivität“ umfasst in den meisten Publikationen und Statistiken nur die Produktivität des Einsatzes stofflicher Ressourcen, obwohl natürliche Ressourcen neben (Primär-)Materialien auch Wasser und Land umfassen (vgl. Abb. 4), die jedoch häufig in separaten Indikatoren berücksichtigt werden.

### Definition gängiger Indikatoren zur Messung der Rohstoffproduktivität

Der *direkte Materialeinsatz* (engl. Direct Material Input, DMI) umfasst die Menge an Materialien, die in Form von Produkten oder Rohstoffen von einer Firma oder einer Branche bezogen oder von einer Volkswirtschaft entweder als Rohstoff auf dem eigenen Territorium gewonnen oder als Import von Rohstoffen, Halb- und Fertigwaren bezogen wird.

Der *Rohstoffeinsatz* (engl. Raw Material Input, RMI) basiert auf einer Lebenszyklusperspektive, umfasst die Vorketten der eingesetzten Materialien und aggregiert sämtliche

Vorleistungen in Form von primären Rohstoffen. Die Vorleistungen werden – falls es sich nicht schon um Rohstoffe handelt – entsprechend in ihre „Rohstoffäquivalente“ umgerechnet. „Rohstoffe“ sind per Definition Produkte mit einem positiven Marktwert, sie entsprechen der Produktion des primären Sektors, kommen also aus Bergbau, Steine- und Erden-Gewinnung oder Land-, Forstwirtschaft und Fischerei. Auf der Ebene von Produkten wird der lebenszyklusweite Rohstoffeinsatz auch „Kumulierter Rohstoffaufwand“ genannt.

Der *gesamte stoffliche Ressourcenaufwand* (auch „Globaler Materialaufwand“ genannt von engl. Total Material Requirement, TMR) umfasst neben dem Rohstoffeinsatz auch die nicht verwertete Extraktion bei der Rohstoffgewinnung oder der Infrastrukturerstellung. Damit wird der kumulierte *Primärmaterialaufwand* erfasst. Er stellt den umfassendsten Indikator der stofflichen Ressourcenbasis einer Wirtschaft dar (neben dem Wasserverbrauch und der Nutzung der Atmosphäre für die Aufnahme von Treibhausgasen).

**Tabelle 5** Übersicht der D-, R- und T-Indikatoren des Materialinputs

	Produktionsorientiert*	Konsumorientiert**
Direkter Materialeinsatz D-Indikatoren	DMI (Direkter Materialinput)	DMC (Direkter Materialverbrauch)
Rohstoffe („Raw materials“) R-Indikatoren	RMI (Rohstoffaufwand)	RMC (Rohstoffverbrauch)
Primärmaterialien („Total Material Flows“) T-Indikatoren	TMR (Gesamter Primärmaterialaufwand)	TMC (Gesamter Primärmaterialverbrauch)

\* Produktionsbasis = Inländische Extraktion + Importe (bei R- und T-Indikatoren inkl. Vorketten)

\*\* Konsumbasis = Produktionsbasis – Exporte (bei R- und T-Indikatoren inkl. Vorketten)

Quelle: Eigene Darstellung

indikatoren) werden somit innerhalb eines konsistenten Methodenrahmens definiert, der mit der Sequenz dieser Indikatoren eine schrittweise Erweiterung der Betrachtung ermöglicht. Tabelle 5 gibt eine zusammenfassende Übersicht. Zur Abbildung des „Material Footprint“ werden entweder der RMC oder der TMC herangezogen (Wiedemann et al. 2013, Lettenmeier et al. 2014, Bringezu 2015). Die R- und T-Indikatoren legen jeweils eine lebenszyklusweite Perspektive an<sup>9</sup>.

Die **Datenbasis** zur Erweiterung von DMI und DMC (der D-Indikatoren) in Richtung der R- und T-Indikatoren wird von den statistischen Ämtern sowie Forschungsinstituten weltweit ständig verbessert. Die D-Indikatoren liegen für alle europäischen (Eurostat 2015) und OECD-Länder (OECD 2013) sowie verschiedene Entwicklungsländer vor. Die R-Indikatoren werden von Eurostat für die 28 Mitgliedsstaaten der EU als Ganzes veröffentlicht (Eurostat 2015, 2014). Das Statistische Bundesamt berichtet über die abiotische Rohstoffproduktivität (Buyny et al. 2009, DE-STATIS 2014). T-Indikatoren liegen für über 20 Länder weltweit vor (Übersicht in Bringezu/Schütz 2013)<sup>10</sup>.

Hinsichtlich der Frage, ob für die Rohstoff- oder Ressourcenproduktivität eher input- oder konsumbezogene stoffliche Indikatoren herangezogen werden sollen, gibt es unterschiedliche Auffassungen. Im Sinne von inputori-

entierten Indikatoren kann man argumentieren, dass auch der Aufwand für die Produktion der Exporte einbezogen werden sollte, denn dieser trägt auch zum BIP bei und sollte möglichst effizient gestaltet werden. Auf der anderen Seite bevorzugen Statistiker häufig konsumbezogene Indikatoren, da sie als solche direkt ohne Doppelzählungen aggregiert werden können. Eurostat ermittelt die „Ressourcenproduktivität“ als Verhältnis von Bruttoinlandsprodukt zu Direktem Materialverbrauch (BIP/DMC), diskutiert aber zunehmend die Notwendigkeit, stärker die globale Perspektive über die Nutzung der RMI- bzw. RMC-Indikatoren (Eurostat 2015b) zu beachten. Derzeit ist das BIP/DMC als Leitindikator in der Roadmap für ein ressourcenschonendes Europa benannt. Gleichzeitig hat die Europäische Plattform für Ressourceneffizienz, ein hochrangig besetztes Gremium, die Weiterentwicklung der Indikatorenbasis bereits vorweggenommen, indem die Aufforderung, die Rohstoffproduktivität von 2008 bis 2030 um mindestens 30 % zu erhöhen, auf BIP/RMC bezogen wird. Somit werden die Importe auf ihre jeweilige Rohstoffbasis zurückgeführt.

Die Erweiterung der Indikatorenbasis ist auch für Deutschland zu erwarten. In ProgRess I wurde bereits bemängelt, dass die Erfassungsbasis des bisher in der Nachhaltigkeitsstrategie verwendeten Indikators (dieser entspricht DMI minus Biomasse) zu eng bemessen ist, da die den Importen vorgelagerten Rohstoffaufwendungen nicht berücksichtigt werden (BMU 2012). Dieser Indikator ist somit nicht in der Lage, eine Substitution materialintensiver einheimischer Produktionsprozesse durch Importe adäquat abzubilden. Werden zunehmend Rohstoffe und rohstoffintensive Halb- und Fertigprodukte importiert statt inländisch extrahiert bzw. produziert, steigt

die Rohstoffproduktivität gemessen als BIP/DMI stärker als dies bei der Verwendung der Indikatoren RMI bzw. TMR der Fall wäre. Gleichzeitig sorgt der hohe Exportanteil Deutschlands, der zudem stark durch materialintensive Fertigprodukte geprägt ist, dafür, dass ohne die Berücksichtigung der für deutsche Exportgüter benötigten Materialien – bei einem konsumorientierten Indikator wie RMC – die Rohstoffproduktivität gemessen als BIP/RMC sogar stärker steigt als bei der Verwendung des DMI.

Aus diesen Gründen sieht ProgRess II vor, als zusätzlichen Indikator die Rohstoffproduktivität gemessen als (BIP + Wert der Importe)/RMI sowie auch den absoluten lebenszyklusweiten Rohstoffverbrauch RMC pro Person einzubeziehen (BMUB 2015).

Tabelle 6 zeigt exemplarisch, wie aus den vorliegenden Daten für die deutsche Volkswirtschaft die beschriebenen Produktivitätsindikatoren berechnet werden können. Im Zähler der Maßzahl steht als Outputgröße das Bruttoinlandsprodukt, im Nenner der jeweilige Input-Indikator. Über den abgebildeten Zeitraum (2000 bis 2012 bzw. 2011 für RMI und RMC) ergibt sich, unabhängig vom verwendeten Indikator, eine deutlich gestiegene Rohstoff- bzw. Ressourcenproduktivität.

Der direkte Materialeinsatz (DMI) ging von 2000 bis 2012 leicht zurück, während das Bruttoinlandsprodukt stark zulegte. Dementsprechend stieg die Materialproduktivität deutlich an. Geringer fällt der Anstieg der Rohstoff- und Ressourcenproduktivität aus. Je mehr vorgelagerte Aufwendungen berücksichtigt werden, umso geringer fällt der Produktivitätszuwachs aus, da die Menge der aufgewendeten Rohstoffe im Betrachtungszeitraum wuchs und der Umfang der insgesamt aufgewendeten Primärmaterialien hauptsächlich durch ressourcenintensive Importe noch stärker anstieg.

Damit wird deutlich, dass Indikatoren wie die Materialproduktivität mit Vorsicht zu interpretieren sind, da sie Verlagerungen ressourcenintensiver Prozesse ins Ausland nicht erfassen. Werden die indirekten Vorleistungen und die Gesamtentnahme von Material aus der natürlichen Umwelt einbezogen, so ergibt sich ein vollständigeres Bild.

<sup>9</sup> Wobei R-Indikatoren sich auf den ökonomischen Output des Primärsektors in physischen Einheiten beziehen, während T-Indikatoren den physischen Input erfassen.

<sup>10</sup> Infolge mangelnder Datenverfügbarkeit für umfassende Input-Indikatoren wie RMI und TMR werden die leichter zu bestimmenden Indikatoren auf Basis der direkten Materialflüsse quasi aushilfsweise zur Abbildung von „Ressourcenproduktivität“ herangezogen.

Tabelle 6 Material-, Rohstoff- und Ressourcenproduktivität der deutschen Volkswirtschaft

	2000	2008	2012	BIP (2000)	BIP (2012)	Material- produktivität BIP / Input (2000)	Material- produktivität BIP / Input (2012)	Änderung der Material- produktivität (2000 - 2012)
	Mio. Tonnen			in Mrd. Euro**		Euro / t	Euro / t	in %
Materialeinsatz (DMI)	1.726	1.689	1.678	1.935	2.867	1.121	1.709	52,4
Materialverbrauch (DMC)	1.438	1.304	1.304	1.935	2.867	1.346	2.199	63,4
	2000	2008	2011	BIP (2000)	BIP (2011*)	Rohstoff- produktivität BIP / Input (2000)	Rohstoff- produktivität BIP / Input (2011*)	Änderung der Rohstoff- produktivität (2000 - 2011*)
	Mio. Tonnen			in Mrd. Euro**		Euro / t	Euro / t	in %
Materialeinsatz in Roh- stoffäquivalenten (RMI)	2.646	2.748	2.774*	1.935	2.802*	731	1.010*	38,1*
Inländischer Materialver- brauch in Rohstoffäquiva- lenten (RMC)	1.509	1.318	1.286*	1.935	2.802*	1.282	2.179*	69,9*
	2000	2008	2012	BIP (2000)	BIP (2012)	Ressourcen- produktivität BIP / Input (2000)	Ressourcen- produktivität BIP / Input (2012)	Änderung der Ressourcen- produktivität (2000 - 2012)
	Mio. Tonnen			in Mrd. Euro**		Euro / t	Euro / t	in %
Gesamter Primärmaterial- aufwand (TMR)	5.526	7.028	7.853	1.935	2.867	350	365	4,26
Gesamter Primärmaterial- verbrauch (TMC)	3.712	3.810	4.177	1.935	2.867	521	686	31,8

Quellen:

DMI/DMC: Destatis: Verwertete inländische Rohstoffentnahme, Ein- und Ausfuhr von Gütern: Deutschland, Jahre, Verarbeitungsgrad und Rohstoffarten, Datenbank: GENESIS-Online Tabelle: 85131-0004

RMI: Destatis, <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltoekonomischeGesamtrechnungen/MaterialEnergiefluesse/Tabellen/ErstmaligesAufkommen.html>RMC: Destatis, <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltoekonomischeGesamtrechnungen/MaterialEnergiefluesse/Tabellen/InlaendischeVerwendung.html>

BIP: Destatis, VGR des Bundes - Bruttowertschöpfung, Bruttoinlandsprodukt (nominal/preisbereinigt), Datenbank: GENESIS-Online Tabelle: 81000-0001

TMR/TMC: Wuppertal Institut - eigene Datenbank

\*2011 letztes verfügbares Jahr für RMI und RMC

\*\* preisbereinigt, Kettenindex (2010=100)

Daran ändert sich grundsätzlich nichts, wenn anstelle von produktionsorientierten konsumorientierte Input-Indikatoren herangezogen werden. Da bei letzteren der Aufwand für die Exporte abgezogen wird, liegen die Produktivitätszahlen jeweils höher.

Wenn man an der Steigerung der Ressourcenproduktivität der gesamten Wirtschaft interessiert ist, die sowohl den inländischen Verbrauch wie die Exporte bedient, so sind die produktionsorientierten Werte ausschlaggebend. Hier fiel die Steigerung der Ressourcenproduktivität von 2000 bis 2012 mit weniger als 0,4 % jährlich sehr gering aus.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Daten von DESTATIS zu den Rohstoffäquivalenten als vorläufig anzusehen sind. Die bislang dort angewandte

Methodik rechnet den Einsatz von Sekundärrohstoffen in Primärrohstoffaufwand um. Diese Vorgehensweise ist weder konsistent mit den Methodenrichtlinien von Eurostat und OECD, noch würde ein solcher Indikator kreislaufwirtschaftliche Fortschritte anzeigen können. Denn selbst wenn die Verwendung rezyklierter Materialien sowie industrieller Nebenprodukte zunehmen würde, könnte die in der Praxis erzielte Ressourcenentlastung mit dieser Methode nicht dargestellt werden. Daher ist damit zu rechnen, dass das Statistische Bundesamt seine Berechnungsmethode ändern wird.

Welche Indikatoren zur Berechnung der **gesamtwirtschaftlichen Rohstoff- bzw. Ressourcenproduktivität** zur Anwendung kommen, wird in erster Linie von den Zielfragen bestimmt, die prioritär beantwortet werden sol-

len. Sollen vor allem die Umweltbelastungen durch den Umfang der einheimischen Rohstoffextraktion abgebildet werden, reicht eine Darstellung der inländischen Extraktion aus. Würden (firmen-)politische Strategien aber allein auf dieser Basis entwickelt werden, bestünde das Risiko, die einheimische Rohstoffextraktion lediglich durch eine Erhöhung der Importe zu substituieren, wodurch eine scheinbare Erhöhung der Ressourcenproduktivität vorgespiegelt würde. Daher empfiehlt es sich, von vorneherein die gesamte Produktionsbasis im Auge zu behalten und lebenszyklusweit umfassende Indikatoren der R- und T-Linien einzusetzen.

Alle Produktivitätsindikatoren sind im Grundsatz auch auf Wirtschaftssektoren und Industriezweige anwendbar. Unter Zuhilfenahme von

um Umweltparameter erweiterte Input-Output-Tabellen können die Materialflussindikatoren für Wirtschaftssektoren spezifisch abgebildet und mit der entsprechenden ökonomischen Kenngröße (im Normalfall die Bruttowertschöpfung des Sektors) in Verbindung gesetzt werden<sup>11</sup>. Dadurch können im Zeitverlauf Veränderungen der Rohstoffproduktivität in Folge von strukturellen Veränderungen, aber auch entsprechende „Hot Spots“ mit niedrigen Produktivitätskennzahlen identifiziert werden.

Es wird deutlich, dass die Entwicklung der Rohstoffproduktivität mit den vorliegenden Indikatoren und Datengrundlagen der amtlichen Statistik durchaus angemessen abgebildet werden kann. Will man Aussagen über die Nachhaltigkeit der Ressourcennutzung als Ganzes machen, so sind hierzu zusätzliche Indikatoren erforderlich.

**2.2.2 Anwendbarkeit der Indikatoren auf Firmen- und Produktebene**

Die auf gesamtwirtschaftlicher und sektoraler Ebene anwendbaren materialflussbezogenen D-, R- und T-Indikatoren sind in konsistenter Weise auch auf der Ebene von Firmen, technischen Anlagen und Produkten anwendbar. Auf der Produktebene entspricht die Vorgehensweise zur Ermittlung jener der Ökobilanzierung bzw. der Materialintensitätsanalyse.

Zur Ermittlung des **kumulierten Rohstoffaufwands für Produkte und Dienstleistungen** ist eine VDI-Richtlinie in Vorbereitung. Der Entwurf der Rahmenrichtlinie (VDI 4800 Blatt 1) wurde im Juli 2014 veröffentlicht, der Gründruck von VDI 4800 Blatt 2 zur Bestimmung des kumulierten Rohstoffaufwands soll noch in 2015 erfolgen. Der Entwurf von VDI 4800 Blatt 2 umfasst aktuell auch sehr umfangreiche Beschreibungen zur möglichen Bewertung der Kritikalität einzelner Stoffe zur Abschätzung des Risikos von Versorgungsengpässen und möglicher Vulnerabilität. Die Diskussion hierzu ist noch im Gange. Da die Versorgung mit Rohstoffen ökonomischen Zyklen folgt, dürfte die herkömmliche

**Tabelle 7** Bedeutsamste Rohstoffe in DMI, RMI und TMR: prozentuale Anteile am jeweiligen Gesamtindikator in absteigender Reihenfolge für EU-27 im Jahr 2008

	DMI		RMI		TMR
<b>SUMME</b>	<b>83%</b>	<b>SUMME</b>	<b>83%</b>	<b>SUMME</b>	<b>86%</b>
Sand und Kies	34%	Sand und Kies	29%	Braunkohle	19%
Rohöl, Kondensat und Flüssiggase	10%	Rohöl, Kondensat und Flüssiggase	9%	Sand und Kies	17%
Kalkstein und Gips	8%	Kalkstein und Gips	8%	Steinkohle	9%
Braunkohle	5%	Erdgas	5%	Rohöl, Kondensat und Flüssiggase	6%
Steinkohle	4%	Braunkohle	5%	Eisen	5%
Getreide	4%	Steinkohle	5%	Kalkstein und Gips	5%
Futterpflanzen	4%	Edelmetalle	4%	Kupfer	4%
Natursteine	3%	Getreide	3%	Andere fossile Produkte	3%
Erdgas	3%	Futterpflanzen	3%	Andere Produkte aus Metallen	3%
Holz	3%	Eisen	3%	Getreide	3%
Geweidete Biomasse	3%	Kupfer	3%	Zinn	2%
Eisen	3%	Natursteine	3%	Andere Produkte	2%
		Holz	3%	Holz	2%
				Futterpflanzen	2%
				Andere Produkte aus Biomasse	2%
				Natursteine	2%

Anmerkung: Die Summe weist lediglich den kumulativen Anteil der gelisteten Rohstoffe am Gesamtwert des jeweiligen Indikators auf. Addiert man den Anteil der nicht gelisteten Rohstoffe hinzu, der jeweils geringer ist als der des untersten der Liste, so ergeben sich 100 %.

Quelle: Bringezu/Schütz 2014

Kritikalitätsbewertung relativ schnell an Aktualität verlieren. Nach Ansicht der Autoren dieser Studie ist bei natürlichen Rohstoffen weniger eine Knappheit in ihrem Vorhandensein in der Erdkruste zu konstatieren als vielmehr ein immer schwieriger werdender Zugang.

Die Bestimmung des kumulierten Primärmaterialaufwandes (TMR) für Produkte und Dienstleistungen ist auf Basis des MIPS-Konzepts (Materialinput pro Serviceeinheit) möglich (Ritthoff et al. 2002). Dabei werden lebenszyklusweit alle natürlichen Materialien erfasst, die für die Herstellung, den Transport, die Nutzung und die Entsorgung eines Produktes notwendig sind. Die Kennzahl ist damit der Kehrwert einer Produktivitätskennzahl, da hier die Menge an Input gemessen wird, die zur Herstellung (zzgl. Nutzung und Entsorgung) eines Gutes notwendig ist. Für Endprodukte kann es zudem sinnvoll sein, eine Serviceeinheit zu definieren, die den Vergleich verschiedener Produktalternativen zur Erbringung dieses Services ermöglicht. Während für Zement und Beton die Materialintensität i.d.R. pro erzeugter Mengeneinheit bestimmt wird, wird für Produkte, die aus der

Wertschöpfungskette von Zement und Beton resultieren (Gebäude, Infrastrukturen), bei der Ermittlung der jeweiligen Materialintensität die Funktionalität (inkl. Dauerhaftigkeit) zugrunde gelegt.

Indikatoren des Umwelteinwirkungspotenzials stellen die Mengen an Primärrohstoffen bzw. Primärmaterialien dar, die der Umwelt jährlich entnommen werden. Will man zusätzlich spezifische Umweltwirkungen (wie Treibhausgaspotenzial, Versauerungspotenzial, Eutrophierungspotenzial) berücksichtigen, so können hierfür die bestehenden Instrumente der Ökobilanzierung (engl. LCA, Life Cycle Assessment) verwendet werden. Die künftige VDI-Richtlinie 4800 Blatt 3 soll dementsprechend Hilfestellung bei der Bewertung von Umweltwirkungen des Rohstoffeinsatzes geben.

**2.2.3 Relevanz der Indikatoren für die Zement- und Betonherstellung**

Listet man für die EU alle abiotischen und biotischen Ressourcenkategorien nach ihrer **mengenmäßigen Bedeutung** auf, so stehen Sand und Kies bei DMI und RMI an erster Stelle, nur beim

<sup>11</sup> Eine solche Analyse ist allerdings nur dann möglich, wenn die Input-Output-Tabellen tatsächlich in der gewünschten Feingliederung vorliegen und um die notwendigen Umweltparameter erweitert werden können.



umfassenderen TMR wird Sand und Kies von der Braunkohle übertroffen (Tabelle 7). Kalkstein und Gips (wobei der Anteil des letzteren von geringer Bedeutung ist) rangieren bei DMI und RMI an dritter Stelle, beim TMR an sechster.

Betrachtet man allein die Gruppe der nichtmetallischen Minerale, dann machen Sand und Kies sowie Kalkstein und Gips den Hauptanteil bei allen drei Input-Indikatoren aus (84 % beim DMI; 84 % beim RMI; 80 % beim TMR).

Unabhängig davon, welcher der drei Indikatoren letztlich für die regelmäßige Berichterstattung herangezogen wird, kann eine Effizienzsteigerung beim Einsatz von Sand und Kies potenziell einen großen Beitrag zur Steigerung der gesamtwirtschaftlichen Material-, Rohstoff- bzw. Ressourcenproduktivität leisten. Wie in 3 näher ausgeführt wird, bestehen dabei deutlich unterschiedliche technische Möglichkeiten. So können Sand und Kies als Hauptzuschlagsstoffe bei der Betonherstellung durch Recyclingmaterial ersetzt werden, während dies zumindest bei den hydraulisch wirksamen Bestandteilen des Zements nur in recht begrenztem Umfang möglich ist.

Da auch Recycling ressourcenaufwändig sein kann, bedeutet dies, dass zur Bestimmung von möglichen Einsparungen von Rohstoff- bzw. Ressour-

cenaufland wiederum lebenszyklusweite R- oder T-Indikatoren verwendet werden müssen. Nur so kann festgestellt werden, inwieweit eine erhöhte Effizienz beim Einsatz von Zement und Beton in der Bauindustrie und der verstärkte Einsatz von Recyclingmaterialien bei der Zement- und Betonherstellung zu Nettoentlastungen führt.

### 2.3 Zwischenergebnis

Die deutsche Zementindustrie produziert gegenüber anderen Wirtschaftssektoren vergleichsweise homogene Güter, deren rohstoffliche Zusammensetzung zu großen Teilen durch Normen festgelegt ist. Insgesamt ist die Differenzierung der Produkte und Rohmaterialien überschaubar. Als Grundstoffindustrie befindet sich die Zementherstellung in der Regel am Beginn vieler Prozessketten und die eigenen Vorleistungsverknüpfungen sind gering und gut nachzuvollziehen. Über den VDZ ist ein Großteil der Unternehmen der deutschen Zementindustrie organisiert (Stand: 2015). Sektorale Angaben sowohl über den ökonomischen Output als auch über den physischen Input liegen in hoher Qualität vor. Aus der Produktionsstatistik des Statistischen Bundesamtes können die Zahlen sowohl der Bruttowertschöpfung als auch des Bruttoproduktionswertes für den Wirtschaftszweig „Herstellung von Zement“ (WZ08-23.51) entnommen werden.

Aus dem vorliegenden Datenmaterial könnten unter bestimmten Voraussetzungen (vgl. Fußnote 13) Rohstoffproduktivitätskennzahlen für die im VDZ organisierten Unternehmen berechnet werden, die mit dem von Eurostat und künftig vermutlich auch vom Statistischen Bundesamt verwendeten Indikator (auf R-Indikatorenbasis) vergleichbar sind.

Des Weiteren kann der TMR der deutschen Zementproduktion bestimmt werden und mit dem deutschen sowie dem EU-Wert verglichen werden. In Relation zu den ökonomischen Indikatoren könnte so der spezifische Anteil der Branche an der Ressourcenproduktivität der gesamten Wirtschaft ermittelt werden und Branchenergebnisse könnten national und europaweit verglichen werden.

Um die Rohstoff- bzw. Ressourcenproduktivität der deutschen Zementindustrie, die sowohl für den heimischen wie auch den Exportmarkt produziert, zu bestimmen, erscheint es angebracht, die input-orientierten Indikatoren RMI und TMR abzubilden, da die konsumorientierten Indikatoren den Aufwand für die Exporte ausschließen. Die Indikatoren RMI und TMR sind zudem auch auf Firmen- und Produktebene anwendbar. So könnten der kumulierte Rohstoff- bzw. Primärmaterialaufwand jeweils in Tonnen pro Tonne hergestelltem Grundwerkstoff bestimmt und regelmäßig verglichen werden.

### 3 Potenziale zur Steigerung der Rohstoffproduktivität

Möglichkeiten zur Steigerung der Rohstoffproduktivität und Erhöhung der Versorgungssicherheit durchziehen alle Bereiche der Zementherstellung und -anwendung. Als Industrie mit hohen Energiekosten und relativ geringen Personalkosten wurden innerhalb der Zementindustrie auch bisher schon zahlreiche Maßnahmen ergriffen, um die Produktivität zu erhöhen und so Produktionskosten und Umwelteinwirkungen zu verringern. Im Rahmen dieser Studie soll übersichtlich ermittelt und an Beispielen dargestellt werden, welche weiteren Möglichkeiten zur Steigerung der Rohstoffproduktivität entlang der Wertschöpfungskette von Zement und Beton bestehen. Dabei muss Energieeffizienz hierbei auch als Teil der Rohstoffproduktivität betrachtet werden, da Energieträger notwendige Inputs für die Zementindustrie darstellen.

Grundlage für die Ermittlung von Potenzialen zur Steigerung der Rohstoffproduktivität waren zum einen Literaturrecherchen und zum anderen Experteninterviews mit Vertretern der deutschen Zementindustrie. Die Interviewpartner, die vom VDZ benannt wurden, spiegelten dabei die Struktur der Branche, gekennzeichnet durch eine Mischung aus internationalen Unternehmen und industriellem Mittelstand, sehr gut wider.

Die Literaturrecherche erfolgte hierbei in zwei Schritten. Eine kurze initiale Recherche war Basis für die Erstellung eines Interviewleitfadens, der in Abstimmung mit dem VDZ entworfen und den Interviewpartnern zur Vorbereitung des Gesprächs zur Verfügung gestellt wurde.

Die Schwerpunkte der Befragung lagen auf den Bereichen

- Primärrohstoffe
- Sekundärrohstoffe
- Zement/Zementarten
- Energie/Energieträger
- Anlagen
- Beton

Die Ergebnisse der drei jeweils etwa einstündigen telefonischen Interviews mit insgesamt vier Personen wurden protokolliert, mit den Interviewpartnern noch einmal abgestimmt und dann bei der weiteren Literaturrecherche und Literatúrauswertung berücksichtigt.

Die Darstellung der Effizienzpotenziale erfolgt gegliedert nach

- Potenzialen im Herstellungsprozess (3.1)
- Potenzialen durch die Wahl von Primär- und Sekundärrohstoffen (3.2)
- Potenzialen durch veränderte Zementeigenschaften und alternative Bindemittel (3.3)
- Potenzialen in der Zementanwendung (3.4)

#### 3.1 Herstellungsprozess

Die Zementherstellung umfasst die in Abbildung 5 dargestellten Produktionsschritte: Am Anfang steht die Gewinnung, Förderung und Aufbereitung der Rohstoffe, die im Hinblick auf ihre chemische Zusammensetzung homogenisiert und zu Rohmehl feingemahlen werden. Das Rohmehl wird im weiteren Produktionsverlauf „entsäuert“, indem das Calciumcarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) der Kalkkomponente in Calciumoxid ( $\text{CaO}$ ) und Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) zerlegt und bei Temperaturen von rund  $1450\text{ }^\circ\text{C}$  bis zur Sinterung zum Zwischenprodukt „Klinker“ gebrannt wird.

Das Brennen geschieht in Drehöfen von mehreren Metern Durchmesser und 40 bis 90 Metern Länge. Nach rascher Kühlung wird der Zementklinker zusammen mit einem Erstarrungsregler (Gips/Anhydrit) und gegebenenfalls weiteren Hauptbestandteilen außer Klinker (z. B. Hüttensand) zu Zement vermahlen und/oder gemischt. Schließlich erfolgt die Bereitstellung für den Versand als Sackware oder in loser Form per LKW (Silozug), Bahn oder Schiff.

Im Jahr 2015 betreiben die Unternehmen der deutschen Zementindustrie 55 Werke. Mit einer Tageskapazität von 100.460 t Zementklinker hatten 2015 die 39 Öfen mit Zyklonvorwärmer einen Anteil von 94 % an der gesamten Klinkerproduktion und waren die vorherrschende Ofenklasse. Sechs Öfen mit Rostvorwärmer wurden mit

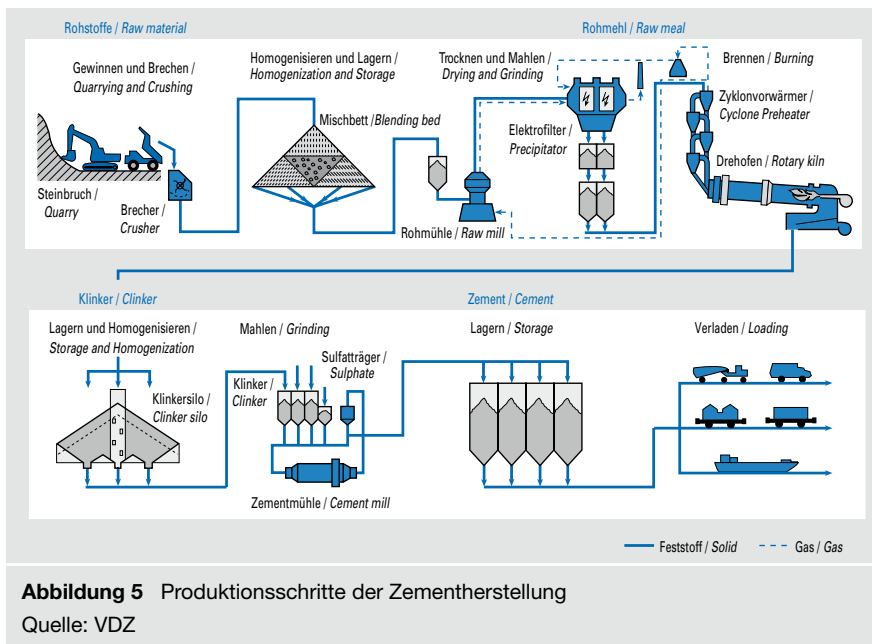
einer Tageskapazität von 5.500 t betrieben sowie acht Schachtofen mit einer Kapazität von insgesamt 1.200 t Zementklinker pro Tag (VDZ 2015a). Ihrer Bedeutung entsprechend, bezieht sich die Recherche und Analyse, soweit es die Öfen betrifft, vorwiegend auf Drehrohröfen mit Zyklonvorwärmer.

#### 3.1.1 Potenziale zur Minderung des thermischen Energiebedarfs

Thermische Energie wird in der Zementproduktion vor allem für das Brennen des Zwischenprodukts Zementklinker benötigt. Daneben erfordert auch die Trocknung der Rohstoffe einen relevanten thermischen Energieaufwand. Der thermische Energieeinsatz bei der Klinkerherstellung wurde bereits kontinuierlich reduziert. Maßgebliche Faktoren hierbei waren die Optimierung der Prozesse, eine Nutzung der Verbrennungsgase zur Vorwärmung des Rohmehls im Zyklonvorwärmer, eine Erhöhung der Ofenkapazität und damit eine Verringerung der spezifischen Wärmeverluste über die Ofenwandung, bezogen auf die jeweilige Produktionsmenge. Hinzu kommt der verstärkte Einsatz von alternativen Energieträgern, die zwar nicht den Energiebedarf reduzieren, aber zu einer Verringerung des Einsatzes von fossilen Brennstoffen führen.

Die in Deutschland eingesetzten Drehrohröfen unterscheiden sich hinsichtlich der **Vorwärmung** des Rohmehls. Grundsätzlich zu unterscheiden ist zwischen älteren Anlagen mit Drehrohröfen mit Rostvorwärmern und Drehrohröfen mit Zyklonvorwärmer und i. d. R. höherer Energieeffizienz. Neuanlagen werden derzeit als Drehrohröfen mit Zyklonvorwärmer und Vorkalzinerung errichtet. Diese Anlagen erreichen derzeit die höchste Energieeffizienz. Eine Umrüstung von Anlagen mit Rostvorwärmer zu Anlagen mit Zyklonvorwärmer kann i. d. R. nicht wirtschaftlich erfolgen (VDZ 2002).

Der spezifische Energieverbrauch von Drehrohröfen hängt auch von der **Ofenkapazität** ab. Drehrohröfen mit großer Kapazität verfügen bezogen auf die jeweilige Produktionsmenge über geringere Oberflächen und daher über geringere Wärmeverluste. Eine Steigerung der Ofenkapazität ist daher eine Möglichkeit zur Verringerung des Energieverbrauchs. Einer



schaftlich akzeptiert ist. Hierbei muss auch berücksichtigt werden, dass es notwendig ist, die erforderlichen Brenntemperaturen zu erreichen. Es kommen daher vor allem hoch- oder allenfalls mittelkalorische Brennstoffe in Frage, die nicht unbegrenzt zur Verfügung stehen und bei denen es auch eine Konkurrenz mit dem stofflichen Recycling gibt.

### Zwischenfazit

Das Potenzial zur Reduzierung des thermischen Energiebedarfs beim Brennen des Zementklinkers ist insgesamt gering und lässt sich vor allem bei neuen Anlagen erschließen. Aufgrund der langen Lebensdauer von Anlagen zur Zement- und Klinkerproduktion ist jedoch nicht davon auszugehen, dass hierzulande durch einen Anlagenneubau kurz- oder mittelfristig ein relevantes Einsparpotenzial erschlossen werden kann.

### 3.1.2 Potenziale zur Minderung des elektrischen Energiebedarfs

Neben thermischer Energie besteht in der Zementproduktion ein hoher Bedarf an elektrischer Energie. Insbesondere die verschiedenen Mahlprozesse sind mit einem hohen elektrischen Energiebedarf verbunden. Dementsprechend groß sind die Bemühungen, effizientere Mühlen zu entwickeln und die Parameter für den Mühlenbetrieb zu optimieren.

Über 60 % des Elektroenergiebedarfs für die Zementherstellung von 100-110 kWh je t Zement entfallen auf Zerkleinerungsprozesse (GNR, 2015; VDZ 2015a). Für die Zementmahlung wird mit durchschnittlich 50 kWh/t der Hauptanteil an elektrischer Energie benötigt. Der elektrische Energiebedarf stellt 10-15 % des gesamten Energiebedarfes der Zementherstellung und ist damit auch ein entscheidender Kostenfaktor in der Produktion (HOE, 2013; MAD, 2011). In den vergangenen Jahren zeigte sich weltweit ein stetiger Rückgang des elektrischen Energiebedarfs bei der Zementherstellung (GNR, 2015). Bedingt durch Anforderungen an **Emissionsminderungstechniken** sowie stetig gestiegene **Mahlfeinheiten** ist dieser Trend in Deutschland nicht zu beobachten (HOE, 2013). Der vermehrte Einsatz von weiteren Zementhauptbestandteilen (neben Klinker) senkt zwar den Bedarf an thermischer Energie und reduziert somit deutlich die CO<sub>2</sub>-Emissionen des

technologisch möglichen Steigerung der Ofenkapazität in Deutschland von derzeit ca. 2.500 t/d (VDZ 2015a) steht insbesondere die sehr lange Lebensdauer der Anlagen gegenüber, aber auch die Rohstoffsituation kann hierfür ein Hindernis sein. So würde kaum eine Zementrohstofflagerstätte hierzulande ausreichen, um einen deutlich größeren Zementdrehrohren mit einer Kapazität von 10.000-12.000 t/d über die Betriebszeit von ca. 30 Jahren zu versorgen.

Schon längere Zeit gibt es Versuche, auch Wirbelschichtöfen bei der Produktion von Zement einzusetzen. Es wurde davon ausgegangen, dass mit dieser Technologie der thermische Energiebedarf gegenüber herkömmlichen Drehrohröfen mit Zyklonvorwärmer um 10-15 % reduziert werden könnte. Damit würden etwa die Werte von Drehrohröfen mit Vorkalzination erreicht, bei einem erhöhten Verbrauch elektrischer Energie (Hasanbeigi et al. 2012). Die Erwartungen, die in diese Technik gesetzt wurden, haben sich allerdings nicht erfüllt, derzeit gibt es weltweit keine Anlage dieser Art.

Die Verbrennungstemperaturen und damit auch die **thermischen Wirkungsgrade** hängen vom Verbrennungsgasvolumen ab. Eine Verringerung des Verbrennungsgasvolumens kann durch Nutzung von Sauerstoff anstelle von Umgebungsluft erfolgen. Derartige „Oxyfuel“-Technologien kommen in verschiedenen Anwendungen außerhalb der Zementherstellung zum Einsatz. Ihre Nutzung ist auch

bei der Zementherstellung möglich und erlaubt gegebenenfalls auch den Einsatz von niederkalorischen Brennstoffen und Sekundärbrennstoffen bzw. größeren Mengen dieser Brennstoffe bei der Klinkerherstellung. Die Herstellung und Nutzung von Sauerstoff ist jedoch mit einem zusätzlichen Einsatz von elektrischer Energie verbunden (Hasanbeigi et al. 2012).

Wenngleich die deutsche Zementindustrie ihren Energieverbrauch bei der Klinkerproduktion bereits signifikant reduziert hat, weisen Länder wie Japan, aber auch Indien, einen geringeren Energieverbrauch auf. Dies ist aber auch auf Unterschiede in der Normung zur Beschreibung der Zementeigenschaften zurückzuführen. In Europa werden die Eigenschaften von Zement mit konstantem Wasserzementwert bestimmt. In Indien wird der Wasserzementwert konsistenzabhängig eingestellt, was gröbere Zemente mit entsprechend geringerem Mahlenergiebedarf begünstigt.

Auch wird in Deutschland verstärkt Energie für umweltrelevante Prozesse zur Abgasreinigung (u.a. NO<sub>x</sub>-Minderung) benötigt. Im Gegensatz zu diesen Ländern werden wiederum in Deutschland deutlich höhere Anteile an Sekundärbrennstoffen eingesetzt (ca. 63,4 % in 2014), die zur Schonung von Energieressourcen beitragen (Gartner et al. 2015, VDZ 2014c). Grundsätzlich ist es möglich, den Anteil an Sekundärbrennstoffen noch weiter zu erhöhen, soweit diese verfügbar sind und ihr Einsatz rechtlich zulässig und gesell-

Zements. Jedoch stellt dies auch höhere Anforderungen an die Zementmahlung. Veränderte Mahlbarkeiten, höhere Komplexität in der Prozessführung sowie eine weitere Steigerung der Produktfeinheit (zum Erreichen gebeter Qualitätsanforderungen) erhöhen den nötigen elektrischen Energiebedarf bei der Zerkleinerung.

Seit der Entwicklung von effizienten Anlagen zur **Hochdruckzerkleinerung** wurde eine Reihe der überwiegend eingesetzten Kugelmühlen durch Gutbett-Walzenmühlen und Vertikal-Wälzmühlen ersetzt. Diese realisierten bereits Energieeinsparungen von bis zu 40 % im Vergleich zur Kugelmühle. In diesen Aggregaten erzeugte Zemente zeigen jedoch teilweise andere Korngrößenverteilungen als die Kugelmühle (WOL, 1988) (MÜL, 2000). Dies beeinflusst die Eigenschaften des Mörtels und des frischen Betons (ROS, 1989). Entsprechend ist eine Substitution von bestehenden Kugelmühlen auch mit Auswirkungen auf das Produkt verbunden.

Gutbett-Walzenmühlen (GBWM) können bestehende Kugelmühlen zu sogenannten Kombi-mahlanlagen erweitern. Hierbei wird die Kugelmühle durch die effiziente Vormahlung in der GBWM entlastet. Aufgrund der höheren Feinheit des Aufgabematerials im Gegensatz zur Kugelmühle ist entsprechend weniger Zerkleinerung durch die Kugelmühle zu leisten, woraus entsprechende Energieeinsparungen resultieren. Durch die Nachmahlung verändert sich die Korngrößenverteilung und zeigt überwiegend die typischen Eigenschaften der Kugelmühle.

Aufgrund sehr hoher Investitionskosten und der langen Amortisationszeit von Neuinstallationen in bestehenden Werken werden i. d. R. keine neuen Mühlen installiert. Das gilt insbesondere, da die zumeist eingesetzten Kugelmühlen sehr robust und langlebig sind. Es sind jedoch auch bei Bestandsanlagen (vor allem Kugelmühlen) Steigerungen der Energieeffizienz und damit Einsparungen von Energieressourcen insbesondere durch die Optimierung der Betriebsweise möglich. Neben gegebenen Einflussfaktoren (wie der Mahlbarkeit der Hauptbestandteile) beeinflussen die Mühlenparameter (z. B. Ventilation, Kugelzusammensetzung in der Mühle oder Mühlenregelung) maßgeblich die Effizienz der

Zerkleinerung. Besonders bei Kugelmühlen besteht oft hohes Optimierungspotenzial durch Anpassung der Betriebsparameter.

Insbesondere vor dem Hintergrund des hohen Anteils an Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen spielt die **getrennte Mahlung und Mischung** von Zementen eine wichtige Rolle. Bei der gemeinsamen Mahlung reichert sich die schwerer mahlbare Komponente in den gröberen Fraktionen und die leichter mahlbare Komponente entsprechend in den feineren Fraktionen an (MIT, 1996). Dies kann bedingt durch die gegebenen Qualitätsanforderungen Auswirkungen auf die nötige Mahlfeinheit des Zementes haben. Berichte über das getrennte Mahlen und anschließende Mischen von Zementen zeigen Energieeinsparungen von im Mittel 7 %. Aufgrund der unterschiedlichen Korngrößenverteilungen der getrennt vermahlenden Komponenten lassen sich auch gezielt Verbesserungen in den Zementeigenschaften erzeugen. Neben einem reduzierten Wasserbedarf bewirkt z. B. ein höherer Anteil feinsten Hüttensandes auch eine Erhöhung der Festigkeiten (TRE, 2001). Weiterhin kann die Flexibilität der Produktion gesteigert werden.

Ein wichtiger Aspekt für eine effiziente Vermahlung ist die **Klassierung und die Trennung von Feingut** (Produkt) und Grobgut, das der Mühle erneut zugeführt wird. Madloom et al. (2013) berichten in einer Analyse des asiatischen Marktes über ein Einsparpotenzial von bis zu 6,3 kWh elektrischer Energie je t Zement, 0,057 GJ thermischer Energie je t Zement und bis zu 5,23 kg CO<sub>2</sub>/t. Das praktische Einsparpotenzial hängt aber stark von der substituierten Sichter-Generation und den angestrebten Endfeinheiten ab. Mit einer effizienten Trennung kann der Energieaufwand sowohl bei der Rohmehlvermahlung als auch bei der Zementvermahlung reduziert werden. Effizientere Klassierungsprozesse können jedoch steilere Kornbänder erzeugen, was wiederum Einfluss auf die Produktqualität nehmen kann. Entsprechend kann, bedingt z. B. durch den Wasserbedarf, das volle Einsparpotenzial moderner Sichter nicht voll abgerufen werden.

Bei der **Vermahlung des Rohmaterials** werden überwiegend Walzmühlen eingesetzt. Ihre Energieeffizienz ist gegenüber Kugelmühlen deutlich höher.

Vor allem in der Rohmehlvermahlung eignen sich derartige Anlagen aufgrund hoher Trocknungskapazitäten besonders. Ihre Energieeffizienz ist gegenüber den immer noch in einigen älteren Anlagen eingesetzten Kugelmühlen deutlich höher. Dennoch bestehen hier immer noch Optimierungsmöglichkeiten. Neben der eigentlichen Zerkleinerung bei der Rohmahlung ist die Trocknung von entscheidender Bedeutung für nachfolgende Prozesse. Diese können durch Optimierung von Heiß- sowie Abgaswärmenutzung zur Trocknung verbessert werden (Atmaca u. Kanoglu 2012). Ein optimierter Einsatz von Ofenabgasen spielt insbesondere dann eine große Rolle, wenn die Abwärme des Brennprozesses zur Verstromung genutzt wird.

Der **Transport von Pulvern und Stückgütern** stellt einen verhältnismäßig kleinen Anteil des elektrischen Energiebedarfes dar. Die geeignete Wahl effizienter Transportsysteme (z. B. mechanisch statt pneumatisch) kann im Einzelfall jedoch zu einer merklichen Verringerung des Gesamtenergiebedarfs führen (Madloom, 2013). Der überwiegende Teil der Transporteinrichtungen ist jedoch bereits in geeigneter Weise ausgeführt, so dass hier keine wesentlichen Einsparpotentiale zu erwarten sind.

#### Zwischenfazit

*Insbesondere die Mahlprozesse bieten noch ein relevantes Potenzial zur Verringerung des Energiebedarfs und Ressourcenverbrauchs. Langfristig besteht deutliches Potenzial durch den Einsatz effizienter Hochdruck-Zerkleinerungsaggregate wie der Gutbett-Walzenmühle und der Vertikalwälzmühle. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass Mühlen aufgrund der langen Lebensdauer und hohen Kosten bislang kaum in bestehenden Anlagen ausgetauscht werden. Kurz- und mittelfristig besteht die Möglichkeit der Effizienzsteigerung durch Optimierung von Bestandsanlagen (vor allem Kugelmühlen). Weiterhin können durch die getrennte Mahlung und Mischung unterschiedlicher Zementbestandteile eine Vielzahl von Zementen flexibel und zum Teil auch effizienter hergestellt werden.*

### 3.2 Primärrohstoffe und Sekundärrohstoffe

Zement kann aus verschiedenen Rohstoffen hergestellt werden. Neben unterschiedlichen natürlichen Rohstoffen

eignen sich auch verschiedene Sekundärrohstoffe bzw. Hauptbestandteile für die Klinker- und Zementherstellung. Die wichtigsten natürlichen Rohstoffe für die Klinkerherstellung sind Kalkstein und Ton oder deren natürliches Gemisch, der Mergel. Teile der Rohmaterialmischung können auch nichtnatürlicher Herkunft sein (z. B. Klärschlamm, Gießereialsand). Die jeweilige Rohstoffmischung muss mit hohem Energieaufwand gebrannt werden und dekarbonatisiert dabei. Hierbei wird CO<sub>2</sub> freigesetzt.

### 3.2.1 Weitere natürliche Rohstoffe

**Natürliche Puzzolane** bzw. natürliche getemperte Puzzolane (z. B. getemperte Tone) sind puzzolanische Stoffe, die bei der Zementherstellung Portlandzementklinker ersetzen können. Ihr größter Vorteil ist, dass sie nicht gebrannt werden müssen, um in Zementen eingesetzt zu werden. Dementsprechend geringer ist der Energiebedarf bei der Herstellung derartiger Zemente im Vergleich zu Portlandzement. Hinzu kommt, dass keine CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Kalzination von Karbonatgesteinen entstehen. Derartige Puzzolane kommen in Deutschland jedoch nur in wenigen Lagerstätten vor und können daher nur regional und im eng begrenzten Maß zur Deckung des Rohstoffbedarfs beitragen. Eine deutliche Steigerung der Einsatzmengen natürlicher Puzzolane aus dem Inland ist daher kaum möglich.

#### Zwischenfazit

*Hinsichtlich der für die Zementproduktion eingesetzten natürlichen Rohstoffe bestehen in Deutschland kaum Effizienzpotenziale, da relevante alternative natürliche Rohstoffe nicht in hinreichender Menge zur Verfügung stehen.*

### 3.2.2 Sekundärrohstoffe aus der Verwertung industrieller Nebenprodukte

Neben den natürlichen Puzzolanen werden in großen Mengen latent-hydraulische und puzzolanische industrielle Nebenprodukte bei der Zementherstellung eingesetzt. Die größte Bedeutung hat hierbei mit ca. 6 Mio. t/a **Hüttensand**, der als Nebenprodukt bei der Eisenverhüttung anfällt (VDZ 2014c). Die Verfügbarkeit von Hüttensand hängt dabei von der Stahlkonjunktur ab und unterliegt teils erheblichen Schwankungen. Eine Erhöhung der eingesetzten Mengen an

Hüttensand aus deutschen Hochöfen erscheint kaum möglich. Langfristig erscheint es eher wahrscheinlich, dass es zu einer zunehmenden Verlagerung der Herstellung von Roheisen in Regionen kommt, die näher an der Erzproduktion liegen. Dadurch würde die Versorgung mit Hüttensand aus deutscher Produktion tendenziell zurückgehen.

Auch **andere Schlacken** aus der Eisen- und Stahlindustrie können grundsätzlich für die Zementproduktion herangezogen werden, sind jedoch nicht als Zementhauptbestandteile genormt.

Beispielsweise eignen sich Stahlwerksschlacken prinzipiell als Rohstoff für die Klinkerproduktion und können dort Kalkstein sowie Silikatträger ersetzen. Vorteilhaft ist hierbei, dass sie aufgrund des gegenüber Mergel niedrigeren Schmelzpunktes die Sinterung erleichtern. Die ebenfalls auftretende exotherme Reaktion bei der Umwandlung von Dikalziumsilikat zu Trikalziumsilikat, die bei starker Erhitzung der Schlacke stattfindet, reduziert den Energieverbrauch ebenfalls und erhöht die Effizienz des Prozesses. Da die Schlacken bereits kalzinierten Kalkstein enthalten, werden auch weitere CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Zementherstellung eingespart (Hasanbeigi et al. 2012). Unklar ist, inwieweit die Metallgehalte von Stahlwerksschlacken hinderlich beim Einsatz in der Klinkerproduktion sein können. Auch Pfannenschlacke aus der Stahlindustrie kann für die Zementproduktion eingesetzt werden. Chrom (VI), der Auslöser für Kontaktekzeme, sollte dabei weitgehend immobilisiert werden (Serjun 2015).

Auch verschiedene **Flugaschen** können bei der Zementherstellung eingesetzt werden. Relevant sind vor allem Steinkohlenflugaschen, aber auch Braunkohlenflugaschen, die beide als künstliche Puzzolane eingesetzt werden, deren Verfügbarkeit infolge der Energiewende zukünftig allerdings abnehmen wird. Heutzutage wird der Großteil der Steinkohlenflugaschen in Deutschland allerdings als Zusatzstoff im Beton eingesetzt. Als Folge der Energiewende könnte sich die Verfügbarkeit von Steinkohlenflugasche in Deutschland allerdings erheblich verringern. Daneben könnten auch Flugaschen aus Hausmüllverbrennungsanlagen nach vorheriger Aufbereitung künftig in geringen Mengen bei der

Klinkerherstellung eingesetzt werden. Sie können hier die Tonkomponente ersetzen. In jedem Fall sind die Schwermetallgehalte derartiger Aschen im Hinblick auf die Umweltverträglichkeit von Zementen zu berücksichtigen. Kritisch kann zudem der Chloridgehalt sein, der durch Wäsche zunächst verringert werden muss, da er sonst zu Korrosionsschäden im Drehrohröfen führen kann. Die Einsatzmengen lagen in Versuchen bei 1,75-3,5 % (Pan et al. 2008). Beim Einsatz von ca. 6,7 % aufbereiteter Flugasche konnte 22,3 kg CO<sub>2</sub>/t Zement eingespart werden, wobei die Herstellung selber mit 6,14 kg/t Zement angesetzt werden muss und damit in Summe 16,2 kg CO<sub>2</sub>/t Zement eingespart werden können (Gartner et al. 2015).

Als weiterer Hauptbestandteil in den Zementen wird in Deutschland in großen Mengen (ungebrannter) **Kalkstein** eingesetzt. Dieser wird gemeinsam oder getrennt mit Portlandzementklinker und ggf. weiteren Hauptbestandteilen (Hüttensand, Flugasche) vermahlen. Bei der Herstellung von Kalkstein geeigneter Korngröße entsteht kein CO<sub>2</sub>, da Kalkstein als Hauptbestandteil des Zements nicht kalziniert wird. Auch ist die benötigte Mahlenergie deutlich geringer als bei Klinker oder Hüttensand. Kalkstein ist allerdings weitestgehend inert, so dass die anderen Hauptbestandteile (insbesondere der Klinker) ggf. feiner aufgemahlen werden müssen. Der Einsatz von Kalkstein führt also zu einer deutlichen Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Tonne Zement, aber nicht zwangsläufig zu einem verminderten Energiebedarf.

**Betonbrechsand** aus dem Betonrecycling ist mit Zementstein angereichert und fällt in erheblichen Mengen bei der Herstellung von RC-Gesteinskörnungen an. Er wird bisher fast nicht genutzt. Ein Einsatz dieses Zementsteins als Betonzuschlag ist i. d. R. nicht möglich. Betonbrechsand kann jedoch als alternativer Rohstoff für die Klinkerherstellung eingesetzt werden, wenn er in passender chemischer Zusammensetzung und ausreichender Menge zuverlässig zur Verfügung gestellt werden kann. Bei üblichen Zusammensetzungen von Zementrohstoffen und der Zusammensetzung von Brechsanden können ca. 4,5-9 % Betonbrechsand unproblematisch eingesetzt werden. Limitierend ist insbesondere der maximal

erwünschte Siliziumgehalt des Klinkers. Bei siliziumarmer Rohstoffbasis kann entsprechend mehr Brechsand als Korrekturstoff eingesetzt werden. Die Vorteile einer Nutzung der Betonbrechsande sind eine Verringerung des Primärmaterialbedarfs sowie der Treibhausgasemissionen um ca. 0,6 % und des Primärenergieverbrauchs um ca. 1,4 % bei einem Einsatz von 3 % Betonbrechsand (Hauer et al. 2009). An anderer Stelle wird auch von Versuchen mit deutlich größeren Anteilen an Betonbrechsand berichtet. Hierbei wurde mit einem Anteil von 30 % Portlandzementklinker hergestellt, dessen mineralogische Zusammensetzung sehr nahe am Referenzklinker lag. Bei einem Anteil von 55 % Betonbrechsand und einem angepassten Anteil an Kalkstein und Schiefer, um den Anteil an Kalziumsilikaten ( $C_3S + C_2S$ ) zu maximieren, entstand bei der Klinkerproduktion ein  $C_2S$ -reicher Klinker (Gastaldi et al. 2015).

Zur Regulierung der Abbindezeit wird dem Klinker in der Fertigmahlung Gips und/oder Anhydrit zugegeben. Hierbei wird schon seit langer Zeit **REA-Gips** aus Rauchgasentschwefelungsanlagen eingesetzt. Auch die Verfügbarkeit von REA-Gips wird sich infolge der Energiewende verschlechtern. Hier wird zukünftig voraussichtlich wieder verstärkt auf natürlichen Gips und/oder Anhydrit zurückgegriffen werden müssen.

Beim Einsatz größerer Mengen weiterer Hauptbestandteile bei der Zementherstellung entstehen häufig Zemente mit verlangsamter Festigkeitsentwicklung. Um dieser verlangsamten Festigkeitsentwicklung entgegenzuwirken, gibt es die Möglichkeit, die Reaktivität der weiteren Hauptbestandteile insbesondere bei Flugaschen und Schlacken zu erhöhen. Hierzu können "High Energy Milling"-Verfahren eingesetzt werden, die eine feinere Aufmahlung ermöglichen und so – aufgrund der hierbei entstehenden größeren spezifischen Oberfläche (Blaine-Wert) und physikochemischer Veränderungen – die Reaktivität erhöhen (Hasanbeigi et al 2012). Diese Verfahren haben sich aus Gründen des enormen Verschleißes der Mahlaggregate jedoch nicht durchgesetzt.

Ferner sind **Sekundärbrennstoffe**, auf die in Kapitel 3.1.1 bereits eingegangen wurde, nicht nur als Energielieferant zu betrachten. Sie liefern auch Asche, die in den Klinker eingebunden

wird, beispielsweise Eisen(oxid) im Fall von Altreifen (Gartner et al. 2015). Sekundärbrennstoffe können jedoch auch unerwünschte Bestandteile enthalten, die u. U. negative Einflüsse auf die Mineraleigenschaften des Klinkers haben können.

Grundsätzlich können in der Klinker- und Zementherstellung auch alternative primäre und sekundäre Rohstoffe eingesetzt werden, soweit die Zusammensetzung geeignet ist. Limitierend sind jedoch häufig die Verfügbarkeit sowie die mit dem Abbau bzw. der Aufbereitung verbundenen Umweltauswirkungen. Daher können nicht alle entsprechenden Überlegungen zum Einsatz alternativer Rohstoffe auf ganz Deutschland übertragen werden, wie etwa der Einsatz von Ölschiefern.

#### Zwischenfazit

*Bei der Nutzung von alternativen Zementrohstoffen bestehen bezüglich Hüttensand, Steinkohlenflugaschen oder REA-Gips geringe oder keine Potenziale zur Erhöhung ihrer Einsatzmengen. Im Gegenteil ist eher davon auszugehen, dass infolge der Energiewende und des Strukturwandels langfristig weniger dieser Stoffe zur Verfügung stehen. Gewisse Potenziale bestehen noch beim Einsatz von Betonbrechsand, der bisher nicht genutzt wird. Nachteilig könnte hierbei eventuell ein erhöhter Transportaufwand sein.*

### 3.3 Alternative Zemente und Bindemittel

Neben der Optimierung bestehender Zementarten nimmt die Entwicklung alternativer Zemente und Bindemittel auch vor dem Hintergrund steigender klimapolitischer Anforderungen sowie der limitierten Verfügbarkeit gängiger Sekundärrohstoffe eine wichtige Rolle bei der Steigerung der Rohstoffproduktivität ein.

**Zemente mit geringerem Kalksättigungsfaktor (Belitzemente)** können bei niedrigeren Temperaturen gebrannt werden und haben einen dementsprechend geringeren Energiebedarf. Belitzement weist jedoch bei gleicher Mahlfineinheit eine geringe Druckfestigkeit auf. Zur Erzielung einer vergleichbaren Festigkeit wie herkömmlicher Portlandzement kann die Mahlfineinheit erhöht werden, was jedoch den Energieverbrauch bei der Klinkervermahlung erhöht (Hasanbeigi et al. 2012).

**Geopolymere** werden mit nur minimal verarbeiteten natürlichen Rohstoffen (z. B. Metakaolin oder Puzzolanen) oder industriellen Reststoffen (z. B. Flugaschen) hergestellt. Aufgrund der geringen Brenntemperatur ist ihre Herstellung nur mit einem geringen Energieverbrauch und ebenfalls geringen  $CO_2$ -Emissionen verbunden. Die Produktion von Geopolymeren befindet sich derzeit noch im Demonstrationsstadium (Hasanbeigi et al 2012). Zu berücksichtigen ist hierbei auch, dass die Herstellung von Geopolymer überwiegend auf industriellen Reststoffen oder Nebenprodukten beruht, deren Verfügbarkeit infolge der Energiewende und des Strukturwandels tendenziell zurückgehen dürfte. Harbert et.al. (2011) weisen darauf hin, dass bei der Betrachtung der Umweltbeeinträchtigungen von Geopolymeren und auf Geopolymeren basierendem Beton das gewählte Allokationsverfahren für die Zurechnung der Umweltbelastungen einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis hat und diese Betone daher nicht grundsätzlich besser zu bewerten sind. Daher ist es wichtig, dass für die Herstellung von Geopolymer industrielle Reststoffe verwendet werden, die nicht anderweitig mit besserer Ressourcenbilanz recycelt werden können.

Auf **Magnesiumoxid und Magnesiumchlorid basierte Zemente** sind schon lange bekannt und wurden bereits eingesetzt. Neuerdings werden sie wieder als Alternative zu Portlandzement diskutiert. Interessant kann hierbei sein, dass zur Herstellung auch Magnesiumsilikate eingesetzt werden können, die beim Brennen im Gegensatz zu Karbonatgesteinen kein  $CO_2$  emittieren (Hasanbeigi et al 2012). Allerdings stehen die Rohstoffe für derartige Zemente nur in untergeordneten Mengen zur Verfügung, so dass portlandklinkerbasierte Zemente nicht in relevanten Größenordnungen ersetzt werden können.

**Zemente auf der Basis von Dikalziumsilikat ( $C_2S$ ) und Kohlenkraftwerksaschen** können mit  $CO_2$  aus Kraftwerken abbinden und karbonatisieren. Hierzu werden Betonfertigteile in Kammern gesetzt und mit  $CO_2$  aus dem Kraftwerk beaufschlagt. Auf diese Art kann  $CO_2$  aus Kraftwerken gebunden werden und eine schnelle Verfestigung erreicht werden. Der pH-Wert dieses Betons liegt unter 8, weshalb Bewehrungsstahl nicht hinreichend

vor Rost geschützt ist. Ein Einsatz im Stahlbeton ist daher nicht möglich (Higuchi et al. 2014).

Relativ neu ist die Entwicklung von **Zement auf der Basis von hydraulischem Calciumhydrosilikat** (Cement). Dieser Zement kann auf der Basis von verschiedenen CaO- und SiO<sub>2</sub>-haltigen Rohstoffen hergestellt werden. Im Gegensatz zu Portlandzementklinker erfolgt die Herstellung nicht in einem Brennprozess, sondern die Ausgangsstoffe werden gegebenenfalls gemahlen, gemischt und in einem Autoklaven bei 150-210 °C behandelt. Allerdings ist eine Zugabe von Branntkalk notwendig, der seinerseits kalziniert wurde. Bei richtiger Zusammensetzung und geeigneten Prozessparametern entstehen dabei Calciumhydrosilikate. Diese sind zunächst nicht hydraulisch. Um ein hydraulisches Bindemittel zu erhalten, werden die Calciumhydrosilikate zusammen mit anderen SiO<sub>2</sub>-haltigen Rohstoffen vermahlen. Im Ergebnis erhält man einen Zement, dessen Eigenschaften in weiten Bereichen variiert werden können. Mit ca. 555 kJ/kg liegt die Bildungsenthalpie für Zement auf der Basis von Calciumhydrosilikat nur bei etwa einem Drittel der Bildungsenthalpie von Portlandzementklinker. Die Treibausgasemissionen der Herstellung wurden mit etwa der Hälfte der Emissionen von Portlandzement berechnet (Stemmermann et al. 2010). Dieser Zement befindet sich allerdings noch im Forschungsstadium. Die großtechnische Herstellung und die Frage der Dauerhaftigkeit der damit hergestellten Betone ist Gegenstand derzeitiger Untersuchungen.

#### Zwischenfazit

*Alternative Zemente und Bindemittel können eine interessante und auch energie- und ressourcenschonende Alternative zu herkömmlichen Zementen sein. Sie befinden sich jedoch derzeit noch im Entwicklungsstadium. Wichtig für ihre Weiterentwicklung sind auch eine dauerhaft zuverlässige Rohstoffbasis sowie mit üblichen Zementen vergleichbare Verarbeitungs- und Dauerhaftigkeitseigenschaften.*

### 3.4 Zementanwendung im Beton

Der wichtigste Anwendungsbereich von Zement ist die Betonherstellung. Daneben wird er vor allem in Mörtel, einschließlich Putzmörtel, und in der Bauchemie eingesetzt. Andere

Anwendungen sind demgegenüber nachrangig.

Ein wichtiger Schritt, um den Ressourcenbedarf des Betons zu reduzieren, kann es sein, die Zusammensetzung zu optimieren. Allerdings gilt es dabei, die Anforderungen an z. B. Standsicherheit und Dauerhaftigkeit nicht zu gefährden. So kann der Einsatz von Zement dabei je nach erforderlichen Eigenschaften des Betons nicht unter Mindestanteile vermindert werden. Die bei der Herstellung von Zement noch bestehenden Potenziale zur weiteren Verbesserung der Rohstoffproduktivität wurden oben bereits umrissen. Sie sind insgesamt begrenzt und können teilweise nur schwierig erschlossen werden (Flatt et al. 2012). Daher soll hier auf die anderen Hauptbestandteile des Betons näher eingegangen werden.

#### 3.4.1 Rezyklierte Gesteinskörnungen

Eine häufig und intensiv diskutierte Möglichkeit zur Erhöhung der Ressourceneffizienz ist der Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen. RC-Gesteinskörnungen können anstelle von natürlichen primär gewonnenen Gesteinskörnungen bei der Betonherstellung eingesetzt werden. Mit derartigem RC-Beton wurde auch schon eine Reihe von Bauprojekten umgesetzt, ohne Einschränkungen an der Gebäudestruktur vorzunehmen (Messari-Becker et al. 2014).

Die **Vorteile von RC-Gesteinskörnungen** bestehen zum einen darin, dass sie ganz oder teilweise natürliche Gesteinskörnungen aus Kies oder frisch gebrochenem Naturstein ersetzen und damit auch dazu beitragen, den Rohstoffbedarf im Bereich der Steine-und-Erden-Gewinnung zu vermindern. Mineralische Bauabfälle werden in Deutschland schon heute zu über 90 % verwertet. Die Verwertung findet hauptsächlich im Straßenbau statt (52 %), wo RC-Gesteinskörnungen ebenfalls Primärmaterial ersetzen (Kreislaufwirtschaft Bau, 2015).

Den Vorteilen der Verwendung von RC-Gesteinskörnungen stehen auch einige **Nachteile** gegenüber, die einen Einsatz von RC-Gesteinskörnungen erschweren. Die Gesteinskörnung beeinflusst den Zementverbrauch, den Wasseranspruch sowie die Verarbeitbarkeit und die Verdichtung des

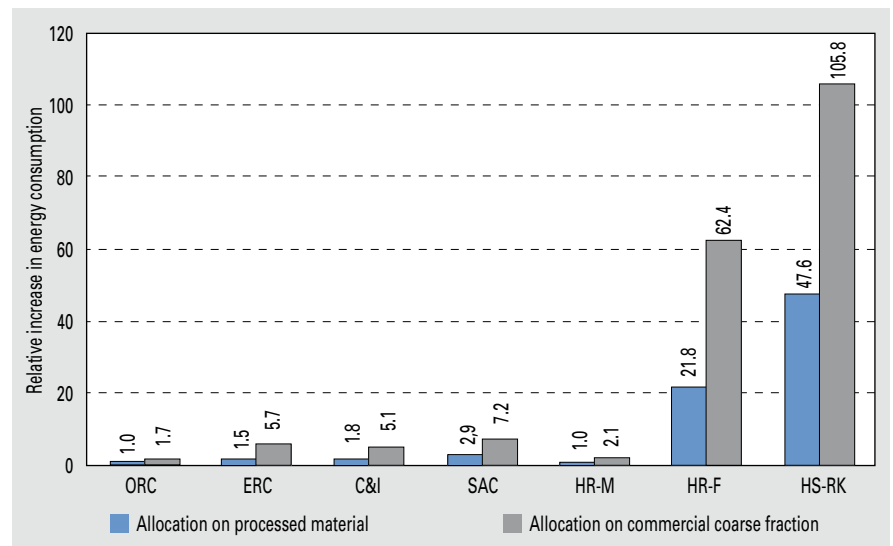
Betons. Die Gesteinskörnung muss im Zustand „kernfeucht und oberflächentrocken“ eingestellt werden, da überschüssiges Wasser, das nicht als Hydratwasser im Zementstein gebunden wird, im Beton Poren und Kapillaren bildet, die sowohl die Festigkeit als auch z. B. die Wasserdurchlässigkeit, den Karbonatisierungswiderstand und den Frostwiderstand verringern können. Den Zustand „kernfeucht und oberflächentrocken“ großtechnisch zielsicher einzustellen, ist gleichermaßen wichtig wie anspruchsvoll. Selbst wenn dies gelingt, beeinflusst die Verwendung der RC-Gesteinskörnung die zuvor genannten Eigenschaften des Betons. Der Einsatz von RC-Gesteinskörnungen in Beton im Vergleich zu natürlichen Gesteinskörnungen ist daher im Regelwerk eingeschränkt. Aus ökologischer Sicht relevant ist auch, dass bei Verwendung von RC-Gesteinskörnungen (z. B. C. Hoffmann, „Stand von Forschung und Entwicklung“, ETH Zurich, Presentation 9. Schweizer Betonforum „Recyclingbeton – die sinnvolle Alternative?“, 1. Juli 2015.) häufiger mehr Zement zum Erreichen der gleichen Betonperformance (frisch und fest) eingesetzt werden muss. Dadurch kann der ökobilanzielle Vorteil von RC-Gesteinskörnungen nicht nur aufgehoben, sondern u. U. ins Gegenteil verkehrt werden.

Die relevante technische Regel ist insbesondere DIN EN 12620 in Verbindung mit der Richtlinie des DAfStb „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“. Sie weist hinsichtlich der geometrischen, physikalischen und chemischen Anforderungen auf DIN EN 12620 „Gesteinskörnungen für Beton“. Die Richtlinie regelt die zulässigen Zusammensetzungen von Gesteinskörnungen und legt abhängig vom Lieferotyp auch Grenzen für den Einsatz von alternativen Materialien fest. Auch werden Anforderungen an Kornrohdichte und säurelösliche Chloride sowie die Umweltverträglichkeit definiert, ebenso wie Anforderungen an die Überwachung der Herstellung von sekundären Gesteinskörnungen und notwendige Lieferangaben.

Auf herkömmliche Weise wird RC-Gesteinskörnung aus Beton ähnlich hergestellt wie natürliche Gesteinskörnungen. Das Material wird hierzu gebrochen und klassiert, Überkorn wird gegebenenfalls erneut gebrochen.

Der Anteil an feinem Material, der nicht für die Betonherstellung verwendet werden kann, schwankt und liegt bei 40-60 % (Quattrone et al. 2014). Beim Recycling von Beton haben die Zerkleinerungs- und Klassierungsverfahren einen relevanten Einfluss auf die Eigenschaften wie Korngröße, Kornverteilung und Porosität der RC-Gesteinskörnungen (Gomes et al. 2015). RC-Gesteinskörnungen weisen in der Regel eine höhere Porosität auf als natürliche Gesteinskörnungen. Diese höhere Porosität ist verbunden mit einer höheren Wasseraufnahme. Der höheren Porosität kann jedoch mit zusätzlichen Aufbereitungsschritten begegnet werden, die die Homogenität der RC-Gesteinskörnung erhöhen und Verunreinigungen der Oberflächen beseitigen. Hierzu wird z. B. ein „Autogenous-cleaning“-Prozess genutzt, in dem der an der Gesteinskörnung anhaftende Zementstein zu einem großen Teil entfernt wird. Die RC-Gesteinskörnung wird dafür in eine Kugelmühle gegeben und ohne Mahlkörper behandelt und anschließend klassiert (Chau et al. 2012). Zwischenzeitlich wurde dieses Verfahren auch im größeren Maßstab einer praktischen Anwendung erprobt. Hierbei wurde untersucht, wie durch eine Kombination von geschicktem Abriss, der Entfernung von Zementstein von den Oberflächen der Gesteinskörnung durch Zerkleinerung in einer autogenen Mühle und einer trockenen Klassierung eine RC-Gesteinskörnung mit verbesserten Eigenschaften hergestellt werden kann. Die Versuche wurden mit 20.000 t Beton in einer Anlage mit einer Kapazität von max. 60 t/h durchgeführt. Die Versuche zeigten, dass hiermit eine RC-Gesteinskörnung hergestellt werden kann, die beim Einsatz in Beton eine um 30 % höhere Festigkeit nach sieben Tagen aufweisen konnte als Beton mit natürlicher Gesteinskörnung. Als Ursache hierfür werden Veränderungen der Oberfläche der RC-Gesteinskörnung angenommen. Der Frostwiderstand des mit der RC-Gesteinskörnung hergestellten Betons erwies sich jedoch als immer noch nicht so gut wie bei natürlicher Gesteinskörnung (Lofti et al. 2014).

Das **Recycling von Beton zur Herstellung von RC-Gesteinskörnungen** ist eine anspruchsvolle Aufgabe, da gleichzeitig geringe Kosten und eine hohe Qualität für das Recycling gefordert werden. Grundsätzlich kommen neben den herkömmlichen Ver-



**Abbildung 6** Erhöhung des Energieverbrauchs beim Betonrecycling in Abhängigkeit vom Aufbereitungsverfahren und der gewählten Allokation

Quelle: Quattrone et al. 2014

Anmerkung: ORC (ordinary recycling); ERC (eccentric rotorcrusher); C&I (compression and impact); SAC (screw abrading crusher); HR-M (heating by microwave oven and rubbing); HR-F (heating by kerosene furnace and rubbing); HS-RK (heating by rotary kiln and sorting).

fahren auch andere Verfahren für die Aufbereitung von Beton zu RC-Gesteinskörnungen infrage. Neben dem Einsatz von Kugelmühlen besteht die Möglichkeit einer thermo-mechanischen Behandlung. Hierbei wird eine mechanische Behandlung durch eine thermische ergänzt. Abhängig von der Behandlungstemperatur kommt es entweder zu thermischen Rissen durch die schnelle Temperaturänderung und Wärmedehnung oder zu Volumenveränderung beim Modifikationswechsel vom  $\alpha$ -Quarz zum  $\beta$ -Quarz sowie durch Dehydratation des Zementsteins bei noch höheren Temperaturen. Abhängig von der Art der Behandlung unterscheiden sich die Eigenschaften der RC-Gesteinskörnung, insbesondere die Wasseraufnahme (1-6,27 %) und die Ausbeute an grobem Korn (27-60 %). Erhebliche Unterschiede gibt es vor allem hinsichtlich des Energiebedarfs der Aufbereitung, die bei den betrachteten Verfahren zwischen ca. 37 MJ/t und 2.350 MJ/t RC-Gesteinskörnung liegen. Insbesondere die thermo-mechanischen Verfahren weisen sehr hohe Energieverbräuche auf (Quattrone et al. 2014, vgl. Abb. 6). Diese Energieeinträge sind so hoch, dass ein derart behandeltes Material sowohl ökologisch als auch ökonomisch nicht mit natürlicher Gesteinskörnung konkurrieren kann.

Eine wesentliche Herausforderung besteht daher darin, hochwertige Ge-

steinskörnungen mit geringen Verlusten und geringem Energieverbrauch herzustellen und eine Verwendung für die feinen Fraktionen zu finden. In diesem Zusammenhang wurden auch Versuche durchgeführt, feine RC-Fraktionen im Beton einzusetzen und somit für den kompletten Zuschlag RC-Material zu verwenden (Yoda et al. 2014). Hinsichtlich des Einsatzes von RC-Gesteinskörnungen < 2 mm muss jedoch berücksichtigt werden, dass er aufgrund der in aller Regel unzureichenden Qualität für den Einsatz im Beton nicht gestattet ist.

Betonabbruch wird in Form von RC-Gesteinskörnungen bislang zumeist kaskadenförmig als **Schüttmaterial im Tiefbau** eingesetzt. Eine Verwendung im Hochbau könnte daher unter bestimmten Bedingungen zu **ökologisch kontraproduktiven Ausgleichsflüssen** durch einen verstärkten Einsatz von Kies und Sand im Tiefbau führen. In den kommenden Jahrzehnten ist allerdings ein Anstieg der Betonabbruchmengen zu erwarten. Hieraus kann sich ein erhöhtes Potenzial zur Nutzung von RC-Gesteinskörnungen ergeben. Aktuell reicht der Anfall von Recyclingbaustoffen trotz hoher Verwertungsraten der Abfälle allerdings bei Weitem nicht aus, den Verbrauch an Baumaterial zu decken. Dies liegt vor allem daran, dass der Bestand von Hoch- und Tiefbau („anthropogenes Lager“) wächst. Es ist davon auszugehen, dass der Net-



tobestandszuwachs des Hochbaus in Deutschland insgesamt noch vor dem Jahr 2050 auf null zurückgeht (Schiller et al. 2010), eine Situation, die aktuell bereits in den ländlichen Regionen der neuen Bundesländer zu beobachten ist. Dabei wird es regional stark unterschiedliche Entwicklungen geben. Insbesondere in Metropolregionen wird der Bestand länger zunehmen als in ländlichen Regionen.

Erst wenn sich Neu- und Rückbau die Waage halten (Netto-Bestandszuwachs gleich Null), kann Recycling den Bedarf zu erheblichen Teilen decken. Es ist davon auszugehen, dass die Verfügbarkeit von Sekundärrohstoffen aus der Verfeuerung fossiler Energieträger mittel- bis langfristig sinkt und zugleich durch ein vermindertes Bestandswachstum, d.h. auch einen stärkeren Rückbau der Anteil von Sekundärrohstoffen am Gesamtinput von Baumaterialien steigen kann. Dadurch sinkt tendenziell die Menge der benötigten Primärmaterialien, insbesondere der Gesteinskörnungen von Beton.

Neben RC-Gesteinskörnungen kommen grundsätzlich auch **andere Fraktionen von Sekundärrohstoffen** aus der Verwertung für den Einsatz infrage, z. B. Glas. Allerdings kann es bei der Verwendung von Glasscherben als Zuschlag zu einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion mit entsprechenden Gefügeschäden kommen. Dem kann durch Zusatz von (erheblichen Mengen) Flugasche oder anderen puzzolanischen oder latent-hydraulischen Stoffen und Lithiumkarbonat oder anderen Lithiumsalzen begegnet werden (Topcu 2008). Die Verwendung von Lithium ist heute jedoch wirtschaftlich nicht umsetzbar und erscheint angesichts begrenzter Verfügbarkeit und konkurrierender Nachfrage, insbesondere aus den Batterietechnologien, unrealistisch.

#### Zwischenfazit

*Betrachtet man die derzeitigen Verwertungsquoten von mineralischen Bauabfällen in Deutschland, besteht derzeit kein relevantes Potenzial, diese zur weiteren Ressourcenschonung noch weiter zu steigern. Perspektivisch ist jedoch damit zu rechnen, dass künftig größere Mengen mineralischer Bauabfälle für die Erzeugung von RC-Gesteinskörnungen zur Verfügung stehen werden. Beim Einsatz von RC-Gesteinskörnung im Beton besteht zugleich noch erheblicher Bedarf zur Verbesserung von Verfahren*

*zur effizienten Erzeugung hochwertiger RC-Gesteinskörnungen.*

#### 3.4.2 Alternative Betone

Beim nachhaltigen Bauen muss der Energie- und Ressourcenaufwand über den gesamten Lebensweg eines Bauwerks optimiert werden. Bezogen auf Beton bedeutet dies, dass das Material so effizient wie möglich eingesetzt werden muss, um bei geforderter Festigkeit und Dauerhaftigkeit seine Funktion über die gewünschte Lebens- bzw. Nutzungsdauer zu erfüllen. Wichtige Aspekte sind dabei:

- Ein unter Berücksichtigung der Nutzungsdauer möglichst geringer stofflicher und energetischer Ressourcenaufwand der Betonherstellung
- Die Ausrichtung der Leistungsfähigkeit des Betons auf den Anwendungsfall und die erwartete Nutzungsdauer
- Die Verlängerung der Nutzungsdauer einer Betonkonstruktion durch intelligente Konzepte zur Anpassung bzw. Umnutzung

Die richtige Auswahl der stofflichen Ressourcen hängt von der geplanten Nutzung des Betonbauteils ab. Treibhausgasemissionen und Ressourcenverbrauch sollten bei der Beurteilung von Bauwerken daher immer lebenszyklusweit unter Berücksichtigung ihrer Funktionalität und Nutzungsdauer erfolgen.

Eine hohe Leistungsfähigkeit des Betons kann z. B. durch den Einsatz hochfester oder ultrahochfester Betone erfolgen. Hierzu muss der Ausbildungsstand der Architekten und Ingenieure im Hinblick auf die Möglichkeiten solcher Betone verbessert werden. Sie kann jedoch auch andere Eigenschaften etwa hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit betreffen. Eine Verlängerung der Nutzungsdauer einer Betonkonstruktion wird vor allem durch die Gebäudeplanung und die Bauausführung bestimmt.

In einer aktuellen Untersuchung wurden verschiedene Betone ökobilanziell verglichen. Hierbei wurden verschiedene alternative Betone mit Anteilen industrieller Nebenprodukte und von Reststoffen mit herkömmlichem Beton verglichen. Die alternativen Betone enthielten Gießereisande und Stahlwerksschlacke, recycelte Gesteinskör-

nungen aus Recyclingbeton und Flugasche als Zusatzstoffe. Es zeigte sich, dass alle eingesetzten Stoffe geeignet sind, entweder natürliche Gesteinskörnungen oder Portlandzementklinker in Beton teilweise zu ersetzen und so Ressourcen zu sparen. Besonders vorteilhaft waren Flugaschen und Gießereisande insbesondere in der Kombination mit RC-Gesteinskörnungen. Nachteilig können sich lange Transportwege auswirken, ökobilanziell wird das Ergebnis aber nicht notwendigerweise wesentlich beeinflusst. Neben dem Effekt der Ressourcenersparnis war insbesondere der verringerte Bedarf an Deponieraum relevant. Den größten Effekt auf das Treibhausgaspotenzial hatte der Einsatz von Flugaschen, da mit ihnen der Bedarf an Portlandzementklinker reduziert werden konnte. Dieser Effekt ist im Hinblick auf die begrenzte Verfügbarkeit der Flugasche zu relativieren. Bezogen auf die Treibhausgasemissionen ist der Effekt durch den Einsatz von RC-Gesteinskörnung mit einer Verringerung um 4 % relativ gering (Turk et al. 2015). Dies ist insofern zu erwarten, als auch die Aufbereitung von RC-Material energetisch aufwändig ist. Dagegen fällt die Einsparung von primären Mineralien wie Sand und Kies deutlich höher ins Gewicht. Insgesamt gilt jedoch, dass alle Stoffe keine Verunreinigungen in den Beton eintragen dürfen, die seine Dauerhaftigkeit gefährden oder seine Umweltverträglichkeit beeinträchtigen. Viele der theoretisch vorstellbaren Stoffe erfüllen diese Anforderung allerdings nicht.

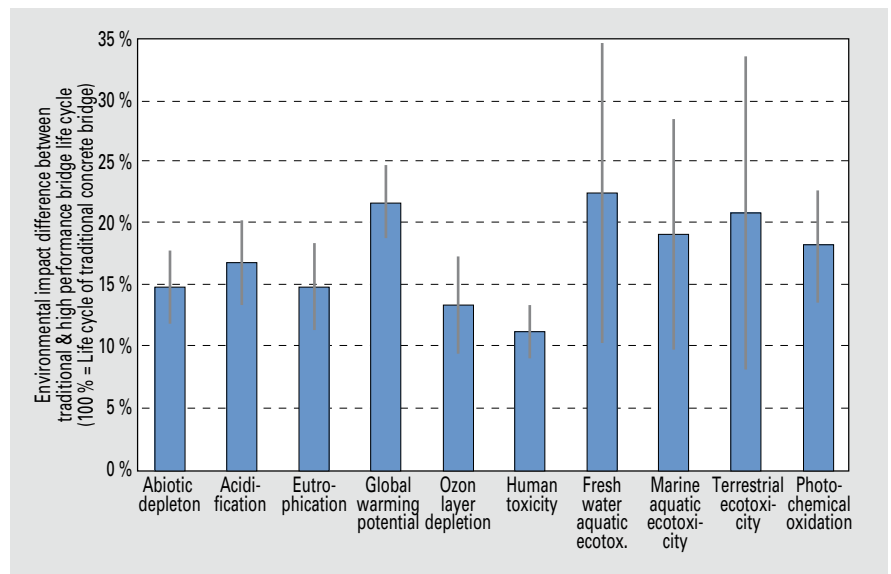
#### 3.4.3 Alternative Betonausgangsstoffe

Ein Potenzial zur Einsparung von CO<sub>2</sub>-Emissionen besteht weiterhin im Einsatz klinkereffizienter Zemente und der Verringerung des Portlandzementklinkeranteils im Beton. Dieser Weg wird von der deutschen Zementindustrie bereits beschritten, wie die Entwicklung des Inlandsversands zeigt (Anteil Portlandzement von 62 % in 2000 auf 29 % 2013). Neben der Verwendung von Zementen mit möglichst geringer Ressourcen- und Umweltbelastung erlauben die Betonnormen DIN 1045-2 bzw. EN 206 den Einsatz von Zusatzstoffen im Beton, wodurch der Zementanteil im Beton reduziert werden kann. Dafür kommen in Deutschland vor allem Steinkohlenflugaschen zum Einsatz. Hierdurch werden bislang erhebliche Mengen an Energie und

damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart. Da es sich bei Flugasche um einen alternativen Rohstoff handelt, können auch erhebliche Mengen an Rohstoffen eingespart werden. Allerdings sind Sekundärrohstoffe wie Flugaschen in ihrer Menge begrenzt bzw. in Folge der Energiewende tendenziell rückläufig.

Potenzial zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Verringerung des Portlandzementklinkeranteils besteht vor allem bei Beton normaler Festigkeit. Diese Betone machen derzeit den größten Teil der Betonproduktion aus. Durch Betonverflüssiger sowie eine Optimierung der Partikelgrößenverteilung und eine Verringerung des Wasserbedarfs kann der Bedarf an Portlandzementklinker im Beton deutlich reduziert werden. In Testreihen wurden die Eigenschaften von Beton mit reduziertem Wasser- und Zementgehalt untersucht. Eine Verringerung der Umweltbeeinflussung um bis zu 25 % verglichen mit dem deutschen Durchschnittszement bzw. 35 % verglichen mit Portlandzement konnte im Vergleich zu konventionellem Beton ermittelt werden. Beim Einsatz von marktüblichem Hochofenzement konnte der Einfluss um bis zu 60 % verringert werden, wobei die Ergebnisse abhängig von der gewählten Allokation sind (Proske et al. 2013).

Ein wichtiger Schritt bei der Erzeugung solcher Betone mit klinkereffizienten Zementen („Grüne Betone“) liegt in der Optimierung der Kornverteilung und damit der Erhöhung der Packungsdichte. Hierbei müssen die Korngrößenverteilungen der jeweiligen Rohstoffe bekannt sein und berücksichtigt werden. Dann ist es möglich, Beton mit sehr geringem Portlandzementklinkergehalt herzustellen. Ein verringerter Portlandzementklinkergehalt ist jedoch auch mit einer geringeren Festigkeit verbunden. Der Zementgehalt insgesamt kann nicht beliebig reduziert werden, da alle Partikel von Zement umhüllt sein müssen (Müller et al. 2014, Haist et al. 2014). Einschränkend kommt hinzu, dass die Verarbeitbarkeit bei sehr geringen Zementgehalten eingeschränkt wird und die Robustheit des Betons nicht mehr gegeben ist. Voraussetzung zur Herstellung von Beton mit deutlich reduziertem Portlandzementklinkergehalt ist daher auch eine hohe Präzision in der Fertigung mit einer entsprechenden Qualitätssicherung (Haist et al. 2014).



**Abbildung 7** Unterschiede hinsichtlich der Umweltbelastungen zwischen einer Brücke aus herkömmlichem und aus hochfestem Beton

Quelle: Habert et al. 2012

Anmerkung: Die Fehlerbalken repräsentieren die Standardabweichung.

#### Zwischenfazit

*Eine Verringerung des Portlandzementklinkeranteils von Betonen ist eine Möglichkeit zur Verringerung des Energie- und Ressourcenverbrauchs. Dieser Weg wird von der deutschen Zementindustrie bereits verfolgt. Eine weitere Verringerung des Portlandzementklinkergehalts im Beton insbesondere in Kombination mit nichtreaktiven Hauptbestandteilen (Kalkstein) erfordert jedoch gegenüber normalen Betonen eine verbesserte Qualitätskontrolle.*

#### 3.4.4 Betone mit verbesserter Leistung

Da sowohl die Herstellung als auch die Nutzung von Gebäuden mit Umweltbelastungen insbesondere durch den Energie- und Ressourcenverbrauch verbunden ist, muss es das Ziel sein, beide Lebenszyklusphasen zu optimieren. Dies kann etwa durch den Einsatz von Dämmstoffen erfolgen, aber auch durch eine Verringerung der Wärmeleitfähigkeit von Strukturbaustoffen.

**Leichtbeton, Porenbeton und Schaumbeton** sind etablierte Baustoffe mit einer teils deutlich reduzierten Wärmeleitfähigkeit, die sowohl (eingeschränkt) statische Aufgaben übernehmen können als auch der Gebäudedämmung dienen. Daneben benötigen sie aufgrund ihrer geringen Dichte weniger Rohstoffe für ihre Herstellung. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass z. B. bei der Herstellung von Porenbeton

Aluminiumpulver zur Porosierung eingesetzt wird, dessen Produktion mit einem hohen Energieaufwand einhergeht. Neben den etablierten Verfahren zur Herstellung dieser Betone ist die Herstellung von Schaumbeton z. B. auch auf der Basis von Geopolymeren möglich. Gegenüber Schaumbeton auf der Basis von Portlandzementklinker soll der Einsatz von Geopolymeren den Ressourcenverbrauch verringern. Allerdings sind Geopolymere nicht in den entsprechenden Mengen verfügbar und müssen aufwendig und mit hohem Energieeinsatz aktiviert werden (Natronlauge) (Zhang et al. 2014).

In Versuchen konnte gezeigt werden, dass die Wärmeleitfähigkeit von Beton etwa durch den **Einsatz von Aerogelen** deutlich reduziert werden kann. Hierbei zeigte sich, dass es bei sehr hohen Aerogelgehalten zu einer deutlichen Abnahme der Festigkeit kommt. Bei einem Aerogelanteil von 50 Vol.-% konnte eine Festigkeit von 20 MPa bei einer Wärmeleitfähigkeit von 0,55 W/mK gemessen werden. Damit liegt die Wärmeleitfähigkeit dieses Betons bei ca. 1/5 des herkömmlichen Betons. Diese Wärmeleitfähigkeit wird jedoch i.d.R. nicht ausreichen, um auf eine zusätzliche Dämmung zu verzichten (Ng et al. 2015). Die Wärmeleitfähigkeit gebräuchlicher Dämmstoffe liegt bei ca. 0,025-0,04 W/mK. Unberücksichtigt bleibt hierbei auch eine lebenszyklusweite Betrachtung des Ressourcenaufwands. Aerogele werden zwar immer wieder als potenzielle Wärmedämm-

stoffe diskutiert, sind jedoch in der Herstellung aufwändig.

Ein neuer Ansatz zur Material- und Ressourcenschonung liegt im **Einsatz von gradiertem Beton**. Hierbei werden Bauteile unter Berücksichtigung der Belastungen mit variablen Materialeigenschaften hergestellt. An Orten hoher Belastung kommen Betone hoher Festigkeit zum Einsatz und an Stellen geringer Belastungen z. B. poröse Betone. Derartige Verfahren eignen sich potentiell für die industrielle Fertigung von Betonteilen, sie befinden sich jedoch noch in der Entwicklung.

**Ultrahochfeste Betone** erlauben eine deutliche Verringerung der Bauteilmasse und somit andere Strukturen, als sie mit normalen Betonen möglich wären. Sie erfordern jedoch einen spezifisch höheren Zementeinsatz. Bezogen auf das Bauteilvolumen ist ultrahochfester Beton daher ökologisch nachteilig. Dies ändert sich jedoch, wenn die Funktionalität des Bauwerks betrachtet wird und andere Leistungsparameter wie die Dauerhaftigkeit mit betrachtet werden. Da ultrahochfeste Betone weniger Material bei gleicher oder verbesserter Funktionalität benötigen, können sie zur Steigerung der Ressourceneffizienz eines Bauteils bzw. Bauwerks beitragen.

Am Beispiel von zwei vergleichbaren realen Betonbrücken, eine aus herkömmlichem Beton, eine aus hochfestem Beton, konnte gezeigt werden, dass insgesamt die Nutzung hochfester Betone ökologisch vorteilhafter ist (Abb. 7). Das gilt insbesondere auch für die Treibhausgasemissionen (ca. -20 % bzw. -50 % bezogen auf die Erstellung ohne Instandhaltung) und den Verbrauch abiotischer Ressourcen gemessen als „abiotic resource depletion“. Hauptursache für die geringeren Umweltbelastungen sind die deutlich geringeren eingesetzten Materialmengen, die trotz höherer spezifischer Umweltbelastungen zu einer insgesamt deutlichen Umweltentlastung führen (Habert et al. 2012).

**Ultrahochfeste faserverstärkte Betone** (Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete [UHPFRC]) sind gut geeignet für die Reparatur bestehender Strukturen. Es konnte gezeigt werden, dass hierbei auch Betone „ECO UHPFRC“ mit niedrigem Portlandzementklinkergehalt hergestellt werden können, die Treibhausgas-

emissionen gegenüber UHPFRC und insbesondere herkömmlichem Beton einsparen (Habert et al. 2013). Aufgrund der geringen Portlandzementklinkergehalte wird dabei auch der Ressourcenverbrauch geringer ausfallen als bei Nutzung von herkömmlichem Beton.

Neben Stahl werden auch zunehmend **andere Armierungsmaterialien** eingesetzt. Der alleinige Austausch des Armierungsmaterials ist dabei weniger interessant als der Umstand, dass durch den Einsatz anderer Armierungsmaterialien z. T. auch die eingesetzten Materialmengen reduziert werden können und damit der Ressourcenverbrauch verringert werden kann. So konnte bei Betonröhren mit Kunstfasern (z. B. Aramid oder Polyvinylalkohol) die Leistungsfähigkeit des Betons erhöht, die eingesetzte Bewehrungsstahlmenge reduziert, die eingesetzte Betonmenge vermindert und das Rohrgewicht gesenkt werden (Peyvandi et al. 2013).

#### Zwischenfazit

*Porenbeton ist ein etablierter Baustoff, der aufgrund seiner vergleichsweise geringen Wärmeleitfähigkeit zu einer Verringerung des Energieverbrauchs in der Nutzungsphase von Gebäuden beitragen kann. Des Weiteren bietet Ultrahochfester Beton ein erhebliches Potenzial, insbesondere zur Schonung der Ressourcen wie auch zur Verringerung von Treibhausgasemissionen. Seine Verwendung bedeutet in der Praxis allerdings einen deutlich erhöhten Aufwand in der Planung und Bauausführung. Das gilt ähnlich für alternative Armierungsmaterialien, deren Potenziale bislang kaum ausgenutzt werden.*

#### 3.4.5 Verlängerung der Nutzungsdauer

Der Gebäudebereich ist in der EU für ca. 40 % der Treibhausgasemissionen und 50 % der abiotischen Ressourcenentnahme verantwortlich (European Commission 2011). Daher stellt die Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz (2010/31/EU) erhöhte Anforderungen an die energetische Qualität. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf der **Verringerung des Energieverbrauchs in der Nutzungsphase der Gebäude**. Jedoch ist auch die Herstellung der Gebäude mit einem erheblichen Energieverbrauch, insbesondere aber mit einem hohen Ressourcenverbrauch verbunden. Die Bauproduktenverord-

nung von 2011 formuliert Grundanforderungen an Bauwerke hinsichtlich der nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen inkl. der Wiederverwendbarkeit, dem Einsatz von RC-Baustoffen, der Dauerhaftigkeit und der Umweltverträglichkeit von Rohstoffen und Sekundärbaustoffen. Will man die für die Gebäudeerstellung benötigten Ressourcen sowie die eingesetzte „graue Energie“<sup>12</sup> reduzieren, so eignen sich dafür vor allem Techniken zur Optimierung der Gebäudestruktur und zur Minimierung von Kosten und Gebäudegewicht. Graue Energie und Kosten sind hierbei bei ansonsten gleichen genutzten Materialien gekoppelt (Yeo et al. 2011).

Ein grundlegender Schritt zur nachhaltigen Nutzung von Ressourcen besteht darin, **Gebäude und den eingesetzten Beton dauerhafter zu machen**, um damit die Nutzungsdauer zu verlängern und den Neubaubedarf zu reduzieren (Flatt et al. 2012). Dazu gehört auch, dass bei der Beurteilung von Zement die Korrosionsschutzwirkung für Stahl berücksichtigt wird, da diese bei einigen alternativen Zementen reduziert sein kann (Flatt et al. 2012). Im üblichen Hochbau ist die Lebensdauer des Betons in den seltensten Fällen der Grund für den Rückbau. Vielmehr wird die Nutzungsdauer i. d. R. durch sich ändernde Nutzungsanforderungen bestimmt.

Bislang wird der Aspekt der Lebensdauer bei der Auslegung der Gebäudestruktur häufig nur unzureichend berücksichtigt. Insbesondere werden Unterschiede zwischen verschiedenen Betonsorten nicht hinreichend in den Blick genommen. In der Folge werden (Un-)Sicherheitszuschläge angewandt. Eine bessere Berechnung der Modellierung der Bauteilbeanspruchung, sowohl mechanisch als auch chemisch, könnte daher zu einer Optimierung von Bauwerksstrukturen führen und den Ressourcenverbrauch der Gebäudeerstellung reduzieren (Müller et al. 2015).

Ein weiterer Gesichtspunkt der Nutzungsdauerverlängerung betrifft die **Instandhaltung**. So konnte bei einer Untersuchung von Hochhäusern in Hongkong ermittelt werden, dass ein großes Potenzial zur Einsparung von

<sup>12</sup> Mit „grauer Energie“ wird die Energiemenge bezeichnet, die für Herstellung, Transport, Lagerung, Verkauf und Entsorgung eines Guts benötigt wird.

Treibhausgasemissionen in der Instandhaltung von Gebäudeteilen liegt, die so nicht erneuert werden müssen und dadurch Herstellungsaufwand und Ressourcenverbrauch für neue Baustoffe sparen. Die Einsparpotenziale erreichen hierbei bis zu 17 % der mit der Gebäudeerstellung verbundenen Treibhausgasemissionen. Demgegenüber wurde für das Recycling der Baustoffe nur ein Einsparpotenzial von ca. 6 % ermittelt, wobei davon ausgegangen wurde, dass die mineralischen Bestandteile nicht recycelt werden (können) (Chau et al. 2012).

#### Zwischenfazit

*Mit einer Verlängerung der Nutzungsdauer von Gebäuden kann eine erhebliche Verringerung des Ressourcenverbrauchs verbunden sein. Wichtig ist hierbei, schon bei der Gebäudekonzeption und Baustoffwahl die gewünschte Nutzungsdauer sowie variable Nutzungsweisen zu berücksichtigen und eine wirksame Instandhaltung zu ermöglichen.*

#### 3.4.6 Vorfertigung

Die Vorfertigung von Bauteilen wird schon seit langer Zeit praktiziert. Seit Jahren ist dabei in Deutschland keine relevante Veränderung im Anteil der Zementlieferungen an Betonfertigteilhersteller (24,4 %) und Transportbetonhersteller (55,2 %) (VDZ 2015) von vorgefertigten Teilen zu erkennen. Die Vorfertigung weist zahlreiche Vorteile auf:

- Kosteneinsparung bei Nutzung standardisierter Teile
- Bessere Qualitätskontrolle
- Hohe Maßgenauigkeit und Qualität durch Vorfertigung unter kontrollierten Produktionsbedingungen
- Schnellere Bauausführung auf der Baustelle
- Vermeidung von Abfällen und Reduzierung des Ressourcenverbrauchs durch Fertigung großer Serien
- Höhere Arbeitssicherheit
- Vielnutzung der Schalung

Den Vorteilen gegenüber stehen vor allem:

- Eine geringere Flexibilität in der Fertigung
- Beschränkungen bei der Bauteilgröße infolge von Transportbeschränkungen (Tam et al 2014, FDB 2014).

Eine Optimierung ist bei der Betonfertigteilbauweise z. B. unter verschiedenen Aspekten möglich (FDB 2014):

- Eine statische Optimierung führt zu Materialeinsparungen
- Eine herstellungstechnische Optimierung auf wenige Bauteilquerschnitte führt zu weniger Abfall und einer kürzeren Produktionszeit
- Eine Optimierung der Betonrezeptur führt zu einer besseren Widerstandsfähigkeit und Dauerhaftigkeit

Aus diesen Vorteilen ergeben sich für vorgefertigte Betonbauteile gegenüber auf der Baustelle gefertigten Bauteile hinsichtlich des Energie- und Ressourcenverbrauchs sowie der Treibhausgasemissionen (Mao et al. 2013).

Ein wichtiger Schritt zur Verringerung der grauen Energie in Gebäuden besteht darin, die Gebäudemasse, und damit den Ressourcenverbrauch, zu minimieren. Mit dem Einsatz vorgefertigter Bauteile kann beides abhängig von den sonstigen Rahmenbedingungen sowie auch die Einsatzmenge von Bewehrungsstahl deutlich reduziert werden. Vor allem in Hinblick auf die eingesetzte Energie ist dieser Umstand wichtig, da der Bewehrungsstahl einen besonders hohen Beitrag zur grauen Energie leistet. So konnten bei Betondecken durch den Einsatz von vorgefertigten Elementen bis zu 29 % Beton, 65 % Stahl und 49 % graue Energie eingespart werden (Miller et al. 2015).

Häufig zeigen sich aber noch weitere Wechselwirkungen. So beeinflusst die statische Optimierung der Bauteilquerschnitte die Flexibilität und Umnutzungsfähigkeit der Tragstruktur, da möglicherweise auf Tragreserven verzichtet werden kann (FDB 2014).

Gegebenenfalls besteht bei der industriellen Fertigung von Bauteilen auch die Möglichkeit zur Nutzung von CO<sub>2</sub> bei der Betonherstellung und damit zur Verringerung der Treibhausgasemissionen der Betonherstellung. Hierzu

können wollastonit- und rankinitreiche Zemente eingesetzt werden, die nicht hydratisieren, sondern karbonatisieren und hierbei eingeleitetes CO<sub>2</sub> binden können. Der pH-Wert dieses Betons ist gegenüber herkömmlichem Beton verringert mit der Folge eines deutlich eingeschränkten Korrosionsschutzes für den eingesetzten Bewehrungsstahl. Daher wird hierbei i. d. R. nur korrosionsgeschützter Bewehrungsstahl eingesetzt werden können (Solidia Technologies 2013 und 2015).

#### Zwischenfazit

*Mit industrieller Vorfertigung von Bauteilen können z. T. erhebliche Ressourceneinsparungen bei abiotischen Rohstoffen wie bei Energierohstoffen erzielt werden. Hier besteht ein relevantes Potenzial zur Erhöhung der Rohstoffproduktivität.*

#### 3.5 Zwischenergebnis – Grenzen und Potenziale der Rohstoffproduktivität

Die Produktion von Zement erfolgt heute in Prozessen und Anlagen, die schon einen langen Optimierungsprozess hinter sich haben. Auch wenn viele Anlagen zur Herstellung von Portlandzementklinker bzw. darauf basierenden Zementen schon vergleichsweise alt und größere und modernere Anlagen grundsätzlich verfügbar sind, ist das Effizienzpotenzial bei der Zementherstellung relativ gering und kann kaum wirtschaftlich erschlossen werden.

Ähnliches gilt auch für die Möglichkeit, die schon bisher eingesetzten Sekundärrohstoffe noch stärker zu nutzen. Im Gegenteil ist unter der Annahme einer gleich bleibenden Zementproduktion fraglich, ob Sekundärrohstoffe wie Flugaschen, Hüttensand, REA-Gips oder Gießereialtsande angesichts der Energiewende und eines weiterhin stattfindenden Strukturwandels der industriellen Produktion im bisherigen Umfang bereitstehen werden.

Deutlich größeres Potenzial wird bei der Entwicklung alternativer Zemente gesehen, die sich zu energie- und ressourcenschonenden Alternativen zu herkömmlichen Zementen entwickeln können. Sie befinden sich jedoch derzeit noch im Entwicklungsstadium. Wichtig für ihre Weiterentwicklung ist insbesondere eine dauerhaft zuverlässige Rohstoffbasis. Die Zementherstellung selbst ist jedoch nur ein

Ansatzpunkt von mehreren bei der Verbesserung der Rohstoffproduktivität. Vielmehr besteht ein weitaus größeres Potenzial bei den damit verbundenen Produkten, in erster Linie beim Beton.

Da rezyklierte Gesteinskörnungen in Deutschland bereits weitgehend verwendet werden (> 90 %), besteht hier nur ein geringes Potential zur Verbesserung der Ressourcenschonung insgesamt. Eine weitere interessante Option ist die Verringerung des Portlandzementklinkergehalts von Betonen. Hierbei wurden bereits erhebliche Fortschritte erzielt. Bei der Verringerung des Portlandzementklinkergehalts über den derzeitigen Anteil hinaus ist noch Entwicklungsarbeit zu leisten.

Erhebliche Potenziale zur Erhöhung der Rohstoffproduktivität bestehen zudem insbesondere in der industriellen Vorfertigung (Betonfertigteile) sowie perspektivisch auch in der Nutzung von ultrahochfesten Betonen. Im Idealfall kann beides verknüpft werden. Wesentlich ist hierbei, dass die Möglichkeiten zur verbesserten Qualitätssicherung (Kontrolle der Zusammensetzung, der Bauteilbemessung usw.) genutzt werden, um insgesamt zu einer erheblichen Verringerung des Ressourcenverbrauchs bei verbesserter Funktionalität der Bauwerke zu gelangen. Dies erfordert einen höheren Aufwand in Planung und Bauausführung, ohne den signifikante Erhöhungen der Rohstoffproduktivität generell kaum möglich sind.

Insgesamt wird deutlich, dass entlang der Wertschöpfungskette von Zement und Beton unterschiedliche Potenziale zur Steigerung der Rohstoffproduktivität bestehen und im Hinblick auf ihre wirtschaftliche Umsetzbarkeit geprüft werden sollten. Während auf der Basis bestehender Technologien in einigen Bereichen die Potenziale ausgeschöpft sind bzw. eine wirtschaftliche Umsetzung verbliebener Möglichkeiten zur Zeit nur in begrenztem Umfang möglich erscheint, bestehen in anderen Bereichen relevante Potenziale zur Steigerung der Rohstoffproduktivität, die durch Forschung und Innovation ausgebaut werden können.

## 4 Rohstoffpolitik und Rohstoffproduktivität

In diesem Abschnitt beschäftigt sich die vorliegende Studie mit den ökonomischen, politischen und rechtlichen Rahmenbedingungen des Einsatzes von Primär- und Sekundärrohstoffen. In erster Linie soll ein Überblick darüber gegeben werden, welche politischen Maßnahmen zur Verbesserung der Rohstoffproduktivität und einer nachhaltigeren Rohstoffversorgung bereits bestehen und welche sich derzeit in der Diskussion befinden. Im Fokus steht hierbei das deutsche Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes), dessen erste Fassung seit 2012 vorliegt und für dessen Fortschreibung ein Entwurf im August 2015 zur Konsultation gestellt wurde (BMU 2012; BMUB 2015).

Generell vollzieht sich die Entwicklung der Rohstoffpolitik komplementär zur Energie- und Klimapolitik. Diese zielt auf den verminderten Einsatz fossiler Energieträger und verringerte Treibhausgasemissionen ab und fördert deshalb den Umstieg auf erneuerbare Energien und die Erhöhung der Energieeffizienz in Produktion und Konsum. Das hierzu existierende politische Instrumentarium ist bereits weit entwickelt (z. B. Emissionshandel) und soll deshalb hier nicht weiter betrachtet werden. Vielmehr liegt der Fokus auf rohstoffpolitischen Maßnahmen zur Steigerung der Rohstoffproduktivität. Diese Steigerung ist grundsätzlich über die Kombination von zwei Strategien zu erreichen: die gesteigerte Materiale- und Energieeffizienz entlang der gesamten Produktion-Konsum-Kette und den zunehmenden Einsatz alternativer Stoffe, mit denen primäre Rohstoffe substituiert werden können. Im Folgenden wird daher der Frage nachgegangen, inwieweit bestehende und in Entwicklung befindliche politische Maßnahmen die Umsetzung dieser Strategien befördern, indem sie zur Zielorientierung beitragen, regulative Anreize setzen und helfen, die Akteure insbesondere in der Zement- und Betonindustrie mit Informationen zu ver-

sehen, um deren Potenziale im Sinne einer gesellschaftlich nachhaltigen Entwicklung richtungssicher nutzen zu können.

### 4.1 Politische und rechtliche Rahmenbedingungen

Die Entwicklung der deutschen Ressourcenpolitik vollzieht sich im Kontext europäischer und internationaler Aktivitäten, die die Steigerung der Ressourceneffizienz zum Thema haben. So wird mit der **Leitinitiative „Ressourcenschonendes Europa“** der Strategie Europa 2020 (KOM [2011] 21) und dem darauf basierenden **„Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa“** (KOM [2011] 571) die Vision eines nachhaltigen Europas bis zum Jahr 2050 umrissen und ein Bündel von möglichen Maßnahmen beschrieben (Europäische Kommission 2011a, 2011b). Die „Ressourcenproduktivität“ wurde als Leitindikator für die Messung der Umsetzungsfortschritte der Leitinitiative und ihres Fahrplans benannt. Die Parameter, mit denen diese gemessen werden, können – wie in 2.1 erläutert – in ihrer Bezugsbasis schrittweise erweitert werden, um neben den direkten Materialeinsätzen auch deren indirekte materielle Vorleistungen („ökologische Rucksäcke“ oder „Material Footprints“) zu berücksichtigen. Trägt der Einsatz von dauerhaften Materialien wie Beton zur Einsparung von Rohstoffen bei und wird die Nutzungsdauer der daraus hergestellten Produkte weiter erhöht, so wird der Einspareffekt durch jene Indikatoren gesamtwirtschaftlich mit abgebildet und kann für einzelne Produkte spezifisch ermittelt werden.

Das **„Deutsche Ressourceneffizienzprogramm“** wurde in seiner ersten Phase (ProgRes I) mit dem Ziel implementiert, die Nutzung und Entnahme von natürlichen Ressourcen nachhaltig zu gestalten (BMU 2012). Der Fokus wurde vor dem Hintergrund einer umfassenden Systemperspektive bewusst auf den physischen Input der Wirtschaft gelegt. Demnach soll sich das Wirtschaftswachstum vom Einsatz natürlicher Ressourcen weitgehend entkoppeln und dadurch die Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands gestärkt werden. ProgRes I definiert 20 Handlungsansätze mit konkreten Maßnahmen, die allen gesellschaftlichen Akteuren einen langfristigen Orientierungsrahmen bieten sollen, wie die Bundesregierung

das Ziel der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie einer Verdopplung der Rohstoffproduktivität bis 2020 gegenüber dem Jahr 1994 erreichen möchte. Dies wird in Abschnitt 3.2 näher betrachtet werden.

In Deutschland haben sich in der Folge verschiedene Kommunikationsplattformen entwickelt, die den Informationsaustausch zum Thema Ressourceneffizienz zwischen den Akteuren in Politik, Wirtschaft und Wissenschaft fördern. Hierzu zählen das Netzwerk Ressourceneffizienz<sup>13</sup> und der Runde Tisch für Ressourceneffizienz im Bauwesen<sup>14</sup>.

Die deutschen und europäischen Aktivitäten sind wiederum flankiert von den Arbeiten verschiedener internationaler Organisationen, die ebenfalls die Steigerung der Ressourcenproduktivität und die Entkopplung des Wirtschaftswachstums von negativen Umweltauswirkungen anstreben.

Dazu zählt auch die Cement Sustainability Initiative (CSI) des World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), ein globaler Zusammenschluss von 24 führenden Zementherstellern mit Niederlassungen und Werken in mehr als 100 Ländern, die etwa 30 % der globalen Zementproduktion repräsentieren und sich in der Initiative für eine nachhaltige Entwicklung einsetzen.

Eine weitere Neuerung ist das „Minerals Intelligence Network for Europe“, das im Zuge eines EU-Projekts<sup>15</sup> eine Netzwerkstruktur sämtlicher geologischer Institute Europas geschaffen hat, die durch ein Webportal, ein Jahrbuch sowie vorausschauende Studien Informationen und Wissen über die europäischen Mineralressourcen vermittelt. Damit wird das Projekt einen wichtigen Beitrag zur European Innovation Partnership on Raw Materials (EIP RM) leisten und sowohl die politische Entscheidungsfindung bezüglich Rohstoffsicherheit und Anpassungsstrategien als auch Industrie, Gesellschaft, Kommunikations- und Bildungszwecke auf europäischer und globaler Ebene unterstützen.

#### 4.1.1 Zielorientierung im internationalen und EU-Kontext

Eine international vergleichende Analyse ergab, dass es bereits in einer Reihe von Ländern dezidierte, hinrei-

<sup>13</sup> <http://www.neres.de/startseite.html> (Zugriff am 25 Sep. 2015)

<sup>14</sup> [https://www.bau-umwelt.de/download/C6a5054d0X14de74cf330X4fdc/2\\_BMUB\\_Menzer.pdf](https://www.bau-umwelt.de/download/C6a5054d0X14de74cf330X4fdc/2_BMUB_Menzer.pdf) (Zugriff am 25 Sep. 2015)

<sup>15</sup> <http://www.minerals4eu.eu/index.php/about/work-package-2> (Zugriff 10. Sep. 2015)

chend konkrete Ressourcenschutzziele gibt (Bahn-Walkowiak et al. 2013). In den meisten Fällen wird die gesamte Volkswirtschaft adressiert; daneben gibt es in einigen Fällen auch konkrete sektorale Ziele. Bei den Zielen zu mineralischen Ressourcen werden überwiegend alle Rohstoffgruppen zusammengefasst, teilweise werden jedoch auch nur einzelne Rohstoffgruppen (z. B. kritische metallische Rohstoffe oder Bauminerale)<sup>16</sup> berücksichtigt.

Die **Ziele sind bislang überwiegend qualitativ**. Daneben dominieren Effizienz- bzw. Produktivitätsziele gegenüber absoluten Zielen. Absolute Ziele gibt es insbesondere für ausgewählte einzelne Rohstoffe. Dabei kommen unterschiedliche Indikatoren zur Anwendung. Im einfachsten Fall werden konkrete Obergrenzen der Entnahme in Tonnen pro Jahr für bestimmte Rohstoffe genannt. Andere Ziele beziehen sich auf Größen wie DMC (Domestic Material Consumption), DMI (Direct Material Input), TMR (Total Material Requirement) oder TMC (Total Material Consumption). Bei den Produktivitätszielen wird dabei der jeweilige Ressourcenindikator in Relation zu einer ökonomischen Größe gesetzt. Abhängig von der Wahl des Indikators werden bei der Ressourcennutzung nur der ökonomisch verwertete Anteil oder alle entnommenen Stoffe berücksichtigt. Problemverlagerungen, wie mögliche Verschiebungen zwischen inländischer und ausländischer Rohstoffgewinnung, werden bei den meisten Ressourcenschutzzielen bislang nicht berücksichtigt.

**Quantitative Ziele** für die Materialproduktivität bzw. Ressourcenproduktivität wurden in Europa von Deutschland, Italien, Österreich und Rumänien und für den Materialeinsatz von Italien, Österreich, Schweden, Schweiz und Ungarn formuliert<sup>17</sup>. Darüber hinaus zeigen die Ressourcenziele in nichteuropäischen Ländern, dass dem Thema der Abkopplung der wirtschaftlichen Entwicklung vom Verbrauch natürlicher Rohstoffe gerade bei führenden Wirtschaftsnationen eine wichtige Rolle beimessen wird.

**Japan** gehört zu den am weitest fortgeschrittenen Ländern bezogen auf die Zielentwicklung, da dieser Prozess bereits seit dem Jahr 2000 im Gang ist (Bahn-Walkowiak et al. 2007). Der *Second Fundamental Plan for a Sound*

*Material-Cycle Society* (2008) formuliert ein Materialproduktivitätsziel von 3.700 EUR/t (6.700 EUR/t ohne Steine und Erden), dazu eine Abfallobergrenze von 23 Mio. Tonnen zur Deponierung und eine Wiederverwertungsrate von 14-15 % bezogen auf den DMI im Jahr 2015. Die Fortschritte werden regelmäßig gemessen und die Zielmargen aktualisiert; es wird unterschieden zwischen fossilen und metallischen Ressourcen, nichtmetallischen Mineralien und Biomasse sowie zwischen inländisch extrahierten und importierten Rohstoffen. Neben dem DMI wird auch der RMI berichtet. Außerdem verfolgt das *Law on the Effective Utilization of Resources* (2001) einen sektoralen Ansatz mit entsprechenden Instrumenten und Vorgaben wie auch das *Construction Materials Recycling Law* (2002), das eine Mindestverwertung von 95 % von spezifizierten Baustoffen im Jahr 2010 vorsieht.

Die **USA** entwickeln die nachhaltige Verwendung von Ressourcen im vom US-amerikanischen Umweltministerium vorgelegten Konzept zum Sustainable Materials Management (2009), das sich auf verschiedene Materialien, Produkte und Dienstleistungen bezieht. Dieser insgesamt lebenszyklusbasierte Ansatz formuliert keine quantitativen Ziele, begründet aber die Senkung der extrahierten Mengen, die Priorisierung von erneuerbaren Rohstoffen und die Erhöhung der Materialeffizienz.

**China** strebt zwischen 2011 und 2015 die Steigerung der Ressourcenproduktivität (BIP/adjustierter DMC) um 15 % bei einem gleichzeitigen Wirtschaftswachstum von 7 % p.a. an, d.h. China zielt auf absolute Entkopplung. Dies ist ein noch nicht verbindliches Orientierungsziel, das in den Provinzen zunächst auf Realisierungsfähigkeit geprüft wird.

Für die **EU** hat die Europäische Plattform für Ressourceneffizienz<sup>18</sup> (European Resource Efficiency Platform - EREP) als hochrangig besetztes Gremium die Aufforderung formuliert, die Rohstoffproduktivität von 2008 bis 2030 um mindestens 30 % zu erhöhen. Diese soll als BIP/RMC gemessen werden, um den lebenszyklusweiten Rohstoffaufwand zu berücksichtigen, der mit dem Endverbrauch in der EU verbunden ist.

#### 4.1.2 Ökonomische Instrumente in anderen EU-Mitgliedsstaaten

In einigen Ländern Europas werden finanzielle Abgaben für Baustoffe bzw. Zuschlagsstoffe in Europa als Regulierungsinstrument eingesetzt, um Primärrohstoffe zu schonen und die Ablagerung von nicht verwerteten Bauabfällen zu vermindern. Mit der hier dargestellten Übersicht ist keine Bewertung hinsichtlich der Übertragungsmöglichkeiten nach Deutschland verbunden, was einer umfassenden Prüfung vorbehalten bleiben müsste.

Im europarechtlichen Kontext sind **Umweltsteuern und -gebühren** nach der „Kommissionsmitteilung über Umweltabgaben und -gebühren“<sup>19</sup> erlaubt, wenn sich die als Besteuerungsgrundlage dienenden Handlungen als eindeutig umweltschädigend auswirken. Als Zwecke sind sowohl die Einbindung der externen Effekte in die Preisbildung als auch die Lenkung zu umweltfreundlichem Verhalten denkbar. Finanzielle Abgaben oder Steuern zur Regulierung von Rohstoffentnahmen mit Blick auf die Umweltwirkungen bei der Extraktion, ihrem Einsatz und ihrer Entsorgung sind laut BDI (2010) nicht unmittelbar und eindeutig zu legitimieren, daher werden finanzielle Abgaben bzw. Steuern im Primärroh- und Baustoffbereich kontrovers diskutiert. Seitens der Baustoffindustrie wird angeführt, dass Rohstoffsteuern keinerlei Lenkungswirkung entfalten können, da die heimische Rohstoffwirtschaft nicht bedarfsweckend, sondern bedarfsdeckend produziert.

<sup>16</sup> Wie z.B. die Extraktionsobergrenze von 12 Mio. t Kies pro Jahr in Schweden oder die Verbrauchsobergrenze von 20 Mio. t Ölschiefer pro Jahr in Estland.

<sup>17</sup> Für rohstoffübergreifende Ziele siehe z.B. Ressourceneffizienz Aktionsplan (REAP) von Österreich (2012): Steigerung der Ressourceneffizienz um 50 % und Verminderung des Verbrauchs um 20 % bis 2020; National Environmental Technology Innovation Strategy (NETIS) (2011) von Ungarn: Senkung der Materialintensität auf 80 % bis 2020; National Resources Strategy (2009) von Finnland: Intelligente Nutzung der Ressourcen. Die angegebenen Quellen sind in Bahn-Walkowiak und Steger (2015) zu finden.

<sup>18</sup> [http://ec.europa.eu/environment/resource\\_efficiency/re\\_platform/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/resource_efficiency/re_platform/index_en.htm) (Zugriff 22 Sept. 2015)

<sup>19</sup> Mitteilung der Kommission vom 26. März 1997 über Umweltsteuern und -gebühren im Binnenmarkt (KOM(97)9 endg. - Amtsblatt C 224 vom 23.7.1997).

Praktische Erfahrungen mit den Effekten finanzieller Abgaben auf mineralische Rohstoffe sind in verschiedenen EU-Ländern gesammelt worden. Zu den Ländern, die nachweisbare Einkommen durch die Erhebung von Steuern auf Mineralrohstoffe erzielen, gehören z. B. Bulgarien, Dänemark, Großbritannien, Litauen, Lettland, Schweden sowie die Tschechische Republik. Dabei werden nicht nur unterschiedliche mineralische Rohstoffe besteuert oder mit Abgaben belegt, sondern auch unterschiedliche Besteuerungsgrundlagen (z. B. Abbaumenge, Abbaufäche, Marktwert) zugrunde gelegt. Die messbaren Wirkungen bzw. Effekte sind divers und nicht nur von der Höhe des preislichen Anreizes abhängig, sondern auch von einer möglichen Einbindung in ein gleichgerichtetes Politikbündel wie etwa der Implementation einer Depopierungssteuer. Weitere Aspekte sind Fragen der steuerlichen Begünstigung (Kommunal-, Landes-, Bundesebene) und die rechtlichen Möglichkeiten, die gewonnenen Einnahmen zielgerichtet für Umweltzwecke einzusetzen. Insgesamt kann man zwar von einer gewissen Diffusion des Instrumentes sprechen, es gibt aber weder einheitliche Instrumente noch Harmonisierungsbestrebungen auf der EU-Ebene.

Die bisherigen Praxiserfahrungen zeigen, dass Rohstoffentnahmeentgelte je nach Ausgangssituation eine lenkende Funktion besitzen können<sup>20</sup>. Allerdings ist vor der Einführung einer solchen Abgabe zu prüfen, welches Potenzial im konkreten Anwendungsfall damit verbunden sein kann. Das Beispiel Großbritannien zeigt, dass bei Einführung noch ungenutzte Potenziale realisiert werden konnten. Im aktuellen Vergleich mit Deutschland muss man eventuelle Erwartungen an ein solches Instrument freilich dahingehend relativieren, dass hierbei Baumineralien bereits eine sehr hohe Verwertungsquote des anfallenden Ausgangsmaterials für den Recyclingprozess auch ohne eine staatliche Abgabe erreicht werden konnte.

#### 4.1.3 Abfall- und produktbezogene Regelungen

Die hohe Verwertungsquote bei Bauabfällen in Deutschland geht auf die

erfolgreichen Aktivitäten zur Förderung der Kreislaufwirtschaft im Zusammenwirken von Politik und Wirtschaft zurück. So werden im Rahmen der Initiative **Kreislaufwirtschaft Bau** bereits seit 1996 regelmäßig Monitoring-Berichte zu Aufkommen und Verbleib mineralischer Bauabfälle veröffentlicht. Im aktuellen Monitoring-Bericht wird festgehalten, dass von den 192 Mio. t in 2012 angefallenen mineralischen Bauabfällen 91 % einer umweltverträglichen Verwertung zugeführt werden konnten. Auf diesem Wege konnten erfolgreich Primärrohstoffe geschont werden. Darüber hinaus wird die ab dem Jahr 2020 von der europäischen Abfallrahmenrichtlinie geforderte Verwertungsquote von 70 % bei Bau- und Abbruchabfällen in Deutschland bereits heute deutlich übertroffen (Initiative Kreislaufwirtschaft Bau 2012).

Der Einsatz von Ersatzbaustoffen ist einer Reihe von Rechtsnormen unterstellt. Diese umfasst insbesondere die **EU-Abfallrahmenrichtlinie** (2008/98/EG) (EC 2008) und ihre nationale Umsetzung in Form des **Kreislaufwirtschaftsgesetzes** (KrWG). Zweck dieses Gesetzes ist „die Förderung der Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen und die Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen“. Wichtiger Bestandteil des KrWG ist insbesondere auch die in ihm aufgestellte Hierarchie bei der Abfallbewirtschaftung:

- Vermeidung
- Vorbereitung des Materials zur Wiederverwendung
- Recycling
- Sonstige Verwertung
- Beseitigung

Auf Grundlage von § 33 KrWG wurde 2013 ein **Abfallvermeidungsprogramm** (AVP) verabschiedet, das eine Reihe von staatlichen Maßnahmen enthält, die sich am Lebenszyklus von Produkten orientieren und verschiedenen Akteure und Verantwortliche nennt (BMU 2013). Um den Erfolg von Abfallvermeidungsmaßnahmen zu messen, wird aktuell auf Indikatoren wie die Abfallintensität (Abfallaufkommen in den Wirtschaftsbereichen in Relation zu ihrer Wertschöpfung und Beschäftigtenzahl) sowie auf die Entwicklung der gesamtwirtschaftlichen

Rohstoffproduktivität verwiesen. Indikatoren zur Bewertung des Erfolgs einzelner Abfallvermeidungsmaßnahmen, die auch den Effekt auf spezifische Umweltwirkungen berücksichtigen, werden aktuell erforscht.

Weitere wichtige Aspekte des KrWG sind insbesondere die Vorgaben zur Förderung des Recyclings. Dies gilt für Getrennthaltungspflichten (Einführung von getrennter Sammlung von Papier, Metall, Kunststoff, Glas bis 2015) und die Recyclingquoten bis 2020, die für Papier, Metall, Kunststoff, Glas 50 % vorsehen. Die Zielquote für Bau- und Abbruchabfälle von 70 % wurde wie oben beschrieben bereits deutlich übertroffen. Allerdings sollte dabei nicht übersehen werden, dass es sich bei dieser Verwertung im Wesentlichen um ein sogenanntes „Down-Cycling“ handelt, da die aus Abbruch und Abfall im Hochbau entstehenden Recyclingmaterialien (RC-Gesteinskörnungen) vorwiegend im Tiefbau eingesetzt werden. Solange dadurch gesamtwirtschaftlich Primärrohstoffe eingespart werden können – und dies lässt sich aktuell eindeutig feststellen – ist dieses Vorgehen durchaus sinnvoll. Dass sich künftig weitere, noch auf ihre ökologische und ökonomische Effektivität hin zu prüfende Optionen ergeben könnten, wird weiter unten erläutert.

Im europäischen Kontext ist die neue **Bauprodukten-Verordnung** (BauP-VO) seit dem 1. Juli 2013 in Kraft, die die seit 1989 geltende Bauprodukten-Richtlinie (BPR) abgelöst hat. Bauprodukte dürfen danach nur in den Verkehr gebracht werden, wenn sie dazu beitragen, dass das Bauwerk, in das sie verbaut werden, wesentliche Anforderungen erfüllen kann. Dazu gehören u.a. die Energieeinsparung, der Wärmeschutz und der Umweltschutz. Die „Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen“ ist in dieser EU-Verordnung als eine Grundanforderung eingearbeitet worden (Verordnung [EU] Nr. 305/2011) und sieht unter Punkt 7 vor: „Das Bauwerk muss derart entworfen, errichtet und abgerissen werden, dass die natürlichen Ressourcen nachhaltig genutzt werden und Folgendes gewährleistet ist, d.h.

- Das Bauwerk, seine Baustoffe und Teile müssen nach dem Abriss recycelt werden können.
- Das Bauwerk muss dauerhaft sein.

<sup>20</sup> Ausführlich in Bahn-Walkowiak und Steger (2013).



- Für das Bauwerk müssen umweltfreundliche Rohstoffe und Sekundärbaustoffe verwendet werden.“

In Deutschland erfolgte die weitere Umsetzung durch das zur Ausführung der EU-Bauprodukten-Verordnung im Dezember 2012 geänderte **Bauproduktengesetz** (BauPG), in dem ebenfalls die Grundanforderung enthalten ist, dass Bauwerke so zu entwerfen und zu errichten sind, dass die eingesetzten natürlichen Ressourcen nach dem Abriss wiederverwendet oder recycelt werden können.

Es ist daher damit zu rechnen, dass in der Folge die Nachfrage von recyclingbasierten Baustoffen bzw. Baustoffen mit einem höheren Anteil an Sekundärrohstoffen steigen wird.

#### 4.1.4 Normen und Richtlinien

Es existieren zahlreiche Normen, die Anforderungen an Baustoffe definieren. Grundsätzlich gelten die in einschlägigen Normen für Baustoffe angelegten Funktionserfordernisse unabhängig davon, ob sie aus natürlichen oder Sekundärrohstoffen hergestellt wurden. Letztere müssen je nach Einsatzbereich die gleiche Funktionalität aufweisen. Darüber hinaus gibt es eine Reihe von Normen, die speziell den Einsatz von alternativen Materialien regeln.

Die Zusammensetzung von Zement wird durch eine Reihe von Normen definiert. Im Zentrum steht dabei die europäische **Norm für Normalzemente** EN 197-1<sup>21</sup>. Darin werden unter anderem Anforderungen an die Zusammensetzung von in der Zementherstellung eingesetzten Sekundärrohstoffen wie Hüttensand, Puzzolane oder Flugaschen gestellt. Maßgeblich für die Anforderungen sind sowohl die Eignung als Zementrohstoff und damit Anforderungen hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung als auch Anforderungen hinsichtlich der Einhaltung technischer Parameter wie Raumbeständigkeit und Druckfestigkeit. Unabhängig von den eingesetzten Rohstoffen müssen die jeweiligen Anforderungen etwa hinsichtlich Anfangsfestigkeit, Erstarrungsbeginn, Raumbeständigkeit, Sulfat- und Chloridgehalt oder Hydratationswärme erfüllt werden.

Bei Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel spezifiziert insbesondere

DIN 4226-100 Teil 100 die **Anforderungen an Rezyklate**. Sie verweist hinsichtlich der geometrischen, physikalischen und chemischen Anforderungen auf DIN 4226-1, die inzwischen durch DIN EN 12620 „Gesteinskörnungen für Beton“ ersetzt wurde. DIN 4226-100 regelt die zulässigen Zusammensetzungen von Gesteinskörnungen und legt abhängig vom Liefertyp auch Grenzen für den Einsatz von alternativen Materialien fest, die nicht DIN 4226-1 entsprechen. Daneben werden Anforderungen an Kornrohichte und säurelösliche Chloride definiert ebenso wie Anforderungen an die Überwachung der Herstellung von sekundären Gesteinskörnungen und notwendige Lieferangaben.

Für den **Einsatz von industriellen Nebenprodukten** gibt es eine Reihe von Normen, etwa hinsichtlich des Einsatzes von Eisenhüttenschlacken und Metallhüttenschlacken [DIN 4301] im Bauwesen (Straßenbau, Wegebau, Bau sonstiger Verkehrsflächen; Erdbau; Wasserbau; Gleisbau; Beton, Estrich, Mörtel Zement). Hierbei werden Anforderungen an Schlacken für die jeweiligen Einsatzgebiete definiert, wobei hier auf die jeweiligen Technischen Regeln für die einzelnen Einsatzgebiete verwiesen wird. Grundsätzlich müssen die auch für andere Baustoffe in den jeweiligen Anwendungen geltenden Anforderungen hinsichtlich des Schutzes von Boden und Gewässern eingehalten werden.

In den **VDI-Richtlinien** zur Ressourceneffizienz, die die VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (VDI-GEU) und das VDI Zentrum Ressourceneffizienz gemeinsam erstellen, werden methodische Grundlagen zur Bewertung von Ressourceneffizienz und Rohstoffeinsatz erarbeitet.

Es sollen die Primärenergieverbräuche und die eingesetzten Stoffe und Rohstoffe, deren Kritikalität und die mit ihnen verbundenen Umweltbelastungen in einem einheitlichen methodischen Bewertungsrahmen zusammengefasst werden. Auf dieser Grundlage werden dann weitere VDI-Richtlinien, insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen, als Branchenleitfäden erarbeitet.

Der vorliegende Entwurf der **VDI-Richtlinie 4800 Blatt 1 Ressourceneffizienz – Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien** soll dabei helfen, „na-

türliche Ressourcen zu schonen, insbesondere den Einsatz von Rohstoffen (einschließlich Wasser) zu reduzieren, die Inanspruchnahme der Flächen zu mindern und ihre Degradation zu vermeiden, Umweltbelastungen zu mindern, und somit die Lebensgrundlagen jetziger und zukünftiger Generationen zu erhalten“<sup>22</sup>.

Der Bewertungsrahmen dieser Richtlinie definiert Ressourceneffizienz als ein Verhältnis aus quantifizierbarem Nutzen und dem assoziierten Aufwand an natürlichen Ressourcen. Dabei werden eine Reihe von Indikatoren eingesetzt, z. B. der kumulierte Rohstoff- und Energieaufwand sowie die Bewertung der Umweltwirkungen und Ökosystemleistungen inkl. der Senkenfunktion der Natur. Zudem weist die Richtlinie auf die mögliche „Optimierung der Ressourcennutzung in allen Phasen des Produktlebenszyklus (Rohstoffgewinnung, Produktion und Fertigung, Nutzung und Ende der Lebensphase) und im Produktionssystem“ hin und beschreibt Strategien und Maßnahmen für Unternehmen und Dienstleistungsanbieter zur Hebung dieser Potenziale.

Die geltende **VDI-Richtlinie 4600 zum Kumulierten Energieaufwand (KEA)** beschreibt, wie der Primärenergieaufwand entlang von Prozessketten lebenszyklusweit für Produkte wie Halb- und Fertigwaren bestimmt werden kann. Der KEA gilt als wichtiger Kennwert für die ökologische Bewertung von Produkten und Dienstleistungen. Er kann insbesondere in energieintensiven Industrien herangezogen werden, um Optionen der Energieeffizienz zu vergleichen. Er ist damit auch im Bereich der Zementherstellung und Bauprodukte relevant. Dabei sind auch Beispieldaten für KEA und begleitender Emissionen für die Herstellung von ausgewählten Metallen, Bau- und Kunststoffen am Ende der Richtlinie zusammengestellt.

<sup>21</sup> Die EN 197-1 ist als erste harmonisierte europäische Norm für ein Bauprodukt zum 1.4.2001 in Kraft getreten und musste mit einer einjährigen Übergangsfrist in allen EU-Ländern verbindlich eingeführt werden. 2011 erschien eine überarbeitete Version, die auch Zemente mit hohem Sulfatwiderstand und Hochofenzemente mit niedriger Anfangsfestigkeit regelt. Aktuell wird die Norm im Lichte der seit Juli 2013 in Kraft getretenen Bauproduktenverordnung erneut überarbeitet (VDZ 2015c).

<sup>22</sup> Weißdruck: [https://www.vdi.de/richtlinie/entwurf\\_vdi\\_4800\\_blatt\\_1-ressourceneffizienz\\_methodische\\_grundlagen\\_prinzipien\\_und\\_strategien/](https://www.vdi.de/richtlinie/entwurf_vdi_4800_blatt_1-ressourceneffizienz_methodische_grundlagen_prinzipien_und_strategien/) (Zugriff 10. Sep. 2015).

Folgende weitere Richtlinien sind derzeit in Bearbeitung:

- VDI 4800 Blatt 2 Ressourceneffizienz – Bewertung des Rohstoffaufwands (vgl. 2.1)
- VDI 4800 Blatt 3 Ressourceneffizienz – Indikatoren zur Bewertung von Umweltwirkungen
- VDI 4801 Ressourceneffizienz in kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU)

#### 4.2 Von ProgRes I zu ProgRes II – Die Entwicklung des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms

Das Deutsche Ressourceneffizienzprogramm wurde 2012 für einen Zeitraum von vier Jahren beschlossen (ProgRes I). Im August 2015 legte das BMUB zusammen mit einem Fortschrittsbericht den Entwurf für die zweite Phase von 2016 bis 2020 (ProgRes II) zur öffentlichen Konsultation vor. Das Ziel von ProgRes ist es, „die Stoff- und Energieflüsse umweltverträglicher zu gestalten und so naturverträglich wie möglich innerhalb der Belastbarkeitsgrenzen des Planeten zu wirtschaften“ (BMUB 2015, 9). Die Leitideen bleiben auch bei ProgRes II unverändert:

- Ökologische Notwendigkeiten mit ökonomischen Chancen, Innovationsorientierung und sozialer Verantwortung verbinden
- Globale Verantwortung als zentrale Orientierung der nationalen Ressourcenpolitik sehen
- Wirtschafts- und Produktionsweisen in Deutschland schrittweise von Primärrohstoffen unabhängiger machen, die Kreislaufwirtschaft weiterentwickeln und ausbauen
- Nachhaltige Ressourcennutzung durch gesellschaftliche Orientierung auf qualitatives Wachstum langfristig sichern

Während ProgRes I den Fokus auf die nicht-energetischen abiotischen Rohstoffe und die stoffliche Nutzung biotischer Rohstoffe legt, wird der Gel-

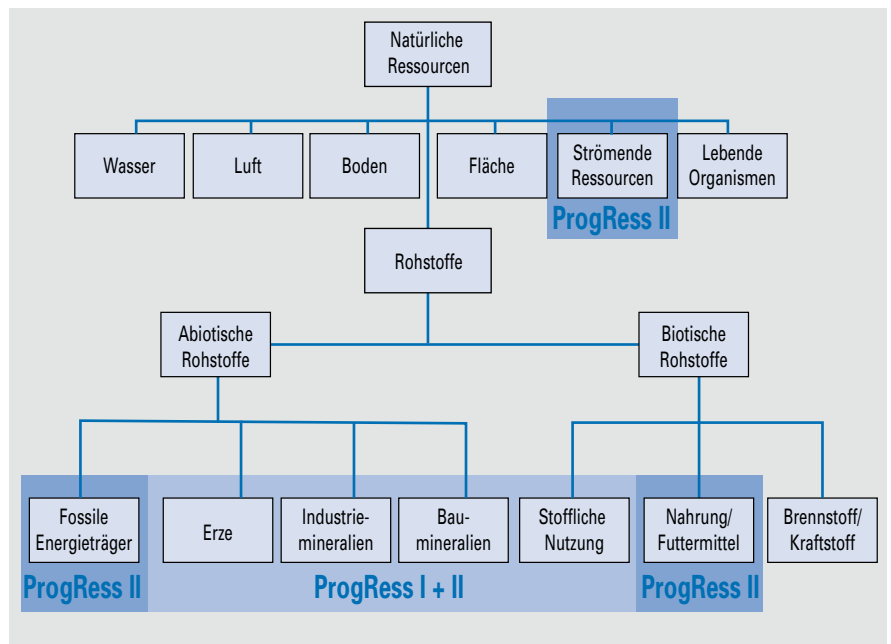


Abbildung 8 Übersicht der von ProgRes I und II berücksichtigten Ressourcen und Rohstoffe

Quelle: BMUB 2015

tungsbereich von ProgRes II um die fossilen und biotischen Energieträger erweitert (Abb. 8). Bei den Ressourcen werden zudem strömende Ressourcen wie Solar- und Windenergie explizit einbezogen.

Der bisherige Indikator zur Messung der abiotischen Rohstoffproduktivität (BIP/DMI<sub>abiot</sub>) und das Ziel seiner Steigerung bis 2020 – beide mit der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie vorgegeben – sollen um weitere volkswirtschaftliche, kreislaufwirtschaftliche und produktspezifische Indikatoren und Ziele ergänzt werden.

Der inländische Rohstoffeinsatz soll nun auch auf der Basis des RMI ausgewiesen werden. Dieser Indikator bezieht Rohstoffaufwendungen von Vorleistungen bei den importierten Gütern mit ein (siehe 2.1). Dies ist im Sinne einer umfassenden Lebenszyklusperspektive ein wesentlicher Fortschritt. Verlagerungen von inländischer Rohstoffentnahme in andere Regionen können so hinsichtlich ihres Nettoeffekts auf die Rohstoffanspruchnahme berücksichtigt werden. Auch umfasst der RMI sowohl abiotische wie biotische Rohstoffe. Nach den Methodenrichtlinien von Eurostat und OECD beinhaltet der RMI auch sämtliche Rohstoffkategorien: fossile Energieträger, Erze, Industriemineralien, Baumineralien, stofflich und energetisch genutzte Biomasse so-

wie Nahrungs- und Futtermittel. Die vollständige Erfassung aller Rohstoffe erscheint damit zumindest auf der Basis der vorgesehenen Indikatoren gewährleistet.

##### 4.2.1 Indikatoren und Ziele in ProgRes II

Laut aktuell vorliegendem Entwurf wird ProgRes II als Messzahl künftig die **Gesamtrohstoffproduktivität** einführen, die das Bruttoinlandsprodukt (BIP) um den Wert der Importe erweitert und ins Verhältnis zum Rohstoffeinsatz (RMI) setzt. Der deutsche Rohstoffverbrauch (RMC), der sich aus dem Endverbrauch von Gütern im Inland ergibt (d.h. ohne Exporte), soll künftig auch pro Person ausgewiesen werden.

Dabei bezieht sich ProgRes II nun auch explizit auf den Indikator Energieproduktivität und die gültigen Ziele aus der Nachhaltigkeitsstrategie und dem Energiekonzept 2050 („Verdopplung der Energieproduktivität 1990-2020“<sup>23</sup> sowie „Senkung des Primärenergieverbrauchs um 20 % bis 2020 und 50 % bis 2050 auf Basis von 2008“<sup>24</sup>).

Das bestehende Ziel für die abiotische Rohstoffproduktivität der Nachhaltigkeitsstrategie, die Verdopplung von BIP/DMI<sub>abiot</sub> im Zeitraum von 1994-2020 wird weiter verfolgt. Da der zugrunde liegende Indikator als unzureichend angesehen wird, ist bei

<sup>23</sup> Nachhaltigkeitsstrategie 2008, Fortschrittsbericht 2012.

<sup>24</sup> Energiekonzept der Bundesregierung 2010.

Tabelle 8 Gegenüberstellung der Ziele und Indikatoren von ProgRes I und ProgRes II

Ziele & Indikatoren		ProgRes I	ProgRes II
Gesamtwirtschaft	Geltungsbereich	abiotische Rohstoffe: Erze, Industriemineralien, Baumineralien; biotische Rohstoffe: stoffliche Nutzung von biotischen Rohstoffen	zusätzlich: energetisch genutzte Rohstoffe: fossile Energieträger und biotische Brenn- und Kraftstoffe strömende Ressourcen
	Rohstoffproduktivität „Verdopplung 1994-2020“	Rohstoffproduktivität (BIP/DMI abiotisch)	zusätzlich: Gesamtrohstoffproduktivität [BIP + Importe/RMI] (inkl. Biotik und Vorketten); Pro-Kopf-Rohstoffverbrauch: RMC/Person; Zielbestimmung jeweils durch Fortschreibung der Trends 2000-2010 bis 2030
	Energieproduktivität „Verdopplung 1990-2020“	Querbezug aus der Nachhaltigkeitsstrategie übernommen: Energieproduktivität (BIP/Primärenergieverbrauch)	Übernahme bereits beschlossener Ziele; Senkung des Primärenergieverbrauchs: Senkung um 20 % bis 2020 (Basis 2008); Senkung um 50 % bis 2050 (Basis 2008)
Kreislaufwirtschaft	Senkung des Primärmaterialbedarfs durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen	ja, ohne Zielvorschlag	Analyse des DERec und langfristige „Steigerung des Anteils am DMI“*
	Schonung von Primärrohstoffen durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen	ja, ohne Zielvorschlag	Analyse des DIERec und langfristige „Steigerung des Anteils am DMI“*
	Steigerung des Einsatzes von RC-Baustoffen	ja, ohne Zielvorschlag	Signifikante Steigerung der Einsatzquote von RC-Gesteinskörnungen als Betonzuschlagstoff bis 2030

\* Erläuterung s. Text

Quelle: Eigene Zusammenstellung auf Basis BMU 2012 und BMUB 2015

ProgRes II ein weiteres Ziel vorgesehen, das auf Basis der Gesamtrohstoffproduktivität ( $[BIP+Importe]^{25}/RMI$ ) definiert werden soll. Hier wird das Ziel aus der Fortschreibung des Trends aus dem Zeitraum 2000-2010 bis 2030 abgeleitet. Die gleiche Trendfortschreibung wird für den absoluten Rohstoffverbrauch (RMC/Kopf) als Zielbeschreibung vorgesehen. Nach wie vor sind ungenutzte Entnahmen nicht Teil des Indikatorensystems; sie werden aber im Fortschrittsbericht 2012-2015, der Teil des neuen Programmentwurfs ist, spezifisch ausgewiesen.

Es ist bislang unklar, welche Daten zur Bestimmung von BIP und dem Wert der Importe herangezogen wurden (nominal oder normiert). Die Methode zur Bestimmung des RMI (und des RMC) durch DESTATIS wurde bislang noch nicht transparent dargestellt und im Hinblick auf die Konsistenz mit den Methodenrichtlinien von Eurostat und OECD sowie die Kohärenz mit den von ProgRes beabsichtigten Wirkungen überprüft.

Für die Zementindustrie relevant ist neben der gesamtwirtschaftlichen Perspektive vor allem der Bereich **Kreislaufwirtschaft**. Die „Senkung des Primärmaterialbedarfs durch den Einsatz

von Sekundärrohstoffen“ soll mit Hilfe des Indikators DERec (DirectEffectsof-Recovery) abgebildet werden, der als Pendant zum DMI herangezogen wird. DERec ist eine virtuelle Kenngröße, die abbildet, in welchem Umfang Primärrohstoffe, Halb- und Fertigwaren im Inland gewonnen oder importiert werden müssten, wenn – unter ansonsten gleichen Produktionsmustern – im Inland keine Verwertung stattfinden würde. Analog soll der Indikator DIERec (Directand Indirect Effectsof Recovery) als Pendant zum RMI abbilden, welche Primärrohstoffe ohne Verwertungsmaßnahmen aufgewendet werden müssten. Mit seiner Hilfe soll die „Schonung von Primärrohstoffen durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen“ ermittelt werden. Der Entwurf von ProgRes II führt aus, dass die wissenschaftlichen Analysen zur Bestimmung der beiden Indikatoren noch laufen, und dass nach deren Abschluss geprüft werden soll, welche Rohstoffeinsparungen durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen in den kommenden Jahren aus umweltpolitischer Sicht angemessen und realistisch erreichbar sind.

Des Weiteren wird die „Steigerung des Einsatzes von RC-Baustoffen“ gefordert und mit dem Ziel versehen, hier

bis 2030 eine signifikante Erhöhung zu erreichen. Dies bezieht sich explizit auf die Einsatzquote von RC-Gesteinskörnungen als Betonzuschlagsstoff am Gesamtaufkommen mineralischer Recyclingbaustoffe. Auch die Wiederverwertung in der Gipsindustrie soll erhöht werden.

Auf der **produktspezifischen Ebene** wird darauf abgehoben, dass in der Phase 2016 bis 2020 bis zu 100 % der neuen und novellierten Durchführungsverordnungen zur Ökodesignrichtlinie mit Materialeffizienzanforderungen unterlegt werden sollen, sofern das für die jeweilige Produktgruppe von Relevanz ist. Ferner sieht der Entwurf von Progress II die Stärkung der ressourceneffizienten öffentlichen Beschaffung in der Bundesverwaltung durch Erhöhung der Quote der produktbezogenen Ressourceneffizienzanforderungen auf 100 % bis 2020 vor. Die Ökodesignrichtlinie bezieht sich vorrangig auf energieverbrauchsrelevante Produkte,

<sup>25</sup> Die Erweiterung des ökonomischen Parameters von BIP zu BIP + Importe erfolgt aus der Überlegung heraus, dass damit eher das ökonomische Pendant zum RMI (2.1) gegeben ist, bei dem die kumulierten Rohstoffaufwände der Importe erfasst werden.

**Tabelle 9** Übersicht der von ProgRes II (Entwurf) vorgeschlagenen Maßnahmen mit Relevanz für die Zementindustrie

Instrumentierung/Maßnahmen	Für die Zementindustrie potenziell interessante bzw. relevante Maßnahmenvorschläge in ProgRes II
Nachhaltige Rohstoffversorgung sichern	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Umwelt-, Sozial-, Transparenzstandards international stärken</li> <li>– Nachhaltiges Lieferkettenmanagement</li> </ul>
Ressourceneffizienz in der Produktion	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Ausbau Förderprogramme material- und energieeffizienter Techniken + Informationsaustausch</li> <li>– Ausbau der flächendeckenden RE-Beratung</li> <li>– Stärkere Berücksichtigung von EMAS und ISO 50001 in Förderprogrammen und im Rahmen der öffentlichen Beschaffung sowie Kopplung an staatliche Vergünstigungen</li> </ul>
Produkte und Konsum ressourcenschonender gestalten	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Aktionsprogramm für nachhaltigen Konsum, Anforderungen an öffentliche Beschaffung</li> <li>– Das Handlungsfeld ist vorrangig auf Gebrauchsprodukte ausgerichtet.</li> </ul>
Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft ausbauen	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Verstärkter Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen im Hoch- und Tiefbau → Verankerung einer Getrennterfassungspflicht beim Abbruch in der Gewerbeabfallverordnung sowie ein Diskriminierungsverbot bei öffentlichen Ausschreibungen</li> <li>– Harmonisierung verschiedener Rechtsgrundlagen in der Mantelverordnung (Novelle Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung, Novelle Deponieverordnung sowie Erarbeitung einer Ersatzbaustoffverordnung (in dieser Legislaturperiode)</li> <li>– Entwicklung von Modellen für die Bewertung von Sekundärrohstoffen aus anthropogenem Lager (Urban Mining)</li> </ul>
Nachhaltiges Bauen/Stadtentwicklung	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Quartiere und Bauwerke ressourcenschonend gestalten:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>(a) Weiterentwicklung des Leitfadens „Nachhaltiges Bauen von Bundesbauten“</li> <li>(b) Stärkung des Einsatzes von Bauprodukten aus nachwachsenden Rohstoffen</li> <li>(c) Bewertungssysteme zum nachhaltigen Bauen entwickeln</li> </ul> </li> <li>– Kennzeichnung von Bauprodukten (Rohstoffanspruchnahme, Umweltwirkungen, Gesundheitswirkungen, Recyclingfähigkeit); Ergänzung der Umweltproduktdeklaration auf europäischer Ebene; Einfordern von Silber- und Goldstandard für Bundesbauvorhaben</li> <li>– Zusammenarbeit mit Wohnungswirtschaft und Verbraucherverbänden → Zertifizierungsprozess → geplant ist eine Förderung durch KfW-Bankengruppe von Ein- bis Fünffamilienhäusern mit Nachhaltigkeitszertifikat (ab 2016)</li> <li>– Rückbau nicht mehr benötigter Bauwerke und Rückgewinnung von Baustoffen aus Infrastrukturen</li> <li>– Stärkung der Kreislaufführung von Bauprozessen: recyclinggerechte Dokumentation, selektiver Rückbau, Informationsportal</li> </ul>
Übergreifende Instrumente	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Berichtspflichten: Resource Key Performance Indicators im Rahmen der Unternehmensberichterstattung</li> <li>– Bewertungsmethoden zur Ressourcenschonung entwickeln, Einbeziehung in Normung und Richtlinien; Datenbasis verbessern</li> <li>– Forschung und Innovation in und mit Unternehmen stärken</li> </ul>

\* Erläuterung s. Text  
 Quelle: Eigene Zusammenstellung

bei deren Durchführungsverordnungen zunehmend Materialeffizienzkriterien adressiert werden sollen. Bauprodukte werden in diesem Zusammenhang nicht erwähnt. Anforderungen an diese ergeben sich indirekt aus den einschlägigen Handlungsanforderungen (s.u.).

**4.2.2 Handlungsansätze**

Die Handlungsansätze 2016-2019 des Entwurfs zum Fortschreibungsbericht des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms (BMUB 2015) enthalten insgesamt 116 Maßnahmenvorschläge aus den Handlungsfeldern

- Nachhaltige Rohstoffversorgung sichern

- Ressourceneffizienz in der Produktion
- Produkte und Konsum ressourcenschonender gestalten
- Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft ausbauen
- Nachhaltiges Bauen und nachhaltige Stadtentwicklung
- Ressourcenschonende IKT
- Übergreifende Instrumente

Insgesamt ist der abfall- und baupolitische Bereich des Programms grundlegend und stark ausgeweitet worden. Tabelle 9 gibt eine Übersicht

über die im Entwurf für ProgRes II vorgeschlagenen Maßnahmen mit Relevanz für die Zementindustrie.

**4.3 Zwischenergebnis – Umsetzungsmöglichkeiten und Mitwirkungsoptionen der deutschen Zementindustrie**

Die im Entwurf von ProgRes II für 2016 - 2019 vorgesehenen Handlungsansätze werden hier näher betrachtet, um zu prüfen, welche von besonderer Relevanz für die Zementindustrie sind, welche Möglichkeiten bestehen, diese proaktiv umzusetzen, und inwieweit eventuelle Zielkonflikte im Hinblick auf Versorgungssicherheit und Wettbewerbsfähigkeit bestehen.

Das **Handlungsfeld „Nachhaltige Rohstoffversorgung sichern“** ist in erster Linie auf die Importe bergbaulich gewonnener Rohstoffe ausgerichtet mit einem Schwerpunkt auf Afrika. Umwelt-, Sozial- und Transparenzstandards bei der Rohstoffgewinnung sollen international verbessert und die entwicklungspolitischen Komponenten der deutschen Rohstoffstrategie sollen gestärkt werden. Da die Zementindustrie hauptsächlich einheimische Rohstoffe nutzt und dabei hohe Umwelt- und Sozialstandards angelegt werden, könnte die Zementindustrie eventuell im Rahmen von Rohstoffpartnerschaften dazu beitragen, die Erfahrungen bei der Entwicklung und Einhaltung solcher Standards bei der Rohstoffgewinnung und -aufbereitung sowie beim Lieferkettenmanagement auch in anderen Ländern zu vermitteln.

Das **Handlungsfeld „Ressourceneffizienz in der Produktion steigern“** ist für die Zementindustrie sicher relevant, um neben der bislang vorrangig beachteten Emissionsminderung auch den Umgang mit den für die Produktion aufgewendeten Rohstoffen effizienter zu gestalten. Hier sollten die in 2.2 beschriebenen technologischen Optionen zur Verbesserung von Material- und Energieeffizienz systematisch auf ihre Realisierbarkeit in den Betrieben überprüft werden. Dafür kann ggf. auch mit staatlicher Unterstützung gerechnet werden, denn im Entwurf von ProgRes II werden die Fortsetzung und der Ausbau von Förderprogrammen für material- und energieeffiziente Techniken und Verfahren in Aussicht gestellt. Darüber hinaus soll auch die betriebliche Effizienzberatung ausgebaut werden. Unternehmen, die ein Umweltmanagementsystem nach EMAS oder ein Energiemanagementsystem gemäß ISO 50001 eingeführt haben, können ihre Möglichkeiten zu Material- und Energieeinsparungen systematisch erfassen und erschließen. Die Bundesregierung beabsichtigt daher, bei öffentlichen Beschaffungen und bei staatlichen Vergünstigungen die Einführung von Energie- und Umweltmanagementsystemen künftig verstärkt als Kriterium heranzuziehen. Da die Unternehmen der deutschen Zementindustrie bereits seit Jahren flächendeckend zertifizierte Energiemanagementsysteme betreiben, wäre in erster Linie zu prüfen, ob mithilfe der Systeme weitere Potenziale zur Reduzierung des Primärrohstoffeinsatzes zu erschließen sind. Die Umweltprüfung

nach EMAS schließt die „Nutzung von natürlichen Ressourcen und Rohstoffe (einschließlich Energie)“ explizit ein<sup>26</sup>.

Das Handlungsfeld „Produkte und Konsum ressourcenschonender gestalten“ erscheint vorrangig auf Gebrauchsprodukte ausgerichtet. Investitionsgüter werden nicht explizit genannt. Es wird ein nationales Aktionsprogramm „Nachhaltiger Konsum“ angekündigt, das auch die Bereiche Mobilität und Wohnen umfassen soll. Die Endnachfrage in diesen Bereichen hat zumindest langfristig Rückwirkungen auf den Bedarf an Bauleistungen im Tief- und Hochbau. Wie sich diese infolge von veränderten Lebensstilen und möglichen Anreizsystemen in den nächsten Jahrzehnten entwickeln kann, lässt sich momentan nicht abschätzen und bedarf der weiteren Forschung. Der Entwurf von ProgRes II möchte auch die Ressourcenschonung in der öffentlichen Beschaffung verankern und zielt hierfür auf „Standardprodukte“ wie Recyclingpapier und „Green IT-Produkte“. Bauprodukte werden im Handlungsfeld „Nachhaltiges Bauen/Stadtentwicklung“ behandelt (s.u.).

Das **Handlungsfeld „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft ausbauen“** enthält einige Aspekte, die für die Zement- und Baustoffindustrie von großer Relevanz sind. So möchte die Bundesregierung die Erfassung und das Recycling ressourcenrelevanter Mengenabfälle optimieren und unterstützt hierfür den verstärkten Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen im Hoch- und Tiefbau (sie erwartet dabei bis 2030 eine signifikante Erhöhung, s.o. Ziele). Hierfür ist nach dem Entwurf von Progress II eine Getrennterfassungspflicht beim Abbruch erforderlich, die in der Gewerbeabfallverordnung zu verankern ist. Auch soll die Diskriminierung von RC-Gesteinskörnungen bei öffentlichen Ausschreibungen verboten werden. Die Bundesregierung sichert zu, angesichts der bereits erreichten hohen Verwertungsquote bei mineralischen Bau- und Abbruchabfällen in Höhe von mehr als 90 % die ökologische Sinnhaftigkeit höherer Verwertungsquoten zu prüfen. Dies erscheint in der Tat angezeigt, da eine Umlenkung des Einsatzes rezyklierter Gesteinskörnungen aus dem Tiefbau in den Hochbau unter bestimmten Bedingungen zu Ausgleichsströmen von Sand und Kies vom Hochbau in den Tiefbau – ohne

signifikante Entlastung der natürlichen Ressourcen – führen könnte. Wesentliche Einflussfaktoren sind hier (a) die mittel- bis langfristige Dynamik des Nettobestandszuwachses (momentan könnte selbst eine 100%ige Verwertung von Bauabfällen den Bedarf an Baumaterialien nicht decken, doch dürfte sich das künftig ändern, s.u.), und (b) die technischen und regulativen Möglichkeiten, im Tiefbau die bislang eingesetzten RC-Gesteinskörnungen aus dem Hochbau durch gesteigerte In-situ-Verwertung zu ersetzen (z. B. Mittel- und Unterbau von Straßen). Es ist ferner zu untersuchen, ob ein verstärkter Einsatz von RC-Gesteinskörnungen im Beton – wie im Entwurf von ProgRes II angestrebt – möglicherweise weitere ökologisch nachteilige Nebeneffekte verursacht. Beispielsweise könnte sich für RC-Betone ein höherer spezifischer Zementbedarf ergeben, um u.a. die vorgegebenen Festigkeitsanforderungen einzuhalten.

Ein verbindlicher Rechtsrahmen für Anforderungen an die Herstellung und den Einbau mineralischer Ersatzbaustoffe in technische Bauwerke soll mit der Ersatzbaustoffverordnung geschaffen werden, die im Rahmen der sogenannten Mantelverordnung zurzeit als Arbeitsentwurf vorliegt und im Rahmen dieser Legislaturperiode verabschiedet werden soll. Je nachdem inwieweit insbesondere vorsorgende Aspekte des Grundwasserschutzes dazu führen, dass weniger Ersatzbaustoffe wie RC-Gesteinskörnungen im Tiefbau eingesetzt werden dürfen, hätte dies wiederum Auswirkungen auf deren Verfügbarkeit im Hochbau. Die Bundesregierung möchte im Rahmen der Mantelverordnung „angemessene Schwellenwerte festsetzen, die ein Recycling und die Wiederverwendung von RC-Baustoffen im Rahmen etablierter Umweltstandards auch weiterhin sicherstellen und als Ziel eine Steigerung anstreben“ (BMUB 2015, 80).

Um verstärkt Sekundärrohstoffe gewinnen zu können, möchte die Bundesregierung die Wissens- und Entscheidungsbasis für die Sekundärrohstoffwirtschaft mit der Entwicklung von Datenbanken und dynamischen Prognosemodellen verbessern. In der Tat sind in Bauwerken und Infrastrukturen

<sup>26</sup> EMAS III Verordnung von 2009, Anhang I, Punkt 2 vi; <http://www.emas.de/rechtliche-grundlagen/emas-in-deutschland/> (Zugriff 22. Sept. 2015)

sowie in anderen langlebigen Gütern enorme Mengen an Material gespeichert, die ein wertvolles Rohstofflager für Sekundärrohstoffe darstellen. Die Daten und Prognosemodelle sollen auch als Basis für die Entwicklung einer „Urban Mining-Strategie“ für Deutschland dienen. Die Zement- und Betonindustrie könnte bei der Erweiterung der Datenbasis mitwirken, indem sie einschlägige Daten zur Verfügung stellt. Zudem könnte sie die Entwicklung von geeigneten Prognosemodellen mit vorantreiben. Dadurch sollen langfristig bedeutsame Trends wie die des physischen Wachstums des Baubestands und die damit verbundenen Größenordnungen von Primär- und Sekundärbaustoffen verlässlich ermittelt werden. Die bislang vorliegenden Hochrechnungen lassen erwarten, dass in den neuen Bundesländern bereits 2020 mehr Beton und Ziegel aus dem Bestand rückgebaut werden als in den Bestand einfließen und dass diese Situation im gesamten Deutschland noch vor 2050 zu erwarten ist. Damit würde sich die gegenwärtige Situation des physischen Nettowachstums, bei dem der Bedarf an Baustoffen selbst bei 100 % Recycling der Bauabfälle nicht gedeckt werden kann, mittel- bis langfristig grundlegend ändern. Die Bauwirtschaft und die Zementindustrie sollten hierauf rechtzeitig vorbereitet sein.

Das **Handlungsfeld „Nachhaltiges Bauen und nachhaltige Stadtentwicklung“** ist ebenfalls von hoher Relevanz für die Zementindustrie, insbesondere im Hinblick auf die längerfristige Entwicklung wesentlicher Rahmenbedingungen. Die Bundesregierung beabsichtigt die Forschung zu ressourcenschonenden Lösungen für Planung, Konstruktion, Bauausführung und Sanierung einschließlich der Aus- und Weiterbildung zu fördern. Als wichtige Informations- und Entscheidungshilfen soll der Leitfaden „Nachhaltiges Bauen“ für Bundesbauten und die Nutzung durch Länder und Gemeinden weiterentwickelt werden. Damit verbunden ist das Bewertungssystem „Nachhaltiges Bauen“, das Berechnungs- und Bewertungsanleitungen bzw. -vorschriften bereitstellt. Bislang fehlen darin Indikatoren wie der kumulierte Rohstoffaufwand nach VDI 4800 oder der gesamte Primärmaterialaufwand (TMR). Im Zuge der weiteren Umsetzung der volkswirtschaftlichen Ziele ist damit zu rechnen, dass diese Indikatoren künftig nicht

nur im Bereich der Industrie, sondern auch im Bauplanungsbereich berücksichtigt werden. Gleiches gilt für die Kennzeichnung von Bauprodukten, um ihre Rohstoffinanspruchnahme zzgl. ihrer Recyclingfähigkeit auszuweisen. Die Bundesregierung setzt sich auch auf europäischer und internationaler Ebene dafür ein, dass die Umweltproduktdeklaration um die bislang fehlenden Aspekte der Ressourceninanspruchnahme ergänzt wird (dies schließt neben dem Rohstoffaufwand auch Landnutzung und Biodiversität ein). Die Einbeziehung von Indikatoren des Rohstoffaufwands und des Primärmaterialaufwands würde sich – wenn sie nicht automatisch über die Weiterentwicklung des o.g. Bewertungssystems „Nachhaltiges Bauen“ erfolgt –, auch bei der Vergabe von „Nachhaltigkeitszertifikaten“ empfehlen. Auf diese Weise könnte gewährleistet werden, dass die Einzelplanungen richtungssicher und konsistent mit den gesamtwirtschaftlichen und produktbezogenen Indikatoren der Rohstoffproduktivität durchgeführt werden.

Der Entwurf zu ProgRess II zielt auch auf einen verstärkten Einsatz von Bauprodukten aus nachwachsenden Rohstoffen ab. Dies dürfte für die Zementindustrie letztlich wenig relevant sein, da die Kapazitäten zur nachhaltigen Versorgung mit nachwachsenden Rohstoffen begrenzt sind. Der Entwurf weist selbst explizit darauf hin, dass (landwirtschaftliche) Biomasse zunächst zur Ernährungssicherung genutzt werden muss und dem gewünschten Ausbau der stofflichen Nutzung nur ein begrenztes Potenzial gegenübersteht, „welches unter Berücksichtigung der Flächen- und Nutzungskonkurrenzen sowie der Auswirkungen auf Wasser, Boden, Luft und die biologische Vielfalt in Anspruch genommen werden darf“ (BMUB 2015, 56). Im Hinblick auf den Rohstoff Holz ist festzustellen, dass aufgrund des steigenden Einsatzes für energetische Zwecke bei anhaltenden Trends sich Deutschland zu einem Nettoimporteur entwickeln dürfte (Seintsch 2010). Neuere Untersuchungen belegen, dass die EU im internationalen Vergleich die Nachwachskapazität der globalen Wälder bereits überdurchschnittlich in Anspruch nimmt und dass die Nachwachskapazität auf dem eigenen Territorium bei weiter ansteigendem energetischen Einsatz den Grenzbereich des nachhaltig gesicherten Handlungsraums (Safe Operating

Space) überschreiten würde (O’Brien 2015). Hier bedarf es offensichtlich einer Stärkung der Kohärenz zwischen Klimaschutz- und Ressourcenschutzpolitiken.

Die verstärkte Nutzbarmachung von Baustoffen aus Recycling soll auch bei der Weiterentwicklung der Infrastrukturen insbesondere im Abwasserbereich untersucht werden. Hier soll geprüft werden, welche nicht mehr benötigten Bauwerke rückgebaut werden können und wie dabei Baustoffe rückgewonnen werden können. Dieser Bereich dürfte freilich ein begrenztes Potenzial aufweisen. Breitenwirksamer und daher auf größere Effektivität ausgelegt sind die vorgesehenen Maßnahmen zur generellen Stärkung der Kreislaufführung bei Bauprozessen. Vorgesehen ist hier die Übertragung der Instrumente und Erfahrungen der recyclinggerechten Dokumentation von Bauprojekten des Bundes auf die öffentlichen Bauvorhaben der Länder. Der selektive Rückbau und die Prüfung der Möglichkeiten der Aufbereitung von Bauabfällen bei großen Abbruch-/Neubauvorhaben soll vor Ort oder nahe der Baustelle gefördert werden. Ein Informationsportal soll eingerichtet werden zur Steigerung der Akzeptanz von Recyclingbaustoffen und der Förderung ihres Einsatzes durch die Einführung neutraler Qualitätskriterien. Hierbei dürfte auch der Sachverstand in der Zementindustrie gefragt sein, um die Funktionalität der Baustoffe zu gewährleisten. Außerdem ist vorgesehen, dass das UBA auch ganzheitliche Vergleiche auf Basis von Ökobilanzen sowie auf Basis von Lebenszykluskosten erarbeiten lässt.

Die Verbesserung der Informations- und Entscheidungsbasis führt zum **Handlungsfeld „Übergreifende Instrumente“**. Hier verweist der Entwurf von ProgRess II darauf, dass die Standardisierung der Berechnungswege, Bilanzierungsregeln und Kriterien zur Beurteilung der lebenszyklusweiten Ressourceneffizienz weiter vorangetrieben werden sollte. Dazu gehört auch die Verbreiterung der Datenbasis zu Baustoffinformationen wie der Datenbank ÖKOBAUDAT und von EDV-Tools wie dem [www.bauteileditor.de](http://www.bauteileditor.de) zur Erstellung der Ökobilanz eines Gebäudes, die frei verfügbar sind. Die Bundesregierung unterstützt die Entwicklung und Anwendung harmonisierter Methoden über ISO-, CEN und DIN-Normen sowie Richtlinien des VDI.

Sowohl bei der Aktualisierung und Erweiterung der Baustoffdatenbank wie bei Normungsprozessen kann sich die Zementindustrie hilfreich einbringen.

Der Entwurf von ProgRess II sieht vor, dass im Rahmen der Unternehmensberichterstattung und der Bilanzierungsregeln „Resource Key Performance Indicators“ etabliert werden sollen, nach denen Unternehmen verpflichtet werden, über ihren Ressourcenverbrauch und andere ressourcenbezogene Aspekte ihrer Nachhaltigkeitspolitik zu berichten. Ausgangspunkt hierfür ist die EU-Richtlinie zur „Corporate Social Responsibility“ von 2014. Ihr Geltungsbereich soll nach dem Entwurf künftig schrittweise erweitert werden. Da die Erhebung des Rohstoffeinsatzes und des Energieverbrauchs für Unternehmen generell sinnvoll ist, nicht zuletzt, um Kosten einzusparen, dürfte es sich für die Unternehmen der Zementindustrie empfehlen, ein solches Monitoring samt Berichterstattung proaktiv einzuführen, wo dies nicht bereits heute etablierte Praxis ist.

**Zusammenfassend** lässt sich festhalten, dass mit dem Entwurf von ProgRess II eine deutliche Verbreiterung und Vertiefung der Ziele und Maßnahmen zur Förderung der Ressourceneffizienz der deutschen Wirtschaft vorgelegt worden ist. Der Schwerpunkt liegt dabei auf informatorischen Instrumenten, um die Akteure in die Lage zu versetzen, die Ressourceneffizienzpotenziale in ihrem Bereich erkennen und heben zu können. Die Zementindustrie kann wie beschrieben ihren Beitrag zur Gestaltung und Umsetzung der vorgesehenen Maßnahmen leisten.

## 5 Ergebnisse und Schlussbetrachtung

Mit einer Zementproduktion in einer Größenordnung von jährlich 32 bis 37 Mio. t liefert die Zementindustrie in Deutschland einen essentiellen Grundstoff für die deutsche Volkswirtschaft, der im Wesentlichen von der heimischen Bauindustrie eingesetzt wird. Zur Herstellung des Zements ist die Branche auf eine langfristige Versorgung mit Rohstoffen der Steine-Erden-Gewinnung angewiesen und trägt dadurch gleichzeitig in nicht unerheblichem Maße zum Abbau heimischer Ressourcen bei. Insgesamt werden pro Jahr ca. 50 Mio. t überwiegend inländische Rohstoffe für die Zementproduktion eingesetzt. Der Anteil der Sekundärrohstoffe an der Produktion beläuft sich derzeit auf 16 % (zum Vergleich: 11 % in 1998). Für die Betonherstellung werden zusätzlich weitere 130 bis 140 Mio. t an Sand und Kies als Zuschlagsstoffe aufgewendet, so dass sich für die Wertschöpfungskette von Zement und Beton ein jährlicher Gesamtbedarf von 180 bis 190 Mio. t ergibt.

Neben dem Einsatz von Primär- und Sekundärrohstoffen verwendet die deutsche Zementindustrie auch große Mengen an Brennstoffen, vor allem zur Herstellung des Portlandzementklinkers. Allerdings spielen fossile Brennstoffe hierzulande nur noch eine untergeordnete Rolle. So wird der thermische Energiebedarf überwiegend (63,4 % in 2014) durch Sekundärrohstoffe gedeckt, wie z.B. Altreifen, Altöle, Gewerbe- und Siedlungsabfälle oder Altholz. Der Anteil der fossilen Brennstoffe (v.a. Braun- und Steinkohle) ging kontinuierlich von 74,3 % im Jahr 2000 auf aktuell 36,6 % zurück.

Die deutsche Zementindustrie fördert den Großteil ihres Primärrohstoffbedarfs selbst. Die Mehrzahl der Zementwerke in Deutschland ist nicht zuletzt aus ökologischen und ökonomischen Gründen direkt bei den entsprechenden Abbaustätten von Kalkstein oder Mergel angesiedelt, so dass der wichtigste Rohstoff direkt vor Ort zu Klinker und Zement verarbeitet werden kann. Die jährlich neue Flächeninanspruchnahme zur Gewinnung der Rohstoffe für Zement (im Wesentlichen Kalkstein) beträgt 57 ha, darüber hinaus wird für die Extraktion von Sand und Kies eine Fläche von 424 ha in Anspruch genommen.

Alle im Betrieb befindlichen und genehmigten Abbaustätten der Zementindustrie erstrecken sich auf eine Fläche von etwa 5.600 ha. Gemessen an der gesamten Abgrabungsfläche zur Gewinnung oberflächennaher Rohstoffe in Deutschland entspricht dies einem Anteil von ca. 3 bis 4 %.

Die von der Zementindustrie beanspruchten Flächen werden über einen längeren Zeitraum, aber zeitlich befristet genutzt und während bzw. im Anschluss an die Abbautätigkeit zumeist renaturiert, rekultiviert oder in wenigen Fällen als Deponieraum genutzt. Die Abbaustätten weisen deshalb insgesamt eine Vielzahl von Biotoptypen auf und bieten Lebensräume für spezialisierte, teilweise seltene Arten. Damit leistet die Branche einen wertvollen Beitrag zur Biodiversität.

Bei der Messung der Material-, Rohstoff- bzw. Ressourcenproduktivität wird die ökonomische Wertschöpfung in Beziehung gesetzt zum Einsatz stofflicher (Primär-)Ressourcen. Diese kann auf volkswirtschaftlicher Ebene durch Indikatoren abgebildet werden. Der Direkte Material Input (DMI) gehört zu den gängigen Indikatoren, dessen Erfassungsbasis schrittweise erweitert werden kann, um den lebenszyklusweiten Rohstoffaufwand (RMI) bis hin zum gesamten Primärmaterialaufwand (TMR) zu bestimmen.

Die Materialproduktivität in Deutschland ist zwischen 2000 und 2012 um rund 52 % angestiegen. Geringer fiel hingegen der Anstieg der Rohstoff- und Ressourcenproduktivität aus (mit 34 % bzw. 4 %), da hierbei zusätzlich vorgelagerte Materialinputs inklusive der ausländischen Rohstoffbasis berücksichtigt werden.

Listet man alle abiotischen und biotischen Ressourcenkategorien nach ihrer mengenmäßigen Bedeutung, so stehen Sand und Kies bei DMI (34 %) und RMI (29 %) an erster Stelle, nur beim umfassenderen TMR wird Sand und Kies (17 %) in puncto Relevanz von der Braunkohle (19 %) übertroffen. Kalkstein und Gips (wobei der Anteil des letzteren von geringer Bedeutung ist) rangieren bei DMI (8 %) und RMI (8 %) an dritter Stelle, beim TMR (5 %) an sechster.

Die Produktion von Zement erfolgt heute in Prozessen und Anlagen, die schon einen langen Optimierungspro-

zess durchlaufen haben. Auch wenn sich ein Großteil der Anlagen zur Herstellung von Zement und Zementklinker bereits seit vielen Jahren in Betrieb befindet und größere sowie teils modernere Anlagen grundsätzlich verfügbar sind, ist das Effizienzpotenzial bei bestehenden Technologien relativ gering und kann kaum wirtschaftlich erschlossen werden. Ähnliches gilt auch für die Möglichkeit, die schon bisher eingesetzten Sekundärrohstoffe noch stärker zu nutzen. Im Gegenteil ist unter der Annahme einer gleichbleibenden Zementproduktion fraglich, ob Sekundärrohstoffe wie Flugaschen, Hüttsand oder Gießereialtsande angesichts des laufenden Strukturwandels im Energiesektor und in der industriellen Produktion im bisherigen Umfang bereitstehen werden. Dies bedeutet nicht zuletzt, dass die Zementindustrie auch langfristig auf die sichere Versorgung mit Primärrohstoffen angewiesen sein wird.

Deutlich größeres Potenzial wird bei der Entwicklung alternativer Zemente und Bindemittel gesehen, die sich zu energie- und ressourcenschonenderen Alternativen zu den bisher auf dem Markt befindlichen Zementen entwickeln könnten. Sie befinden sich derzeit noch im Entwicklungsstadium. Wichtig für ihre Weiterentwicklung ist insbesondere auch eine dauerhaft zuverlässige Rohstoffbasis. Die Zementherstellung selbst ist jedoch nur einer von mehreren Ansatzpunkten zur Verbesserung der Rohstoffproduktivität entlang der Wertschöpfungskette von Zement und Beton.

So besteht vor allem bei den Gesteinskörnungen ein relevantes Potenzial zur Ressourcenschonung. Perspektivisch ist damit zu rechnen, dass künftig größere Mengen mineralischer Bauabfälle für die Erzeugung von RC-Gesteinskörnungen zur Verfügung stehen werden. Für deren hochwertige Erzeugung muss jedoch noch weitere Entwicklungs- und Forschungsarbeit geleistet werden. Weitere erhebliche Potenziale zur Erhöhung der Rohstoffproduktivität bestehen insbesondere in der industriellen Vorfertigung von Betonbauteilen sowie perspektivisch auch in der Nutzung von ultrahochfesten Betonen. Im Idealfall kann beides verknüpft werden. Wesentlich ist hierbei, dass die Möglichkeiten zur verbesserten Qualitätssicherung (Kontrolle der Zusammensetzung, der Bauteilbemessung usw.) genutzt werden,



um insgesamt zu einer Verringerung der Ressourceninanspruchnahme bei verbesserter Funktionalität der Bauwerke zu gelangen.

Die Rohstoffproduktivität wird nicht nur von technologischen Aspekten bestimmt, sondern auch von ökonomischen, politischen und rechtlichen Rahmenbedingungen. Seit geraumer Zeit sind Fragestellungen rund um die Steigerung der Ressourceneffizienz auch Gegenstand der deutschen Politik, die sich ihrerseits im Kontext europäischer und internationaler Aktivitäten bewegt. In einer Reihe von Ländern wurden bereits konkrete Ressourcenschutzziele festgelegt. In den meisten Fällen wird die gesamte Volkswirtschaft adressiert; daneben gibt es in einigen Fällen auch sektorale Ziele. Allerdings sind diese bislang überwiegend qualitativ. Des Weiteren haben einige EU-Mitgliedsstaaten ökonomische Instrumente eingeführt, um die mineralische Rohstoffgewinnung und die Deposition von mineralischen Abfällen zu vermindern. In Deutschland wurde bereits eine sehr hohe Verwertungsquote von zuletzt 91 % bei Bauabfällen (2012) durch die erfolgreichen Aktivitäten zur Förderung der Kreislaufwirtschaft im Zusammenwirken von Politik und Wirtschaft erreicht. Im Rahmen der Initiative Kreislaufwirtschaft Bau werden bereits seit 1996 regelmäßig Monitoring-Berichte zu Aufkommen und Verbleib mineralischer Bauabfälle veröffentlicht. Künftig dürften an Bauwerke weitergehende Anforderungen gestellt werden, die u. a. die Rezyklierbarkeit der im jeweiligen Bauwerk verwendeten Baustoffe und einen verstärkten Einsatz von RC-Material beinhalten. Es ist daher damit zu rechnen, dass in der Folge die Nachfrage nach recyclingbasierten Baustoffen bzw. Baustoffen mit einem höheren Anteil an Sekundärrohstoffen steigen wird.

Hierzulande und auf Grund seiner Vorbildfunktion in der EU von zentraler politischer Bedeutung ist das „Deutsche Ressourceneffizienzprogramm“ (ProgRess), mit dem das Wirtschaftswachstum vom Einsatz natürlicher Ressourcen weitgehend entkoppelt werden soll. Der im August 2015 zur öffentlichen Konsultation vorgelegte Entwurf für die zweite Phase (ProgRess II) sieht unter anderem neuerdings die Einbeziehung der energetischen Rohstoffe (fossil und biotisch) vor.

Das bestehende Ziel der Nachhaltigkeitsstrategie, die Verdopplung der abiotischen Rohstoffproduktivität bis 2020 gegenüber 1994, wird weiter verfolgt. Zusätzlich sollen die Gesamtrohstoffproduktivität und der absolute Rohstoffverbrauch erfasst werden, Ziele dazu werden über Trendfortschreibungen anvisiert. Neben volkswirtschaftlichen werden kreislaufwirtschaftliche und produktspezifische Indikatoren und Ziele ergänzt, die künftig weiter zu konkretisieren sind.

Bei ProgRess II von Relevanz für die Zementindustrie ist das Handlungsfeld „Ressourceneffizienz in der Produktion steigern“. Hier sollten die technologischen Optionen zur Verbesserung von Material- und Energieeffizienz systematisch auf ihre Realisierbarkeit in den Betrieben überprüft werden. Vor diesem Hintergrund kann ggf. auch mit staatlicher Unterstützung gerechnet werden. So könnten beispielsweise Unternehmen mit einem Umweltmanagementsystem nach EMAS künftig bei der öffentlichen Auftragsvergabe bevorzugt werden.

Weiterhin enthält auch das Handlungsfeld „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft ausbauen“ einige Aspekte, die für die Zement- und Baustoffindustrie ebenfalls relevant sein dürften. So strebt die Bundesregierung an, die Erfassung und das Recycling ressourcenrelevanter Mengenabfälle zu optimieren und unterstützt hierfür unter anderem den verstärkten Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen im Hoch- und Tiefbau. Hier wird zu klären sein, welche Einsparungen an Primärrohstoffen angesichts möglicher gegenläufiger Effekte gesamtwirtschaftlich realisiert werden können, wenn Verwertungsströme vom Tief- in den Hochbau umgelenkt werden. Dies hängt auch von den Anforderungen an die Qualität der verwerteten Materialien im Tief- und Hochbau und den dortigen Möglichkeiten von verstärktem In-situ-Recycling ab. Mittel- und langfristig ist die Dynamik des Materialbestands im Hoch- und Tiefbau („anthropogenes Lager“) zu beachten. Zudem sind mögliche ökologisch nachteilige Nebeneffekte des Einsatzes von RC-Beton (z. B. ein höherer spezifischer Zementbedarf) zu untersuchen.

Das Handlungsfeld „Nachhaltiges Bauen und nachhaltige Stadtentwick-

lung“ ist längerfristig ebenfalls von hoher Relevanz für die Zementindustrie. Die Bundesregierung beabsichtigt, die Forschung zu ressourcenschonenden Lösungen für Planung, Konstruktion, Bauausführung und Sanierung einschließlich der Aus- und Weiterbildung entsprechender Fachkräfte zu fördern. Es ist zu erwarten, dass Kriterien wie der kumulierte Rohstoffaufwand oder der gesamte Primärmaterialaufwand künftig in Planungsanleitungen, Produktdeklarationen und Nachhaltigkeitszertifikaten einbezogen werden.

Insgesamt legt der Entwurf von ProgRess II den Schwerpunkt auf informatorische Instrumente, um die Akteure in die Lage zu versetzen, die Ressourceneffizienzpotenziale in ihrem Bereich erkennen und heben zu können.

Fokussiert man auf den Bereich der Zement- und Betonherstellung, so ergeben sich folgende wesentliche Strategien, die dazu beitragen können, den Rohstoffeinsatz entlang der Wertschöpfungskette von Zement und Beton effizienter, ressourcenschonender und zugleich klimafreundlicher zu gestalten:

(1) Weitere Steigerung des Einsatzes von Sekundärbrennstoffen zur Substitution fossiler Energieträger: Hier sollte geprüft werden, welche Mengen und Qualitäten mittel- und langfristig sektorübergreifend verfügbar sein werden (auch vor dem Hintergrund der Anstrengungen zur Abfallvermeidung).

(2) Erhöhung des Einsatzes von RC-Gesteinskörnungen in der Betonproduktion: Letztere kann dadurch in der Regel ihre eigene Rohstoffproduktivität erhöhen; inwieweit dies auch gesamtwirtschaftlich zur Verminderung des Rohstoffeinsatzes führt, hängt von der Entwicklung regulatorischer Rahmensetzungen, den Anforderungen an die Qualität verwendeter Materialien und der Langzeitdynamik des Baubestandes ab.

(3) Die Zementindustrie könnte zudem zur Förderung von ressourcen- und klimaschonenden Innovationen und damit zur Stärkung ihrer Wettbewerbsfähigkeit bei gleichzeitiger Absicherung ihrer Ressourcenbasis beitragen durch

- weitere Erforschung und Weiterentwicklung energie- und materialeffizienter Prozesse und Pro-

zessketten sowie -netzwerke; dies betrifft die in Kapitel 3 genannten Technologien, die sich derzeit in der Entwicklung befinden. Dies gilt insbesondere für die Nutzung von CO<sub>2</sub> als Rohstoff (z. B. für die Betonfertigteilherstellung) sowie für Optionen zur sektorübergreifenden Prozessintegration (z. B. Abwärmennutzung von Zementwerken in der Nachbarschaft).

- Monitoring der Material- und Energieeffizienz sowie des kumulierten Rohstoff- und Primärmaterialaufwands; hierzu können insbesonde-

re die vorliegenden bzw. in Entwicklung befindlichen VDI-Richtlinien herangezogen werden. Die Unternehmen können auf diese Weise den Grundstein für weitere technologische Verbesserungen legen und Fortschritte bei der Entwicklung der Rohstoffproduktivität messen.

- Unterstützung und Mitwirkung bei der Entwicklung eines Informationssystems „Urban Mining“; hierfür werden verlässliche Daten über tatsächlich und potenziell zur Verfügung stehende RC-Baustoffe benötigt. Diese Rohstoffbasis wird im

Zuge der Entwicklung des Baubestands in Hoch- und Tiefbau mittel- und langfristig immer bedeutsamer werden.

- Unterstützung und Mitwirkung bei Projekten zum Einsatz innovativer Zemente, Bindemittel und Betone in Demonstrationsvorhaben der öffentlichen Hand, z. B. bei Bundesbauten. Im Rahmen solcher Projekte kann die Eignung innovativer und umweltschonender Baustoffe erprobt und die Umsetzung in der Normung vorbereitet werden.

- Atmaca, A.; Kanoglu, M. (2012): Reducing energy consumption of a raw mill in cement industry, *Energy* 42 (2012) 261-269.
- Bahn-Walkowiak, B.; Steger, S. (2015): Resource Targets in Europe and Worldwide: An Overview, in: *Resources* 2015, 4(3), 597-620.
- Bahn-Walkowiak, B.; Steger, S. (2013): Politische und rechtliche Ansätze für inputorientierte Ressourcenziele in Europa und weltweit. PolRess-Arbeitspapier. Berlin: Forschungszentrum für Umweltpolitik (ffu). <http://www.ressourcenpolitik.de/ergebnisse/>.
- Bahn-Walkowiak, B.; Bleischwitz, R.; Machiba, T. (2007): Dematerialisierung und Ressourceneffizienz in Japan: Profildokument. – Wuppertal: Wuppertal Inst. für Klima, Umwelt, Energie [u.a.].
- Bauprodukten-Verordnung (2011): Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates.
- Bauproduktengesetz (2011): Gesetz zur Durchführung der Verordnung (EU) Nr. 305/2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Umsetzung und Durchführung anderer Rechtsakte der Europäischen Union in Bezug auf Bauprodukte (Bauprodukten-gesetz – BauPG).
- BDI (2010): Rohstoffeffizienz in der Produktion als integraler Bestandteil unternehmerischen Handelns – Thesenpapier. Berlin, Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (BDI). URL: [http://www.bdi.eu/download\\_content/BDI-Thesen\\_Ressourceneffizienz\\_Kurzfassung.pdf](http://www.bdi.eu/download_content/BDI-Thesen_Ressourceneffizienz_Kurzfassung.pdf) (Letzter Zugriff 09.09.2015).
- BGR (2014): Deutschland – Rohstoffsituation 2013.
- Biebeler, H. (2014): Aktivitäten und Hemmnisse der Steigerung der betrieblichen Materialeffizienz. UBA-Texte 58/2014.
- BMU (2012): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess) – Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen, Berlin.
- BMU (2013): Abfallvermeidungsprogramm des Bundes unter Beteiligung der Länder. Berlin, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- BMUB (2015): Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen – Fortschrittsbericht 2012 – 2015 und Fortschreibung 2016 – 2019 (Entwurf ProgRess II). Version RA 10.08.2015. <http://www.bmub.bund.de/themen/wirtschaft-produkte-ressourcen/ressourceneffizienz/fortschreibung-des-deutschen-ressourceneffizienzprogramms/> (Letzter Zugriff 08.09.2015).
- BMWi (2015): Gesamtausgabe der Energiedaten – Datensammlung des BMWi. URL: <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten-und-analysen/Energiedaten/gesamtausgabe,did=476134.html> (Letzter Zugriff 14.09.2015).
- Bringezu, S. (2015): Possible Target Corridor for Sustainable Use of Global Material Resources, *Resources* 2015, 4(1), 25-54.
- Bringezu, S. (2015): Possible Target Corridor for Sustainable Use of Global Material Resources, *Resources* 2015, 4(1), 25-54.
- Bringezu, Stefan; Schütz, Helmut (2014): Indikatoren und Ziele zur Steigerung der Ressourcenproduktivität. PolRess-Arbeitspapier. Berlin: Forschungszentrum für Umweltpolitik (ffu). <http://www.ressourcenpolitik.de/ergebnisse/> (Letzter Zugriff 14.09.2015).
- Bringezu, Stefan; Schütz, Helmut (2013): Ziele und Indikatoren für die Umsetzung von ProgRess. PolRess-Arbeitspapier. Berlin: Forschungszentrum für Umweltpolitik (ffu). URL: <http://www.ressourcenpolitik.de/ergebnisse/> (Letzter Zugriff 14.09.2015).
- BTB (2015): Frühjahrsprognose Transportbeton: Produktion 2015 auf Vorjahresniveau. URL: <http://www.transportbeton.org/verband/presse/fruehjahrsprognose-transportbeton-produktion-2015-auf-vorjahresniveau/> (Letzter Zugriff 14.09.2015).
- Bundesregierung (2010): Energiekonzept 2050. [http://www.bundesregierung.de/Content/DE/HTML/Breg/Anlagen/infografik-energie-textversion.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bundesregierung.de/Content/DE/HTML/Breg/Anlagen/infografik-energie-textversion.pdf?__blob=publicationFile) (Letzter Zugriff 08.09.2015).
- Bundesregierung (2012): Nationale Nachhaltigkeitsstrategie – Fortschrittsbericht 2012; Berlin.
- Buyny, Š.; Klink, S.; Lauber, U. (2009): Verbesserung von Rohstoffproduktivität und Ressourcenschonung – Weiterentwicklung des direkten Materialinputindikators – Endbericht. URL: [https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Umweltoekonomie/Gesamtrechnungen/RohstoffproduktivitaetEndbericht.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Umweltoekonomie/Gesamtrechnungen/RohstoffproduktivitaetEndbericht.pdf?__blob=publicationFile) (Letzter Zugriff 01.09.2015).
- Chau, C.K.; Hui, W.K.; Ng, W.Y.; Powell, G. (2012): Assessment of CO<sub>2</sub> emissions reduction in high-rise concrete office buildings using different material use options, *Resources, Conservation and Recycling* 61 (2012) 22-34.
- DAfStb (2010): DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620.
- Destatis (2015): Biotische Rohstoffe. URL: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Gesamtwirtschaft/Umwelt/Umweltoekonomie/Gesamtrechnungen/Glossar/BiotischeRohstoffe.html> (Letzter Zugriff 10.09.2015).
- Destatis (2014): Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung. Fachserie 3 Reihe 5.1.
- DIN 4226-1(2001): Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel, Teil 1: Normale und schwere Gesteinskörnungen 2001-07.
- DIN 4226-100 (2002): Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel, Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen, Februar 2002.
- DIN EN 12620 (2008): Gesteinskörnungen für Beton, Juli 2008.
- EC (2008): Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien, Brüssel.
- ECRA (2012): Technology papers for the Indian cement industry - looking behind the data - 12.08.2012).

- European Kommission (2011a): Ressourcenschonendes Europa – eine Leitinitiative innerhalb der Strategie Europa 2020. KOM(2011) 21.
- Europäische Kommission (2011b): Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa. KOM(2011) 571.
- Eurostat (2015a): Material Flow Accounts. Available online: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/environment/material-flows-and-resource-productivity/database>.
- Eurostat (2015b): Material flow accounts – flows in raw material equivalents. Available at: [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Material\\_flow\\_accounts\\_-\\_flows\\_in\\_raw\\_material\\_equivalents](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Material_flow_accounts_-_flows_in_raw_material_equivalents).
- Eurostat (2014): Estimates for Raw Material Consumption (RMC) and Raw Material Equivalents (RME) conversion factors. Available online: <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/1798247/6191533/RME-project-Introduction.pdf/96bbe739-bfda-47a2-99c7-cc3ec1048832>.
- Eurostat (2012): Economy-wide Material Flow Accounts (EW-MFA). Compilation Guide 2012; Office for Official Publications of the European Communities: Luxembourg, Luxembourg, 2012.
- Eurostat (2001): Economy-Wide Material Flow Accounts and Derived Indicators – A Methodological Guide; Office for Official Publications of the European Communities: Luxembourg.
- FDB (2014): FDB-Merkblatt Nr. 10 zum nachhaltigen Bauen mit Betonfertigteilen (03/2014), Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilebau e.V.
- Flatt, R.J.; Roussel, N.; Cheeseman, C.R. (2012): Concrete: An eco material that needs to be improved, *Journal of the European Ceramic Society* 32 (2012) 2787-2798.
- Gartner, E.; Hirao, H. (2015): A review of alternative approaches to the reduction of CO<sub>2</sub> emissions associated with the manufacture of the binder phase in concrete, *Cem. Concr. Res.* (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.04.012>.
- Gastaldi, D.; Canonico, F.; Capelli, L.; Buzzi, L.; Boccaleri, E.; Irice, S. (2015): An investigation on the recycling of hydrated cement from concrete demolition waste, *Cement & Concrete Composites* 61 (2015) 29-35.
- GNR Database: [http://www.wbc-sdcement.org/GNR-2012/world/GNR-Indicator\\_3212-world.html](http://www.wbc-sdcement.org/GNR-2012/world/GNR-Indicator_3212-world.html), June, 9, 2015.
- Gomes, P.C.C.; Ulsen, C.; Pereira F.A.; Quattrone M.; Angulo S.C. (2015): Comminution and sizing processes of concrete block waste as recycled aggregates. *Waste Management* (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.008>.
- Government of Japan (2008): Second Fundamental Plan for a Sound Material-Cycle Society.
- Grüner, E.; Salu, K.; Oras, K.; Nõmmann, T. (2009): Environmental Taxes - Economic Instruments for Environmental Protection. 3/09. *Quarterly Bulletin Of Statistics Estonia*.
- Habert, G.; d'Espinose de Lacaillerie, J.B.; Roussel, N. (2011): An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends, *Journal of Cleaner Production* 19 (2011) 1229-1238.
- Habert, G.; Arribe, D.; Dehove, T.; Espinasse, L.; Le Roy, R. (2012): Reducing environmental impact by increasing the strength of concrete: quantification of the improvement to concrete bridges, *Journal of Cleaner Production* 35 (2012) 250e262.
- Habert, G.; Denarié, E.; Šajna, A.; Rossi, P. (2013): Lowering the global warming impact of bridge rehabilitations by using Ultra High Performance Fibre Reinforced Concretes, *Cement & Concrete Composites* 38 (2013) 1-11.
- Haist, M.; Moffatt, J.S.; Breiner, R.; Müller, H.S. (2014): Entwicklungsprinzipien und technische Grenzen der Herstellung zementarmer Betone, *Beton- und Stahlbetonbau* 109 (2014), Heft 3.
- Hasanbeigi, A.; Price, L.; Lin, E. (2012): Emerging energy-efficiency and CO<sub>2</sub> emission-reduction technologies for cement and concrete production: A technical review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 6220-6238.
- Hauer, B.; Schäfer, S.; Koring, K. (2009): Einsatz von Betonbrechsand in der Portlandzementklinkerherstellung, *Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.): 17. Internationale Baustofftagung (Weimar 23.-26.09.2009)*. – Weimar, 2009, S. 2-1267-2-1272.
- Hauer, B.; Pierkes, R.; Schäfer, S.; Seidel, M.; Herbst, T.; Rübner, K.; Meng, B.: Verbundforschungsvorhaben "Nachhaltig Bauen mit Beton": Potenziale des Sekundärstoffeinsatzes im Betonbau – Teilprojekt B. Berlin: Beuth, 2011 (DafStb: Schriftenreihe 584).
- HeidelbergCement (2014): Bontechische Daten. URL: <http://www.heidelbergcement.de/de/bontechischdaten> (Letzter Zugriff 17.08.2015).
- Higuchi, T.; Morioka, M.; Yoshioka, I.; Yokozeki, K. (2014): Development of a new ecological concrete with CO<sub>2</sub> emissions below zero, *Construction and Building Materials* 67 (2014) 338-343.
- Hoenig, V.; Koring, K.; Fleiger, P.; Müller, Ch.; Palm, S.; Reiners, J. (2013): Energy Efficiency in the Cement Production, *Cement International*, 2013, Part 1 (3) pp. 50 – 67, Part 2 (4) pp.46-65.
- Hoffmann, C. (2015): Stand von Forschung und Entwicklung. ETH Zurich, Presentation 9. Schweizer Betonforum „Recyclingbeton – die sinnvolle Alternative?“, 1. Juli 2015.
- HMULV (2007): Rohstoffsicherung in Hessen.
- Initiative Kreislaufwirtschaft Bau (2012): Mineralische Bauabfälle Monitoring 2012 - Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2012. Berlin, Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e.V., 2015.
- KrWG (2012): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG).
- Lettenmeier, M.; Liedtke, C.; Rohn, H. (2014): Eight Tons of Material Footprint – Suggestion for a Resource Cap for Household Con-

- sumption in Finland. In: Resources 2014, 3, 488-515.
- Lotfia, S.; Dejab, J.; Rema, P.; Mrózb, R.; van Roekel, E.; van der Stelt, H. (2014): Mechanical recycling of EOL concrete into high-grade aggregates, Resources, Conservation and Recycling 87 (2014) 117-125.
  - Madlool, N.A.; Saidur, R.; Hossain, M.S.; Rahim, N.A. (2011): A critical review on energy use and savings in the cement industries, Renewable and Sustainable Energy Reviews, No. 15, pp. 2042-2060.
  - Madlool, N.A.; Saidur, R.; Rahim, N.A.; Kamalisarvestani, M. (2013): An overview of energy savings measures for cement industries Renewable and Sustainable Energy Reviews 19 (2013) 18-29.
  - Mao, C.; Shenb, Q.; Shena, L.; Tang, L. (2013): Comparative study of greenhouse gas emissions between off-site prefabrication and conventional construction methods: Two case studies of residential projects, Energy and Buildings 66 (2013) 165-176.
  - Messari-Becker, L.; Mettke, A.; Knappe, F.; Storck, U.; Bollinger, K.; Grohmann, M. (2014): Recycling concrete in practice – a chance for sustainable resource management, Structural Concrete 15 (2014), No. 4.
  - Miller, D.; Doh, J.-H.; Mulvey, M. (2015): Concrete slab comparison and embodied energy optimisation for alternate design and construction techniques, Construction and Building Materials 80 (2015) 329 – 338.
  - Mittal, P.K. (1996): Experience in separate grinding systems for blended cement. World Cement, S. 42-44.
  - Müller, H.S.; Haist, M.; Vogel, M. (2014): Assessment of the sustainability potential of concrete and concrete structures considering their environmental impact, performance and lifetime, Construction and Building Materials 67 (2014) 321-337.
  - Müller-Pfeiffer, M.; (2000): Herstellung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen durch gemeinsames oder getrenntes Mahlen und Mischen. Schriftenreihe der Zementindustrie 61.
  - Nachhaltigkeitsinitiative der deutschen Zementindustrie (2013): Nachhaltigkeit und Zementindustrie. Dokumentation von Beiträgen und Handlungsoptionen.
  - O'Brien, M. (2015): Timber consumption and sustainable forest use: Assessing the EU's current and expected consumption of global timber in relation to the global capacity for sustainable supply. Dissertation am FB Bau- und Umweltingenieurwesen der Universität Kassel, vorgelegt im August 2015.
  - OECD (2015): Material Resources, Productivity and the Environment, OECD Green Growth Studies, OECD Publishing, Paris. doi.org/10.1787/9789264190504-en.
  - OECD (2013): Environment at a Glance. Available online: [http://www.oecd-ilibrary.org/environment/environment-at-a-glance-2013\\_9789264185715-en](http://www.oecd-ilibrary.org/environment/environment-at-a-glance-2013_9789264185715-en).
  - OECD (2008a): Resource Productivity in the G8 and the OECD, 2008. URL: <http://www.oecd.org/env/waste/47944428.pdf> (Letzter Zugriff 14.09.2015).
  - OECD (2008b): Measuring Material Flows and Resource Productivity; OECD Publishing: Paris, France, 2008.
  - Pan, J. R.; Huang, C.; Kuo, J.; Lin, S.-H. (2008): Recycling MSWI bottom and fly ash as raw materials for Portland cement; Waste Management 28 (2008) 1113-1118.
  - Peyvandi, A.; Soroushian, P.; Jahangirnejad, S. (2013): Enhancement of the structural efficiency and performance of concrete pipes through fiber reinforcement, Construction and Building Materials 45 (2013) 36-44.
  - Pietsch, A.; Hormann (2012): Artgutachten für den Uhu (*Bubo bubo*) in Hessen. Gutachten im Auftrag der Staatlichen Vogelschutzwarte für Hessen, Rheinland-Pfalz und das Saarland. Frankfurt.
  - Proske, T.; Hainer, S.; Rezvani, M.; Graubner, C.-A. (2013): Ecofriendly concretes with reduced water and cement contents – Mix design principles and laboratory tests Cement and Concrete Research 51 (2013) 38-46.
  - Quattrone, M.; Angulo, S.C.; John, V.M. (2014): Energy and CO<sub>2</sub> from high performance recycled aggregate production, Energy and CO<sub>2</sub> from high performance recycled aggregate production.
  - Rademacher, M.; Tränkle, U. (2008): Nachhaltigkeitsindikatoren für ein integriertes Rohstoff- und Naturschutzmanagement. Pilotprojekt im Zementwerk Schelklingen.
  - Ritthoff, M.; Rohn, H.; Liedtke, C. (2002): MIPS berechnen: Ressourcenproduktivität von Produkten und Dienstleistungen.
  - Rosemann, O., et al. (1989): Untersuchungen zum Einsatz einer Gutbett-Walzenmühle zur Feinmahlung von Zement. Zement-Kalk-Gips 42, S. 165-169.
  - Schiller, G; Deilmann, C.; Gruhler, K.; Röhm, P.; Reichenbach, J.; Baumann, J.; Günther, M. (2010): Ermittlung von Ressourcenschonungspotenzialen bei der Verwertung von Bauabfällen und Erarbeitung von Empfehlungen zu deren Nutzung. Dessau-Roßlau : Umweltbundesamt, (Texte / UBA; 56/10).
  - Seintsch, B. (2010): Holzbilanzen 2006 bis 2009 für die Bundesrepublik Deutschland. VTI and Institut für Ökonomie der Forst- und Holzwirtschaft. Hamburg, Germany.
  - Solidia Technologies (2015): University of South Florida Investigators Report Lower Corrosion Damage in Reinforced CO<sub>2</sub>-Cured Concrete during NACE Corrosion 2015.
  - Solidia Technologies (2013): Chemical Properties and Performance Results of Sustainable Solidia Cement Detailed in White Paper Series.
  - SST/DIW (2013): Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine- und-Erden-Industrie bis 2030 in Deutschland. URL: [http://www.baustoffindustrie.de/root/img/pool/downloads\\_2013/210813/rohstoffstudie\\_08\\_2013.pdf](http://www.baustoffindustrie.de/root/img/pool/downloads_2013/210813/rohstoffstudie_08_2013.pdf) (Letzter Zugriff 14.10.2015).
  - Stemmermann, P.; Schweike, U.; Garbev, K.; Beuchle, G.; Möller, H. (2010): Celitement – a sustainable prospect for the cement industry, CEMENT INTERNATIONAL 4 5/2010 4 VOL. 8.

- Tam, V.W.Y.; Fung, I.W.H.; Sing, M.C.P.; Ogunlana, S.O. (2014): Best practice of prefabrication implementation in the Hong Kong public and private sectors, *Journal of Cleaner Production* (2014), doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.045.
- Topcu, I. B.; Boga, A. R.; Bilir, T. (2008): Alkali-silica reactions of mortars produced by using waste glass as fine aggregate and admixtures such as fly ash and  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ; *Waste Management* 28 (2008) 878-884.
- Tränkle, U.; Offenwanger, H.; Röhl, M.; Hübner, F.; Poschod, P. (2003): Naturschutz und Zementindustrie. Projektteil 2: Literaturstudie. Im Auftrag des Bundesverbandes der Deutschen Zementindustrie e.V. und des Verein Deutscher Zementwerke e.V.
- Tränkle, U.; Röhl, M. (2001): Naturschutz und Zementindustrie. Projektteil 1: Auswertung einer Umfrage. Im Auftrag des Bundesverbandes der Deutschen Zementindustrie e.V. und des Verein Deutscher Zementwerke e.V.
- Trenkwalder, J., et al. (2001): Herstellung hüttensandhaltiger Zemente durch getrenntes Mahlen und Mischen im Zementwerk Karlstadt. *ZKG* 54, S.480-491.
- Turk, J.; Cotic, Z.; Mladenovic, A.; Šajna, A. (2015): Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA. *Waste Management* (2015), doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.035.
- UBA (2012): Glossar zum Ressourcenschutz. Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt. URL: <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4242.pdf> (Letzter Zugriff 01.09.2015).
- VDI-Richtlinie 4800 Blatt 1: Ressourceneffizienz - Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien. Weißdruck, als Entwurf veröffentlicht.
- VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2: Bewertung des Rohstoffaufwands - Bilanzierungsgrundsätze und Rohstoffkritikalität, in Vorbereitung.
- VDZ (2015a): Zahlen und Daten 2014, VDZ.
- VDZ (2015b): Zementverbrauch nach Verwendungsarten und Baubereichen. Entwicklungen des deutschen Zementmarkts in 2014.
- VDZ (2014a): Umweltdaten der deutschen Zementindustrie.
- VDZ (2014b): Zementverbrauch nach Verwendungsarten und Baubereichen. Entwicklungen des deutschen Zementmarkts in 2013.
- VDZ (2014c): Information Rohstoffe - Rohstoffgewinnung und -einsatz in der deutschen Zementindustrie.
- VDZ (2002): Zement-Taschenbuch 2002, 50. Ausgabe, Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf URL: [https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3Literatur-Recherche/Zement-Taschenbuch/Zement-Taschenbuch\\_2002.pdf](https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3Literatur-Recherche/Zement-Taschenbuch/Zement-Taschenbuch_2002.pdf) (Letzter Zugriff 17.08.2015).
- Wiedmann, T.O.; Schandl, H.; Lenzen, M.; Moran, D.; Suh, S.; West, J.; Kanemoto, K. (2013): The material footprint of nations. vol. 112 no. 20 6271-6276.
- Wolter, A.; Dreizler, I. (1988): Einfluss der Rollenpresse auf die Zementeigenschaften. *Zement-Kalk-Gips* 41, S.64-70.
- Yeo, D.H.; Ghabaib, R.D. (2011): Sustainable design of reinforced concrete structures through embodied energy optimization, *Energy and Buildings* 43 (2011) 2028-2033.
- Yoda, K.; Shintani, A. (2014): Building application of recycled aggregate concrete for upper-ground structural elements, *Construction and Building Materials* 67 (2014) 379 - 385.
- Zhang, Z.; Provis, J.L.; Reid, A.; Wanga, H. (2014): Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction, *Construction and Building Materials* 56 (2014).



