

# SYMPOSIUM

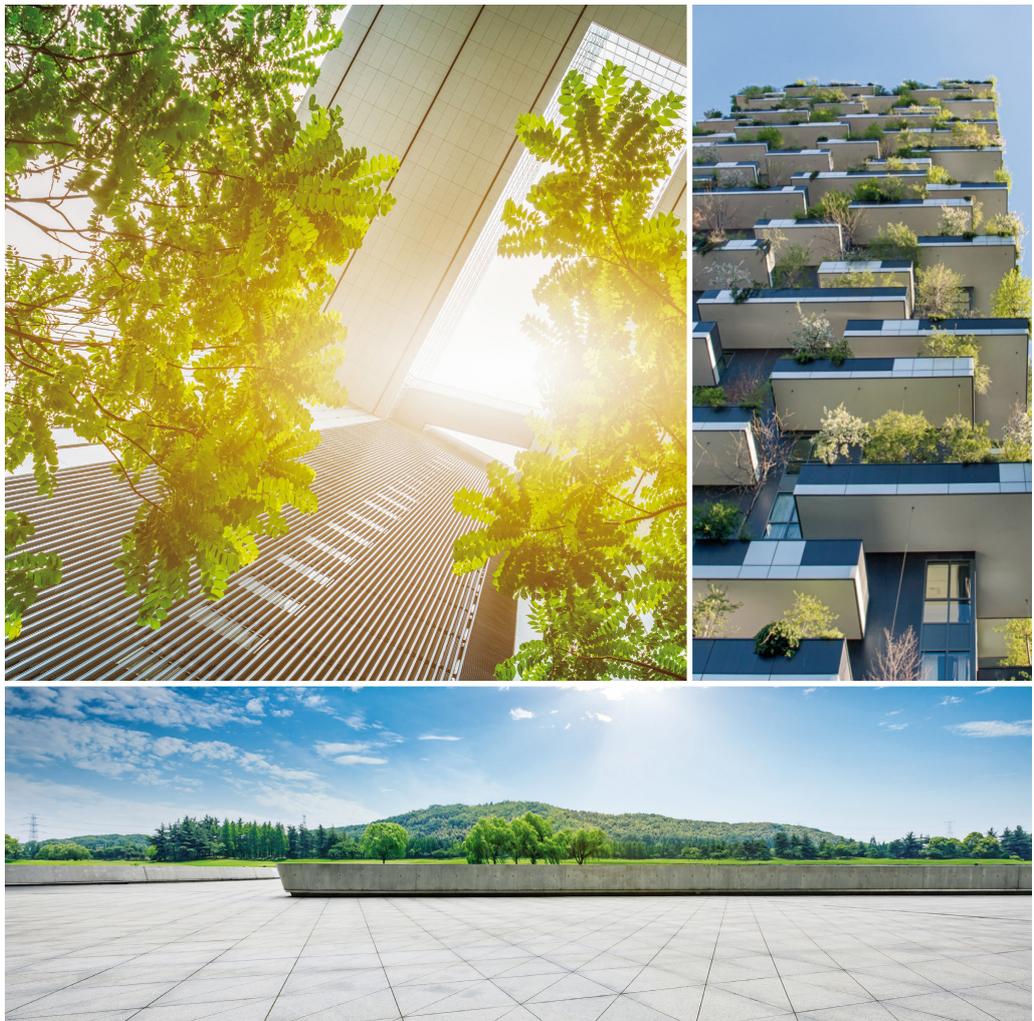
---

15. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 14. März 2019

## Ressourceneffizienter Beton

Zukunftsstrategien für Baustoffe und Baupraxis





Ulrich Nolting, Frank Dehn, Julian Link, Vanessa Mercedes Kind (Hrsg.)

SYMPOSIUM

---

Ressourceneffizienter Beton

Zukunftsstrategien für Baustoffe und Baupraxis



# SYMPOSIUM

---

## 15. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 14. März 2019

Ressourceneffizienter Beton  
Zukunftsstrategien für Baustoffe und Baupraxis

Herausgegeben von  
Ulrich Nolting, Frank Dehn, Julian Link, Vanessa Mercedes Kind

Mit Beiträgen von

Ivy Becker	Wolfgang Hirth
Lothar Benzel	Alex Hückler
Rolf Breitenbücher	Jack Moffatt
Shervin Hagsheno	Christoph Müller
Michael Haist	Svenja Oprach
Christoph Hilgers	Gerhard Scheuermann
Thomas Hirth	Dominik Steuer

Veranstalter:  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Institut für Massivbau und Baustofftechnologie  
76128 Karlsruhe  
VDB – Verband Deutscher Betoningenieure e. V.  
Regionalgruppen 9 und 10  
InformationsZentrum Beton GmbH  
Gerhard-Koch-Straße 2+4  
73760 Ostfildern

### **Titelbildcollage**

Alle Bilder von iStock, oben links: © Gang Zhou  
Oben rechts: © faber1893, unten: © zhaojiankang

### **Hinweis der Herausgeber**

Für den Inhalt namentlich gekennzeichnete Beiträge ist die jeweilige Autorin bzw. der jeweilige Autor verantwortlich.

### **Impressum**



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
KIT Scientific Publishing  
Straße am Forum 2  
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark  
of Karlsruhe Institute of Technology.  
Reprint using the book cover is not allowed.

[www.ksp.kit.edu](http://www.ksp.kit.edu)



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed  
under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License  
(CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons  
Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2020 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISBN 978-3-7315-0993-6  
DOI 10.5445/KSP/1000099425





## **Vorwort**

Mit der wirtschaftlichen Lage der Bauindustrie geht auch der notwendige Bedarf an Baustoffen einher. Der steigenden Nachfrage bei Baustoffen, wie dem Beton, steht zurzeit eine Verknappung der regionalen Rohstoffverfügbarkeit gegenüber. Um dem steigenden Bedarf im Betonbau gerecht zu werden, sind Lösungen für einen ressourceneffizienteren Beton erforderlich. Mit dem effizienten Einsatz von Baurohstoffen kann die Nachhaltigkeit mit einer ökonomischen Effizienz kombiniert werden. Eine nachhaltige Nutzung von Bauwerken sollte bereits beim Einsatz der Baurohstoffe beginnen. Zielsetzung des 15. Symposiums Baustoffe und Bauwerkserhaltung ist es, Ihnen einen Überblick über diese Entwicklungen zu geben und sie hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die zukünftige Betontechnologie sowie dem zukünftigen Bauen insgesamt zu bewerten.

Das Programm der Veranstaltung beginnt mit einer politischen Bewertung des ressourceneffizienten Betonbaus sowie zukünftigen politischen Strategien. Eine Beurteilung erfolgt sowohl auf regionaler, als auch auf internationaler Basis. Hierbei wird mit dem THINKTANK „Industrielle Ressourcenstrategien“ eine Kombination aus wissenschaftlichen und industriellen Aspekten vorgestellt. Das Potential einer ökologischeren und ökonomischeren Betonbauweise wird im dritten Themenblock adressiert und zeigt Veränderungen der Zementzusammensetzung und der Betontechnologie für nachhaltige Lösungen auf. Die Umsetzung wird am Beispiel der Lean Construction Bauweise ausgeführt. Die baupraktische Umsetzung wird anhand von Anpassungen im Regelwerk sowie an Praxisbeispielen vorgestellt.

Die Veranstalter



# Inhalt

	Vorwort	V
Gerhard Scheuermann	Symposium „Ressourceneffizienter Beton – Zukunftsstrategien für Baustoffe und Baupraxis“	1
Thomas Hirth	Industrielle Ressourcenstrategien – Ideen aus dem THINKTANK am KIT	5
Lothar Benzel	Bewertung der regionalen Rohstoffverfügbarkeit für die Herstellung von Beton	13
Christoph Hilgers Ivy Becker	Geologische Aspekte und Umfeldanalyse zur überregionalen Rohstoffverfügbarkeit von Beton – Sand, Kalkstein, Gips	21
Christoph Müller	Konzepte zur Herstellung von ressourceneffizienten Betonen am Beispiel Zement	31
Jack Moffatt Michael Haist	Konzepte zur Herstellung von ressourceneffizienten Betonen am Beispiel der Granulometrie	33
Dominik Steuer Svenja Oprach Shervin Hagsheno	Ressourceneffizientes Bauen mit Beton unter besonderer Berücksichtigung der Methode der Lean Construction	43
Rolf Breitenbücher	Neue Dauerhaftigkeitskonzepte in der Betonnormung – Potenziale für Ressourceneffizienz ?	55
Wolfgang Hirth	R-Beton aus Sicht des Transportbetonproduzenten – Theorie und Praxis	57
Alex Hückler	Chancen und Möglichkeiten des ressourceneffizienten Bauens mit Infraleichtbeton	63
	Programm der Veranstaltung	71
	Autorenverzeichnis	73
	Übersicht über Tagungsbände vergangener Symposien	75



# Symposium „Ressourceneffizienter Beton – Zukunftsstrategien für Baustoffe und Praxis“

Dr.-Ing. Gerhard Scheuermann

## 1 Einleitung

Beton ist mit ca. 7 Mrd. m<sup>3</sup> pro Jahr der nach Wasser weltweit am häufigsten verwendete Stoff. Durch die industrielle Entwicklung und die Verbesserung der Lebensbedingungen in den Entwicklungs- und Schwellenländern gibt es enorme Zuwachsraten beim Betonverbrauch. Dies hat natürlich zunächst Konsequenzen im Hinblick auf die Endlichkeit der Ressourcen. Die Herstellung von Beton verursacht 6 bis 8 % der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen und ist somit für die Erreichung der nationalen und globalen Klimaziele von höchster Bedeutung. Darüber hinaus verursacht das Bauwesen und da vor allem der Beton einen erheblichen Teil der produzierten Abfallmassen.

All dies ist nicht allein ein baden-württembergisches oder deutsches Thema, sondern ein weltweites Problem. Daraus ergibt sich aber auch, dass jede Verbesserung in den Stoff- und Energiebilanzen, in den Bauweisen oder bei der Rezyklierbarkeit weltweit großes Potential hat. Deutschland als eine der führenden Wirtschafts- und Wissenschaftsnationen ist hier gefordert, einen Beitrag zu leisten, und nicht zuletzt geht es mittel- und langfristig auch um die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Bauwirtschaft.

## 2 Ganzheitliche Betrachtung

In der Fachpresse findet man Informationen zu ganz unterschiedlichen Forschungsprojekten, die Beiträge zu mehr Nachhaltigkeit im Bauwesen oder speziell zu ressourceneffizienterem Beton bereits leisten oder zukünftig leisten können.

Aus umweltpolitischer Sicht erscheint eine ganzheitliche Betrachtung zielführend. Mit „ganzheitlich“ ist dabei die Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks von der Errichtung, einschließlich der Gewinnung der Rohstoffe, über eventuelle spätere Umnutzungen bis hin zum Abbruch und dem Recycling der Baustoffe gemeint. „Ganzheitlich“ schließt alle Prozessschritte mit ein, z. B. auch die notwendigen Transporte.

Die Materie ist vielfältig und komplex. Dabei ist das Potential der einzelnen Lösungen zu Beginn der Entwicklung nicht immer abschätzbar. Auch können sich die Randbedingungen für die Anwendung im Laufe der Zeit oder von Ort zu Ort ändern. Beim Re-

cyclingbeton betrifft das beispielsweise die Kiesvorkommen, die verfügbaren Massen aus dem Abbruch und auch die Deponiekapazitäten.

Wichtig ist, einen ausreichenden Vorlauf bei der Entwicklung technischer Lösungen zu haben – hier ist die Wissenschaft gefragt, aber auch eine entsprechende Förderung der Forschung und ggf. auch die Unterstützung von Pilotanwendungen. Später sind dann entsprechende technische Regelwerke erforderlich, die eine einfache und breite Anwendung ermöglichen.

## 3 Beispiele für laufende Entwicklungen

**Beispiel Beton- und Zementherstellung:** In der Fachpresse gibt es eine Vielzahl von Veröffentlichungen, die über Erfolge bei der Entwicklung sog. Ökobetone mit deutlich verringertem Zementgehalt oder Zemente mit einem verringerten Anteil an Portlandzementklinker berichten. Wie bereits erwähnt, sind mit der Betonherstellung ca. 6 bis 8 % der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen verbunden. Trotzdem darf man nicht ausschließlich den geringeren CO<sub>2</sub>-Ausstoß aus der Zementherstellung im Blick haben. So gibt es ebenso viele Veröffentlichungen, die auf die Notwendigkeit einer gleichwertigen Dauerhaftigkeit und auch auf die Verarbeitungseigenschaften der hergestellten Betone unter den üblichen Bedingungen auf der Baustelle hinweisen. Eine ausreichende Robustheit gegenüber Anwendungsfehlern oder gegenüber Verzögerungen beim Transport des Betons oder im Bauablauf muss bestehen bleiben.

Andere Entwicklungen betreffen die Weiterentwicklung der Stahlbetonbauweise. Das steht beim heutigen Symposium nicht primär im Vordergrund, trotzdem soll kurz auf das **Beispiel Carbonbeton** eingegangen werden. Die Bauweise hat als Ergänzung zum Stahlbeton großes Potenzial. Im Gegensatz zu einer Bewehrung aus Betonstahl müssen Carbonfasern nicht gegen Korrosion geschützt werden, was zusätzlich zur Einsparung von Betonstahl auch schlankere Bauteile ermöglicht. Die bereits erreichten Ergebnisse wurden im Jahr 2016 mit dem Deutschen Zukunftspreis des Bundespräsidenten gewürdigt. Das Problem dieser Fasern liegt aber in deren Entsorgung oder – das ist natürlich die Vorzugslösung – bei der Recyclingfähigkeit der Fasern und des verwendeten

Hochleistungsbetons. Hieraus ergibt sich noch beachtlicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf - bei den Ulmer Betontagen 2019 wurde darüber und über bereits erreichte Erfolge berichtet. In Baden-Württemberg gibt es bereits erste Zustimmungen im Einzelfall für Konstruktionen unter Verwendung von Carbonbeton und im Umfeld des Themas immer mehr Zulassungen.

Forschungen betreffen auch **Gebäudekonzepte**, bei denen bereits die Möglichkeit späterer Umnutzung und die Rezyklierbarkeit beim Abbruch mitgedacht wird. Der Bauherr steht dann unter Umständen vor der Entscheidung, hinsichtlich der Kosten- und Ressourceneffizienz Vorteile bei der Errichtung gegenüber einer über die gesamte Lebenszeit günstigeren Bilanz abzuwägen. Dies kann z. B. auch bewusst eingebaute Reserven bei der Tragfähigkeit betreffen. Hier schließt sich wieder der Kreis zum Carbonbeton, der ja sehr vorteilhaft für die nachträgliche Verstärkung von Gebäuden eingesetzt werden kann.

Schließlich sei noch die **Wiederverwendung ausgebauter Bauteile** (z. B. Fertigteile oder Stahlträger) als hochwertige Form des Recyclings erwähnt. Dies erfordert neben Anforderungen an die Bauteile selbst und deren lösbare Verbindung auch die Schaffung der produktrechtlichen Rahmenbedingungen.

Bereits diese Beispiele zeigen, dass wir häufig schon innerhalb der umweltpolitischen Betrachtung, aber spätestens bei der Einbeziehung eines globaleren Bilanzraums vor Optimierungsaufgaben stehen. Nicht zuletzt müssten die technischen Lösungen nach der Forschungs- und Einführungsphase auch wirtschaftlich konkurrenzfähig sein. Umso erfreulicher ist die Vielfalt der laufenden Entwicklungen und der dabei jeweils erreichte Stand.

Mit dem - bisher noch nicht erwähnten - Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen (kurz R-Beton) soll nun zu einigen Aktivitäten des Umweltministeriums übergeleitet werden.

#### **4 Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen – kurz: R-Beton**

Selbstverständlich ist die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen in Beton wünschenswert. Hier gibt es deutliche Verbesserungen beim Image dieses Baustoffes. R-Beton wird häufiger ausgeschrieben und auch angewandt, als wir möglicherweise vermuten, Unsicherheiten und offene Fragen werden nach und nach ausgeräumt und zwischenzeitlich angepasste DIN-Normen entfernten formelle Hindernisse. Es ist aber auch offensichtlich, dass eine ökologische Bewertung insbesondere auch die Transportentfernungen berücksichtigen muss und diese sind bislang häufig noch zu groß. Der Grund: Wir haben noch

nicht genügend Recyclingwerke, die Gesteinskörnungen für Beton herstellen. Mit zunehmender Versorgungsdichte sollte auch hier eine Verbesserung eintreten. Wir müssen also den Zirkelschluss unterbrechen „ohne Nachfrage kein Angebot und ohne Angebot keine Nachfrage“.

Trotzdem ist dies gegenüber der Situation von vor ca. 10 Jahren ein erfreulicher Stand. Die entsprechende Richtlinie des Deutschen Ausschusses gab es damals bereits seit einigen Jahren, sie fand aber kaum Anwendung. Das UM hatte sich dann Mitstreiter gesucht und gemeinsam mit dem IFEU-Institut Heidelberg Pilotprojekte auf den Weg gebracht und auch gefördert.

Auch in den Jahren danach gab es immer wieder mehr oder weniger sanften Druck aus dem UM, sei es die Einbindung von R-Beton in das Standardleistungsbuch oder auch bei den Regelungen für die Umweltverträglichkeit der rezyklierten Gesteinskörnungen.

Zum R-Beton gibt es im heutigen Symposium nur einen einzigen Vortrag. Auch in den Symposien des Umweltministeriums wird das Thema inzwischen weiter gefasst. Das zeigt, dass R-Beton inzwischen von der technischen Regelsetzung her, von den Vorgaben für Ausschreibungen oder der Berücksichtigung in Nachhaltigkeitskriterien ein relativ normaler Baustoff geworden ist.

#### **5 THINKTANK**

Ressourcengewinnung, Ressourcennutzung, Ressourceneffizienz und Ressourcenrückgewinnung liegen in der strategischen Verantwortung von Politik und Industrie.

Unsere gemeinsame Antwort darauf ist der **„THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien“**, eine Ideenschmiede mit Alleinstellungsmerkmal in Deutschland. Der THINKTANK soll bei Fragestellungen rund um das Thema Ressourcen Trends erkennen, Impulse geben und Antworten liefern, die zu praktischen, dauerhaft tragfähigen Lösungen und Entscheidungen verhelfen.

Der THINKTANK ist dabei Vordenker in Rohstoff- und Ressourceneffizienzfragen. Als Berater für Entscheidungsträger aus Politik und Industrie entwickelt er auf wissenschaftlicher Basis lösungsorientierte und zukunftsfähige Ideen für zentrale technologisch-strategische Problemstellungen rund um Ressourcenfragen.

Gemeinsam vom Land und Industrieunternehmen und -verbänden finanziert, wird der THINKTANK zielgerichteter und frühzeitiger als andere die gegenwärtigen Herausforderungen und zukünftigen Themen angehen.

Der THINKTANK ist als eine eigenständige, gut sichtbare Einrichtung am KIT angesiedelt. Angebunden an das KIT kann der THINKTANK auf das breite Wissen seiner zahlreichen wissenschaftlichen Institute und Einrichtungen von Anfang an zurückgreifen und so unmittelbar die Expertise und Infrastruktur des KIT nutzen.

Dabei soll sich der THINKTANK nicht auf Baden-Württemberg beschränken. Der Aufbau einer umfangreichen nationalen und internationalen Plattform und die Entwicklung eines weitverzweigten Wissensnetzwerkes aus Industrie, Politik und Wissenschaft sind eine wichtige, wenn nicht die wichtigste Komponente für dieses Vorhaben.

Die Landesregierung hat dem Thema Ressourceneffizienz in der Koalitionsvereinbarung besonderes Gewicht gegeben. Sie will in der Ressourcenpolitik und Ressourceneffizienz internationaler Impuls- und Ideengeber, aber auch Leitmarkt und Leitanbieter sein.

## **6 Nachhaltiges Bauen und NBBW**

Das Land übernimmt eine Vorbildfunktion beim nachhaltigen Bauen. Das Umweltministerium hat zur Schärfung des Bewusstseins für das nachhaltige Bauen das Internetportal [www.nbbw.de](http://www.nbbw.de) (Nachhaltiges Bauen in Baden-Württemberg) eingerichtet. Dort steht ein Katalog mit zehn wesentlichen Nachhaltigkeitskriterien sowie Berechnungs- und Dokumentationshilfen zur Verfügung. Der Kriterienkatalog ist für Neu- und Erweiterungsbaumaßnahmen bei staatlich geförderten kommunalen Hochbaumaßnahmen ausgelegt. Er kann aber auch auf andere Hochbaumaßnahmen außerhalb der staatlichen Förderung vorteilhaft angewendet werden.

## **7 Der Klimaschutz**

Das recyclinggerechte Bauen muss auch in den Kontext des Klimaschutzes gestellt werden. Das von der Bundesregierung vorgelegte Gebäudeenergiegesetz böte die Chance, notwendige energetische Standards für den Neubau und die Sanierung von Gebäuden zu setzen, um das beschlossene Klimaschutzziel zu erfüllen. Die Bundesregierung hat das Ziel gesetzt, bis 2050 einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand zu erreichen.

Der aktuell vorliegende Entwurf des Gebäudeenergiegesetzes wird diesem Ziel allerdings nach Auffassung des UM bei weitem nicht gerecht. Hier gibt es noch erheblichen Diskussionsbedarf.

## **8 Der Klimaschutz**

Zum Abschluss noch die Einordnung des bisher Gesagten in die umweltpolitischen und ressourcenpolitischen Ziele der Landesregierung. Die Ressourcenstrategie des Landes ist vielschichtig. Die Notwendigkeit einer Ressourcenstrategie ergibt sich schon daraus, dass Material- und Energieressourcen die Voraussetzung für die produzierende Industrie und damit Grundlage materiellen Wohlstandes sind.

Die effiziente Nutzung von Ressourcen muss unsere wichtigste Aufgabe sein. Das Ziel ist, soweit wie möglich Stoffkreisläufe zu schließen und - wenn ökologisch und ökonomisch sinnvoll sowie technisch machbar - eine möglichst hochwertige stoffliche Verwertung der entstehenden Abfälle zu gewährleisten. Und da sind wir wieder bei unserem Thema des recyclinggerechten Bauens.

Wir sind gut beraten, mit unseren Bauressourcen sorgsam umzugehen.

### **Autor**

#### **Dr.-Ing. Gerhard Scheuermann**

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft  
Baden-Württemberg  
Kernerplatz 9  
70182 Stuttgart



# Industrielle Ressourcenstrategien – Ideen aus dem THINKTANK am KIT

Prof. Dr. Thomas Hirth




## Industrielle Ressourcenstrategien – Ideen aus dem THINKTANK am KIT

Thomas Hirth, Karlsruher Institut für Technologie  
15. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Karlsruhe, 14. März 2019

Präsidium




KIT – Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft www.kit.edu

## Herausforderungen im 21. Jahrhundert



### Bevölkerungswachstum, Klima-, Rohstoff- und Energiewandel



Global CO<sub>2</sub> emissions set to rise 2% in 2017 after three-year 'plateau'

➔ Nachhaltige Rohstoffe, Prozesse und Produkte

Quelle: FAO, IEA, U.S. Geological Survey, Global Carbon Project, Climate News  
T. Hirth, R. Busch, J. Iden, in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry



Weltbevölkerung	
2011	7 Mrd. Menschen
2030	> 8 Mrd. Menschen
Nahrungsmittel- u. Wasserbedarf	
2030	+ > 40 %
Energiebedarf	
2030	+ > 50 %
Rohstoffbedarf	
2030	+ > 100 %

Industrielle Ressourcenstrategien – Ideen aus dem THINKTANK am KIT Thomas Hirth

## Die 17 Ziele der Vereinten Nationen für nachhaltige Entwicklung bis 2030

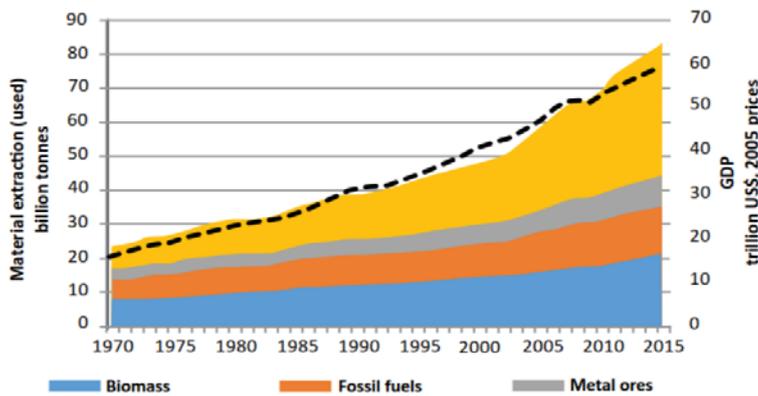


„Nachhaltige Entwicklung ist eine Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können.“ (Brundtland-Kommission, 1987)

Industrielle Ressourcenstrategien – Ideen aus dem THINKTANK am KIT

Thomas Hirth

## Herausforderung Steigender Rohstoffverbrauch

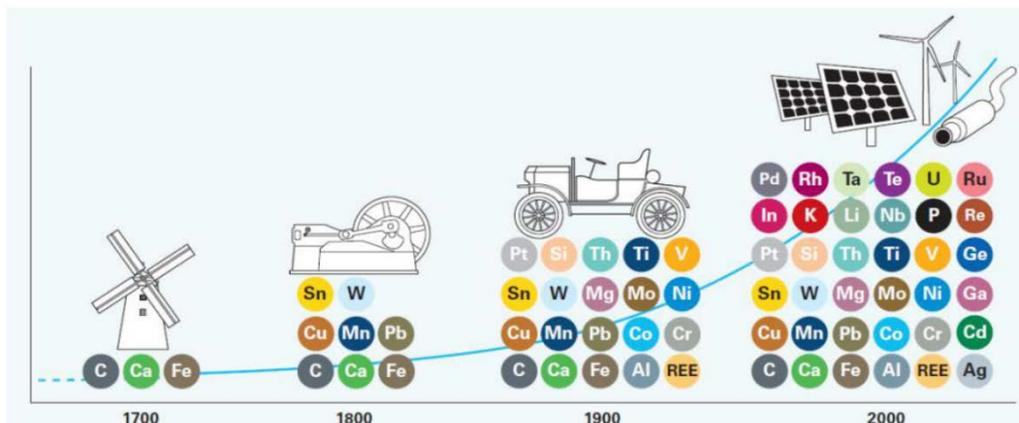


Quelle: Material extraction data from UNEP (forthcoming in 2016b), GDP data from UNSD (2015)

Industrielle Ressourcenstrategien – Ideen aus dem THINKTANK am KIT

Thomas Hirth

## Herausforderung Steigende Rohstoffvielfalt

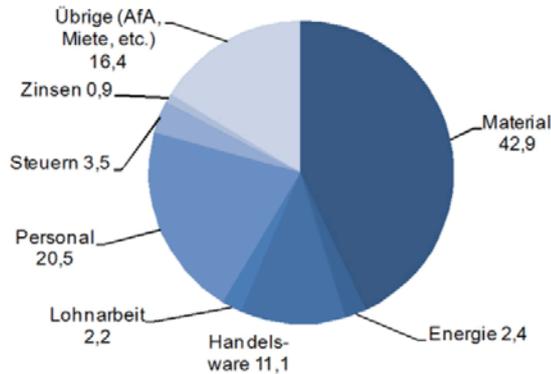


Quelle: Materials critical to the energy industry, UNIA, BP 2014

Industrielle Ressourcenstrategien – Ideen aus dem THINKTANK am KIT

Thomas Hirth

## Herausforderung – Rohstoff- und Materialkosten Materialkosten im verarbeitenden Gewerbe

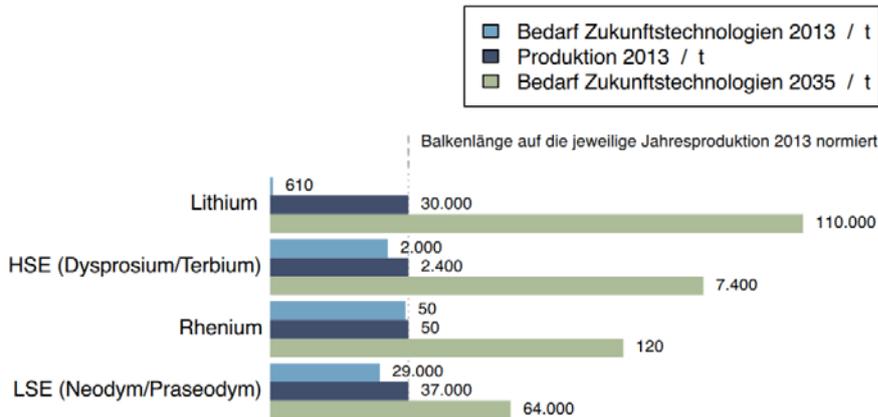


Quelle: Statistisches Bundesamt

Industrielle Ressourcenstrategien – Ideen aus dem THINKTANK am KIT

Thomas Hirth

## Herausforderung Rohstoffbedarf für Zukunftstechnologien



Quelle: Deutsche Rohstoffagentur, 2016

Industrielle Ressourcenstrategien – Ideen aus dem THINKTANK am KIT

Thomas Hirth

## Nachhaltige Rohstoffversorgung, Produktion, Nutzung und Recycling



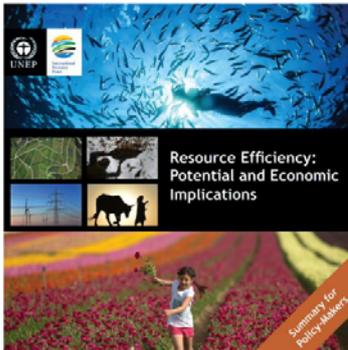
- Should the global population reach 9.6 billion by 2050, the equivalent of almost three planets could be required to provide the natural resources needed to sustain current lifestyles.
- The per capita "material footprint" of developing countries increased from 5 metric tons in 2000 to 9 metric tons in 2017.
- Der Indikator „Rohstoffproduktivität“ drückt aus, wie effizient Rohstoffe in Deutschland eingesetzt wurden, um das Bruttoinlandsprodukt (BIP) zu erwirtschaften.  
Die Bundesregierung hat das Ziel vorgegeben, die Rohstoffproduktivität bis zum Jahr 2020 im Vergleich zum Jahr 1994 zu verdoppeln. Bis 2016 ist die Rohstoffproduktivität um 56% gestiegen.

Quelle: UN, UBA, Statistisches Bundesamt

Industrielle Ressourcenstrategien – Ideen aus dem THINKTANK am KIT

Thomas Hirth

## Steigerung der Ressourceneffizienz Potentiale und wirtschaftliche Auswirkungen



*With concerted action, there is significant potential for increasing resource efficiency, which will have numerous benefits for the economy and the environment.*

Reduktion der globalen Ressourcenentnahme um bis zu 28% bis 2050

Quelle: G7-UNEP/IRP-Report „Resource Efficiency: Potential and Economic Implications“

Industrielle Ressourcenstrategien – Ideen aus dem THINKTANK am KIT

Thomas Hirth

## Akteursplattform Ressourceneffizienz und Landesstrategie Ressourceneffizienz BW



Industrielle Ressourcenstrategien – Ideen aus dem THINKTANK am KIT

Thomas Hirth

## Ziele der Landesstrategie Ressourceneffizienz Baden-Württemberg



Das wirtschaftliche Wachstum vom Ressourcenverbrauch unter Beibehaltung und Ausbau des hohen Anteils am produzierenden Gewerbe sowie Erhalt der baden-württembergischen Wirtschaftsstruktur entkoppeln.



Das Ziel der Nationalen Nachhaltigkeitsstrategie – die Verdoppelung der Rohstoffproduktivität von 1994 bis 2020 – unterstützen.



Baden-Württemberg zum Leitmarkt und zum Leitanbieter von Ressourceneffizienztechnologien und so zu einer der ressourceneffizientesten Regionen entwickeln.



Sichere Versorgung der Wirtschaft mit Rohstoffen durch effizientere Gewinnung von Primärrohstoffen und der Erhöhung des Anteils an Sekundärrohstoffen.



Industrielle Ressourcenstrategien – Ideen aus dem THINKTANK am KIT

Thomas Hirth

## Landesstrategie Ressourceneffizienz BW Aktionsfelder





Innovation und Technologieentwicklung



Material- und Energieeffizienz in Unternehmen



Sekundärrohstoffe nutzen und Kreislaufwirtschaft stärken



Nachhaltige Rohstoffgewinnung und sichere Rohstoffversorgung der Wirtschaft



Indikatoren, Messgrößen und Zielgrößen

Quelle: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft et al. (2016)

Industrielle Ressourcenstrategien – Ideen aus dem THINKTANK am KIT
Thomas Hirth

## THINKTANK „Industrielle Ressourcenstrategien“ am KIT verortet






Ministerpräsident Kretschmann, Umweltminister Untersteller und Wirtschaftsministerin Hoffmeister-Kraut haben in der Regierungspressekonferenz am 9. Januar 2018 in Stuttgart den THINKTANK „Industrielle Ressourcenstrategien“ vorgestellt.

**Der THINKTANK ist zunächst auf eine Laufzeit von vier Jahren angelegt und wird von Land und Industrie gefördert. Unabhängiger Vordenker und Impulsgeber, Aufzeigen von Trends und Unterstützung der Politik und Wirtschaft**

Industrielle Ressourcenstrategien – Ideen aus dem THINKTANK am KIT
THINKTANK INDUSTRIELLE RESSOURCENSTRATEGIEN
Thomas Hirth

## THINKTANK „Industrielle Ressourcenstrategien“ Eine gemeinsame Initiative von Industrie und Politik



Beteiligte Unternehmen und Verbände

























Industrielle Ressourcenstrategien – Ideen aus dem THINKTANK am KIT
Thomas Hirth

9

## THINKTANK „Industrielle Ressourcenstrategien“

### Ziele

- **Unabhängiger Vordenker und Impulsgeber** auf nationaler und internationaler Ebene zu Ressourceneffizienz, -nutzung und -politik
- **Aufzeigen von Trends** auf wissenschaftlicher Basis für Politik und Industrie unter Einbeziehung des Strukturwandels und der Entwicklung neuer Geschäftsmodelle
- **Unterstützung der Politik und Wirtschaft** bei der strategischen Entscheidungsfindung – langfristig tragfähige Entscheidungen



Industrielle Ressourcenstrategien – Ideen aus dem THINKTANK am KIT

Thomas Hirth

## THINKTANK „Industrielle Ressourcenstrategien“

### Inhaltlicher Aufbau

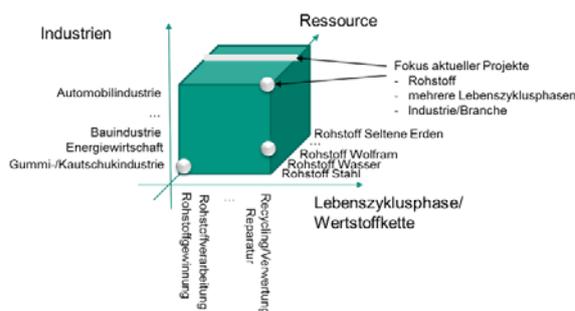


Industrielle Ressourcenstrategien – Ideen aus dem THINKTANK am KIT

Thomas Hirth

## THINKTANK „Industrielle Ressourcenstrategien“

### Interdisziplinärer Ansatz



- Welche Industriebereiche, Technologien, Ressourcen, Lebenszyklusphasen und Phasen der Wertschöpfung kommen in Baden-Württemberg zum Tragen?
- Der THINKTANK betrachtet mehrere Rohstoffe, alle Lebenszyklusphasen und mehrere Industriebereiche und Branchen integriert und berücksichtigt Sektorkopplungen.

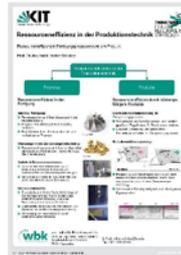
Industrielle Ressourcenstrategien – Ideen aus dem THINKTANK am KIT

Thomas Hirth

## Pilotprojekte des THINKTANK



- Werden durch Impulse aus der Industrie initiiert und definiert
- Betreffen kurzfristig oder mittelfristig umsetzbare Themen
- Ergeben bereits kurzfristig Ergebnisse, die ein Umsetzungspotential in der Wirtschaft zeigen
- Führen zur Erprobung von neuen Technologien und Geschäftsmodellen



Industrielle Ressourcenstrategien – Ideen aus dem THINKTANK am KIT

Thomas Hirth

## Laufende Pilotprojekte des THINKTANKS



- Transparenz von (Roh-) Stoffdaten durch digitale Technologien
- Ökologische und betriebswirtschaftliche Bewertung der Kreislaufwirtschaft
- Wirtschaftsstrategische Rohstoffe und industrieller Strukturwandel – alternative Forschungs- und Industriestrategien
- Stoffkreisläufe schließen durch ressourceneffiziente Prozesse und Produkte
- Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe



Industrielle Ressourcenstrategien – Ideen aus dem THINKTANK am KIT

Thomas Hirth

## Pilotprojekt „Transparenz von (Roh-)Stoffdaten durch digitale Technologien“



### Fragestellung/Herausforderung

Die Transparenz hinsichtlich verwendeter Rohstoff- und Materialeigenschaften ist aus verschiedenen Gründen notwendig.

- Gesetzliche Berichtspflichten (REACH, RoHS)
- Ökobilanzierung, LCA, CSR
- Optimierte Recycling, Kreislauffähigkeit

### Zielsetzung

Effizienter Daten- und Informationstransfer zwischen verschiedenen Stakeholdern entlang der Wertschöpfung durch Einsatz digitaler Technologien

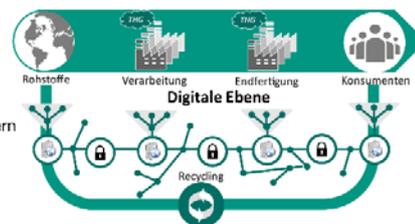
- Datenbanksysteme, Permissioned-Ledgers, Blockchains, digitale Zwillinge
- Wahrung von Betriebsgeheimnissen
- Qualitätsstandards, Effizienz

### Herangehensweise

Definition der Anforderungen an eine entsprechende Plattform in einer Konzeptstudie

- Datensicherheit, rechtliche Rahmenbedingungen
- Schnittstellen, Datenerhebung, Datenumfang
- Nutzungskonzepte, Chancen und Risiken

Konkrete Ausarbeitung für spezifische Branchen und Rohstoffe (z.B. Automobilindustrie, Stahlindustrie)



Industrielle Ressourcenstrategien – Ideen aus dem THINKTANK am KIT

Thomas Hirth

## Transparenz von (Roh-) Stoffdaten durch digitale Technologien und Blockchain

### „Digital Twin of Everything“ – das gläserne Produkt

Viel mehr als nur Smart, auch nachhaltig heißt für Industrial Ecology - IEC

Die Angst vor dem gläsernen Menschen ist groß. Recht sinnvoll gibt es die Forderungen nach einem vollständigen Datenschutz, der die persönlichen Daten der Menschen schützt und ein Maximum schützt. Doch wie sieht es mit Daten zu einem Produkt? Mühen sie sich geradezu, obwohl fast hier auch vermeintlich waren, was in ihnen enthalten ist, welche Vorgeschichte sie haben und woher sie kommen?

Die Gegenheit der Fall der Welt bereits nachfolgenden praktischen Produktentwicklungsprozessen über das Abstrahieren, über ein Carbon Footprint oder grüne Stühle, die enthalten sind. Sie geben Hinweise, wie die Produkte zu entstehen sind. Zu vielen Produkten führen Betriebsanleitungen oder Diagramme im Internet und können mit einem QR Code oder einer Seriennummer abgerufen werden. Können – was aus dem B2B-Bereich – von Konsumenten werden, umgeben, genau informiert sein über die, woher sie Geld kassieren?

Man könnte das als eine Variante zum „Digital Twin“ eines Produktes bezeichnen. Für ein Produkt liegen Informationen vor, die derzeit noch unterschiedlich strukturiert sind auf der Verpackung, auf dem Produkt selbst, in einer Datenbank oder im Internet. Warum bildet man nicht all diese Informationen über einem einheitlichen und leicht modifizierbaren System, das digital intern verfügbar ist?

Quelle: „Blockchain-Technologie für die industrielle Produktion und digitale Kreislaufwirtschaft“, THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien, unveröffentlicht

Industrielle Ressourcenstrategien – Ideen aus dem THINKTANK am KIT Thomas Hirth

## Leuchtturmprojekte des THINKTANK

- Greifen übergeordnete industrielle, politische und gesellschaftliche Bedarfe auf
- Umfassen strategische Themen bzw. Fragestellungen mit längerfristigem umwelt- und wirtschaftspolitischen Fokus
- Nutzen die Leistungsfähigkeit und das Kompetenzspektrum des THINKTANK und vernetzen bzw. verstärken diese
- Sind für mehrere Branchen und Unternehmen sowie die Gesellschaft von strategischem Interesse
- Sind Projekte mit besonders großem Hebel bei der Verbesserung der Ressourceneffizienz

Industrielle Ressourcenstrategien – Ideen aus dem THINKTANK am KIT Thomas Hirth

## Nachhaltige Entwicklung Eine Aufgabe für Gesellschaft, Wirtschaft und Wissenschaft

### Dialog von Gesellschaft, Wirtschaft und Wissenschaft

Quelle: Bundesregierung, BMBF

Industrielle Ressourcenstrategien – Ideen aus dem THINKTANK am KIT Thomas Hirth

# **Bewertung der regionalen Rohstoffverfügbarkeit für die Herstellung von Beton**

Lothar Benzel

## **Zusammenfassung**

Die Rohstoffsicherung in Baden-Württemberg erstreckt sich auf einen Zeitraum von 30 bis zu 45 Jahren und erfolgt entsprechend des regionalen Bedarfes an mineralischen Rohstoffen. Weitere Vorgaben und Konzepte des Landes bilden den inhaltlichen Rahmen. Räumlich umgesetzt wird die Rohstoffsicherung in den Regionalplänen der zwölf Regionen im Land. Die Ausgestaltung obliegt den Regionalverbänden und führt zu unterschiedlichen Ergebnissen mit Folgen für die Rohstoffsicherungssituation, die betrieblichen Perspektiven und schließlich auch für die Verfügbarkeit von Baurohstoffen und Industriemineralen. Die Festlegung der Gebiete erfolgt in mehrjährigen Fortschreibungsverfahren der (Teil-)Regionalpläne. Zusammen mit den nachfolgenden komplexen Genehmigungsverfahren und der parallellaufenden betrieblichen Daueraufgabe der Flächensicherung ergibt sich ein vergleichsweise statisches Konstrukt mit langer Vorlaufzeit, das derzeit nur noch begrenzt in der Lage ist, Spitzen in der Nachfrage abzudecken.

Auf badischer Seite ist am Oberrhein eine zunehmend angespannte Situation der Rohstoffsicherung von Süden nach Norden festzustellen, trotz vergleichsweise neuer Plangrundlagen. Im Süden sind geologisch bedingt größere Körnungen abgelagert und hierdurch geringere Sandanteile verfügbar, jedoch bei gleichzeitig angemessenen Gebietsfestlegungen und etlichen Neuaufschlüssen. Demgegenüber nimmt nach Norden zwar der Sandanteil der Lagerstätten zu, einhergehend jedoch mit einer starken Konzentration der Abbaustätten durch knappe Flächenbereitstellung in der Planung. Anders stellt sich die Situation in den übrigen Lockergesteinsregionen dar: Die dortigen Regionalpläne sind am Ende ihrer rechnerischen Laufzeit angekommen und befinden sich in Fortschreibung. Demzufolge sind die ausgewiesenen Gebiete zu weiten Teilen abgebaut und die Betriebe dringend auf die planerische Bereitstellung neuer Gebiete angewiesen. In den Festgesteinsregionen – dies betrifft insbesondere Muschel- und Jurakalk – stellt sich die Situation etwas differenzierter dar: Mit Ausnahme eines Regionalplanes sind die Pläne noch vergleichsweise aktuell und grundsätzlich geeignet eine dauerhafte Versorgung sicherzustellen. Dennoch besteht Nachsteuerungsbedarf an etlichen Standorten aufgrund der gestiegenen Nachfrage nach gebrochenem Naturstein generell und insbesondere auch nach hochwertigen Splitten und Brechsanden. Die Verbände kommen dem durch Änderungen ihrer Planwerke i. d. R. nach und befinden sich diesbezüglich in unterschiedlichen Stadien des Prozesses.

Mit Blick auf die künftige Rohstoffgewinnung ist für den Oberrhein von einem Rückgang der Abbaustätten, mit gleichzeitiger Zunahme der durchschnittlichen Fördermengen an den übrigen Standorten, auszugehen, um die Nachfrage decken zu können. Die Kies- und Sandgewinnung an Donau und Hochrhein, in Oberschwaben und im Bodenseeraum wird sich in Zukunft verstärkt auch auf kleinere Rohstoffvorkommen sowie Vorkommen mit höheren nicht verwertbaren Anteilen ausrichten müssen. Bei den Steinbrüchen wird von Planungsseite auf möglichst wenig Nutzungskonflikte, insbesondere auf Siedlungsferne der Abbaustätten und leistungsfähige Verkehrsverbindungen, Wert gelegt.

## **1 Planerische Grundlagen zur Rohstoffsicherung**

Die Rohstoffsicherung in Deutschland erfolgt nicht über ein eigenes Fachplanungsrecht, sondern durch die Raumordnung, Landes- und Regionalplanung. Gesetzliche Grundlagen sind § 2 II Nr. 4 ROG in Verbindung mit § 11 III Nr. 10 LPlIG. Demnach sind die räumlichen Voraussetzungen für die vorsorgende Sicherung und die geordnete Aufsuchung und Gewinnung von standortgebundenen Rohstoffen zu schaffen. Die Umsetzung dieser Regelungen erfolgt im Landesentwicklungsplan Baden-Württemberg (2002) sowie räumlich konkretisiert in den Regionalplänen der zwölf Regionen in Baden-Württemberg.

Für die Ausgestaltung der Regionalpläne liegt eine Verwaltungsvorschrift des Wirtschaftsministeriums über die Aufstellung von Regionalplänen und die Verwendung von Planzeichen (VwV Regionalpläne) in der Fassung vom 1.6.2017 vor. Gemäß Randnummer 3 ist der Regionalplan auf einen Zeitraum von 15 Jahren auszurichten. Festlegungen zur Rohstoffsicherung können für Abbaugelände auf einen Zeitraum von rund 20 Jahren und für Sicherungsgelände auf einen Zeitraum von rund 25 Jahren ausgelegt werden. Sie müssen mit der Gesamtplanung für die Region vereinbar sein [1].

Zur Rohstoffsicherung können Vorranggebiete für den Abbau oberflächennaher Rohstoffe, Vorranggebiete zur Sicherung von Rohstoffen, Vorbehaltsgebiete zur Sicherung von Rohstoffen sowie Ausschlussgebiete für den Abbau oberflächennaher Rohstoffe festgelegt werden [2]. Hinzu kommen häufig nachrichtliche Übernahmen der genehmigten Abbau- und Erweiterungsgebiete. Vorranggebiete als Ziele der Raumordnung sind abschließend abgewogen, sowie sachlich und räumlich bestimmt, dass innerhalb dieser Gebiete die Rohstoffgewinnung und -sicherung Vorrang vor anderen Nutzungen hat, die diesen Zweck erschweren oder ausschließen könnten. Diese Festlegungsqualität ist anzustreben, da nur sie weitgehend sicherstellen kann, dass Rohstoffvorkommen und -lagerstätten nicht anderweitig überplant werden. Die Festlegungsqualität von Vorbehaltsgebieten entspricht nur Grundsätzen der Raumordnung und stellt eine Vorgabe für nachfolgende Ermessensentscheidungen dar. Der Sicherung und Gewinnung von Rohstoffen ist hier besonderes Gewicht einzuräumen. Aufgrund der schwächeren Festlegungsqualität sollten Vorbehaltsgebiete nur hilfsweise zur Anwendung kommen, wenn eine abschließende Abwägung aufgrund besonderer Konstellationen nicht möglich erscheint. Die Festlegung von Ausschlussgebieten wurde in den vergangenen Jahren nur noch vereinzelt vorgenommen, da die Erarbeitung einer entsprechenden Gebietskulisse ebenfalls den Anforderungen

der Positivplanung entsprechen muss. Um diesen Aufwand zu vermeiden, werden regelmäßig textliche Festlegungen zum Ausschluss der Rohstoffgewinnung in anderen freiraumbezogenen Festlegungen getroffen, wie z. B. bei Grünzäsuren, Gebieten zur Entwicklung von Natur und Landschaft oder Gebieten für den vorsorgenden Grundwasserschutz.

## **2 Rohstoffsicherungssituation in den Regionen**

### **2.1 Region Rhein-Neckar (soweit BW)**

Die Kies- und Sandgewinnung in der Region erfolgt nur noch in sehr geringem Umfang in einzelnen Gruben im Trockenabbau. Die letzte Nassauskiesung bei Brühl wurde zu Beginn des Jahrzehnts eingestellt. In den Steinbrüchen der Region wird Muschelkalk abgebaut und auch zu Splitten und Brechanden aufbereitet. Daneben werden in der Region auch Zementrohstoffe, Sulfatgesteine und Ziegeleirohstoffe abgebaut.

Der Einheitliche Regionalplan [3] ist seit 2014 verbindlich und sieht vorwiegend Vorranggebiete als Erweiterungen für die bestehenden Gruben und Brüche vor. Des Weiteren sind auch einzelne Neuaufschlüsse für Kiesabbau und einen Quarzporphyrabbau in der Raumnutzungskarte dargestellt. Allerdings liegen für diese Gebiete noch keine Genehmigungen vor, so dass die Region, insbesondere bei den Lockergesteinen nahezu vollständig auf die Zufuhr von außerhalb angewiesen ist.

### **2.2 Region Mittlerer Oberrhein**

In der Region findet ein starker Konzentrationsprozess hinsichtlich der betriebenen Baggerseen statt, während die Fördermengen insgesamt gleich bleiben. Somit nimmt der Substanzverzehr an den verbleibenden Standorten wie auch die Transportwege zum Kunden erheblich zu. Bedenklich ist auch der fortschreitende Wegfall von Standorten mit Schiffsverladung am Rhein. In den Steinbrüchen der Region werden Zementrohstoffe sowie Granit und Muschelkalk abgebaut.

Das Kapitel Sand und Kies des Regionalplans [4] wurde 2015 verbindlich. Dieses Werk sieht lediglich Erweiterungen an einigen Baggerseen vor. Die Gebiete sind dort auf 2x15 Jahre dimensioniert - jedoch ausgehend von einer vergleichsweise niedrigeren Fördermenge als durch den Konzentrationsprozess notwendig wären. Die Gebiete sind teilweise derart klein, dass kein wirtschaftlicher Abbau erzielt werden kann. Bereits seit über 30 Jahren ist in dieser Region kein Neuaufschluss mehr erfolgt und die Zahl der aktiven Baggerseen hat sich seither mehr als halbiert. Auf Grundlage des fortgeschriebenen Regionalplans wurde bisher lediglich eine Flächenenerweiterung genehmigt.

### 2.3 Region Südlicher Oberrhein

Am Südlichen Oberrhein beläuft sich rund 80 % der Fördermenge auf Sande und Kiese, daneben werden Gneis, Granit, Quarzporphyr, hochreiner Kalkstein und Phonolith abgebaut. Der Rückgang der Abbaustätten ist auch in dieser Region feststellbar, jedoch in wesentlich geringerem Umfang als rheinabwärts. Grund hierfür ist, dass bereits in der vergangenen Rohstoffsicherung auch Standorte für Neuaufschlüsse vorgesehen waren.

Der aktuelle Regionalplan [5] ist seit 2017 verbindlich und sieht ebenfalls Erweiterungen und verschiedene Neuaufschlüsse von Kiesgruben vor. Als Bemessungszeitraum wurden 2x20 Jahre gewählt, so dass mehr Planungssicherheit für die Unternehmen besteht. Bisher liegen keine neuen Planfeststellungsbeschlüsse in den neuen Vorranggebieten vor, werden aber noch im Laufe dieses Jahres erwartet.

### 2.4 Region Bodensee-Oberschwaben

Die Rohstoffsicherungssituation in Bodensee-Oberschwaben ist geprägt durch sehr geringe genehmigte Restmengen in den dortigen Kies- und Sandgruben. Der derzeit gültige Teilregionalplan [6] stammt aus dem Jahr 2003 und ist in seinen Flächenfestlegungen überholt, da diese ausgeküst sind. In der Fortschreibung ist ein Bemessungszeitraum von 2x20 Jahren vorgesehen. Der Entwurf sieht hierbei in erster Linie Erweiterungen der bestehenden Gruben vor, plant aber auch Neuaufschlüsse zur Sicherstellung der erforderlichen Mengen und der Aufrechterhaltung der dezentralen Versorgungsstruktur.

In zeitlicher Hinsicht ist zur Jahresmitte die Abwägung der aus der ersten Offenlage des Kapitels Rohstoffsicherung eingegangenen Belange vorgesehen. Da es sich hierbei um ein herausgelöstes Beteiligungsverfahren aus dem Gesamtregionalplan handelt, ist eine erneute Beteiligung der Träger öffentlicher Belange sowie der Öffentlichkeit zu einem späteren Zeitpunkt mit dem Gesamtregionalplanentwurf absehbar. Eine Genehmigung des Regionalplans könnte evtl. 2021 erfolgen. Aufgrund dieser unzureichenden Zeitperspektive haben zahlreiche Unternehmen Raumordnungsverfahren durchgeführt, um für Flächen rechtzeitig die Verträglichkeit aus raumordnerischer Sicht prüfen zu lassen. Hinzu kommen Zielabweichungsverfahren für kleinere Standorte. Die Häufung dieser Verfahren in dieser Region zeigt die restriktiven Festlegungen des verbindlichen Teilregionalplans und deren Handhabung durch die öffentlichen Stellen ebenso wie den starken Handlungsdruck für die Unternehmen aufgrund erheblicher Steigerung der Rohstoffnachfrage.

### 2.5 Region Hochrhein-Bodensee

Die Region Hochrhein-Bodensee verfügt über vielfältige Rohstoffe, die abgebaut werden. Für die Herstellung von Betonzuschlagsstoffen werden jedoch weit überwiegend die Kies- und Sandvorkommen herangezogen. Plangrundlage ist ein Teilregionalplan [7] von 2005, dessen Fortschreibung seit einigen Jahren in Erarbeitung ist. Derzeit erfolgt die Auswertung der ersten Offenlage.

Im Bereich der Kies- und Sandgruben ist ebenfalls ein starker Konzentrationsprozess erkennbar. Die Geschäftsstelle des Regionalverbandes hat in ihrem Vorentwurf dem entgegengesteuert, indem Sicherungsgebiete an neuen Standorten aus dem bisherigen Plan in Abbaugelände umgewidmet wurden und auch Neuaufschlüsse dargestellt wurden. Die Verbandsversammlung hat jedoch diese als Ersatz für auslaufende Gewinnungsstätten vorgesehen Gebiete gestrichen. Hierdurch wird eine Unterdeckung bei Sanden und Kiesen von rund 20 % für den Bemessungszeitraum ausgelöst. Entsprechend wurde von Industrieseite eine Wiederaufnahme der Gebiete und eine Sicherstellung der erforderlichen Rohstoffmengen eingefordert.

### 2.6 Region Donau-Iller

Der Teilregionalplan [8] aus dem Jahr 2006 wird mit der Gesamtfortschreibung komplett überarbeitet. Für den württembergischen Landesteil ist es von großer Bedeutung, dass alle vorhandenen Rohstoffgruppen in ausreichendem Umfang gesichert werden und sich auch gegen Nutzungskonflikte durchsetzen. Hierbei ist, aufgrund der teilweise geringen nutzbaren Mächtigkeit von Sanden und Kiesen in den Talfüllungen insbesondere die Landwirtschaft zu nennen. Der Regionalverband scheint jedoch im Vorentwurf eine aus regionaler Sicht ausreichende und vertretbare Gebietskulisse in den Teilräumen gefunden zu haben. Diese setzt sich sowohl aus Erweiterungen als auch Neuaufschlüssen zusammen. Weniger erfreulich ist hingegen die hohe Restriktivität anderer Gebietsfestlegungen, die einen Abbau außerhalb der Vorrang- und Vorbehaltsgebiete massiv erschweren und somit teilweise als Ausschlussgebiet wirken.

Im Sommer 2019 ist vorgesehen, die Offenlage des Regionalplanentwurfs zu beschließen. Der weitere zeitliche Ablauf ist angesichts der Unwägbarkeiten noch nicht vorhersehbar.

### 2.7 Region Stuttgart

In der Region Stuttgart gilt für die Rohstoffsicherung der Regionalplan [9] aus dem Jahr 2010. Dieser sieht die Rohstoffsicherung für 2x20 Jahre vor und bildet eine regional ausgewogene Planungsgrundlage. Derzeit ist ein Änderungsverfahren für einzelne

Standorte in Vorbereitung, an denen eine Nachsteuerung zur Sicherstellung der Rohstoffversorgung notwendig ist. Beschlüsse hierzu wurden vom zuständigen Planungsausschuss jedoch noch nicht gefasst.

### **2.8 Region Heilbronn-Franken**

Der Regionalplan Heilbronn-Franken [10] aus 2006 sichert Rohstoffe für 2x15 Jahre. Somit ist eine Überarbeitung in den kommenden Jahren anstehend. Aus Sicht der Industrie ist bereits heute an einzelnen Standorten eine Überarbeitung der Rohstoffsicherung notwendig um den Fortbestand der Werke zu garantieren.

### **2.9 Region Ostwürttemberg**

Der Teilregionalplan [11] in der Region Ostwürttemberg wurde im Jahr 2018 genehmigt, Anfang 2019 verbindlich und ist somit die aktuellste Plangrundlage zur Rohstoffsicherung in Baden-Württemberg. Es wurden Vorranggebiete 2x20 Jahre festgelegt. Diese sichern allen in Abbau befindlichen Steinbrüchen langfristig potentielle Erweiterungsflächen zu. Die Struktur kann somit in der Region beibehalten werden und somit gleichzeitig auf größere Neuaufschlüsse verzichtet werden.

### **2.10 Region Schwarzwald-Baar-Heuberg**

In der Region Schwarzwald-Baar-Heuberg erfolgt derzeit eine Änderung des Regionalplans [12] von 2010 an ca. 10 Abbaustätten um überholte Darstellungen in der Raumnutzungskarte an verschiedenen Standorten zu aktualisieren und die Rohstoffversorgung für die Region sicherzustellen.

Das Beteiligungsverfahren hierzu läuft derzeit, so dass von einer Abwägung der eingegangenen Anregungen noch im Jahr 2019 ausgegangen werden kann.

### **2.11 Region Nordschwarzwald**

Der Regionalverband Nordschwarzwald arbeitet derzeit an der Gesamtfortschreibung des Regionalplans. Da die Festlegungen und Darstellungen zur Rohstoffsicherung [13] erst vor wenigen Jahren überarbeitet wurden, ist grundsätzlich eine Übernahme in den neuen Plan vorgesehen, wobei jedoch an Standorten mit Änderungsbedarf auch eine Überarbeitung vorgesehen ist. Ziel ist hierbei die vollständige Nutzung der Lagerstätten an den bestehenden Standorten sowie die Festlegung von neuen Vorranggebieten für nicht mehr erweiterbare Steinbrüche.

### **2.12 Region Neckar-Alb**

Der Regionalplan [14] in der Region wurde 2015 genehmigt und nutzt ebenfalls den Sonderplanungszeitraum über 2x20 Jahre. Aktualisiert wurde der Regionalplan bereits über zwei Änderungsver-

fahren an einigen Standorten, so dass eine passende und aktuelle Grundlage für nachfolgende Genehmigungsverfahren vorliegt.

## **3 Typische Erschwernisse für die Rohstoffgewinnung**

Die Erschwernisse bzw. Herausforderungen für die Rohstoffgewinnung sind teilweise über alle Rohstoffgruppen hinweg vergleichbar, teilweise aber auch regional- oder abbauspezifisch. Beispielsweise ist der Erwerb oder die Pacht von Grundstücken zum Abbau landesweit eine Herausforderung und eine betriebliche Daueraufgabe, hat aber regional sehr verschiedene Ausprägungen. Hierauf soll, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, im Folgenden eingegangen werden:

### **3.1 Erschwernisse beim Nassabbau von Kies und Sand**

Für den Nassabbau wird von Seiten der Politik und Verwaltung häufig der Tieferbaggerung Vorrang vor der Flächenerweiterung eingeräumt. Dies zieht, insbesondere in Gebieten mit Zwischenhorizonten innerhalb des Rohstoffkörpers, umfassende Untersuchungen zum Grundwasser nach sich und verlängert die Genehmigungsprozesse.

Immer wieder stellt der Umgang mit Kieswaschwässern und deren Rückführung in den See eine Herausforderung dar. Dies betrifft insbesondere tiefe Seen, die schon lange in Nutzung sind.

Die Ausbildung von Flachwasserzonen an den Ufern tiefer Baggerseen zur Sicherstellung der jahreszeitlichen Umwälzung von Oberflächen- und Tiefenwasser und damit einer ausreichenden Sauerstoffversorgung im Wasserkörper wurde lange Jahre entsprechend den Empfehlungen aus einem Leitfaden [15] erfolgreich praktiziert. Genehmigungsbehörden weichen nun hiervon ab und fordern ungegerechtfertigt größere Flachwasserzonen, was mit erheblichen Gewinnungsverlusten und sinkender Flächeneffizienz einhergeht.

Findet die Nassauskiesung unter Wald statt, wird grundsätzlich eine flächengleiche Ersatzaufforstung verlangt. Die im Landeswaldgesetz ohne Rangfolge auch vorgesehene Walderhaltungsabgabe wird bisher jedoch nicht akzeptiert.

Wenn eine Standortgemeinde das kommunale Einvernehmen zum Vorhaben versagt und die Genehmigungsbehörde dieses nicht ersetzt, kann dies gegebenenfalls zum Ende eines Vorhabens oder zum Rechtsstreit führen.

Ebenfalls unkalkulierbar sind Widerstände durch Bürgerinitiativen. Bei Vorhaben am Oberrhein wird hierbei häufig die Flächenumwandlung in eine Wasserfläche und damit der Entzug für eine terrestrische Nutzung angeführt.

Über allem stehen die weiter zunehmenden Flächennutzungskonflikte und die fortschreitende Fragmentierung des Außenbereiches, so dass die Standortsuche für Neuaufschlüsse eine große Herausforderung darstellt.

Hinsichtlich der Grundstücksverfügbarkeit stellt am Oberrhein die häufig anzutreffende Realteilung eine große Herausforderung für die Betriebe dar, da regelmäßig dutzende kleinste Flurstücke erworben werden müssen. Erschwerend kommt in Teilräumen noch hinzu, dass beim Anbau von Sonderkulturen häufig keine Bereitschaft zum Verkauf besteht.

### **3.2 Erschwernisse beim Trockenabbau von Kies und Sand**

Während am Oberrhein nahezu ausschließlich die Gewinnung im Grundwasser erfolgt, findet der Abbau in Oberschwaben überwiegend oberhalb des Grundwassers statt. Obwohl eine vollständige Gewinnung des Rohstoffes unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten sinnvoll und häufig ohne Beeinträchtigung des Grundwassers möglich wäre, bestehen von verschiedenen Landratsämtern Vorbehalte gegenüber Nassabbau sowie temporärem Nassabbau, also einem kleinflächigen Abbau im Grundwasser mit zeitnah nachfolgender Wiederverfüllung im Grundwasserhorizont mit standorteigenem Abraum. Gerade dies könnte die Flächeneffizienz erhöhen und langfristig zur Ressourcenschonung beitragen, denn nach einer Rekultivierung ist der verbliebene Rohstoff meist nicht mehr wirtschaftlich zugänglich.

Eine weitere Rolle spielt in Oberschwaben die rohstoffgeologische Eignung der Kiesvorkommen: Es wird schwieriger, ausreichend große Vorkommen mit vertretbarem Abraum-Nutzschicht-Verhältnis zu identifizieren, die gleichzeitig nicht unter einer umfangreichen Schutzgebietskulisse blockiert sind. Daneben sollte auch der nicht verwertbare Anteil innerhalb des Rohstoffkörpers, insbesondere Feinsande, Schluff und Ton aus ökonomischen und ökologischen Gründen nicht zu groß werden.

Die Frage der Grundstücksverfügbarkeit in Oberschwaben wird dominiert vom Anbau von Energierohstoffen zum Einsatz in Biogasanlagen. Hier ist die anschließende Wiederherstellung landwirtschaftlicher Nutzfläche von entscheidender Bedeutung. Unter diesem Gesichtspunkt sollte dem temporären Nassabbau mehr Gewicht eingeräumt werden.

### **3.3 Erschwernisse bei der Gewinnung von Festgestein**

Der Abbau von Naturstein, Kalk oder Zementrohstoffen erfolgt aufgrund der höheren nutzbaren Mächtigkeiten i. d. R. kleinflächiger, dafür jedoch intensiver. So sind die Herausforderungen hier die Begrenzung von Emissionen wie Erschütterungen, Schall und Staub aus dem Steinbruchbetrieb.

Die Fördermenge der Steinbrüche ist gegenüber den Kiesgruben im Mittel auch höher, so dass die äußere Erschließung bzw. der durch den Steinbruch im unmittelbaren Umfeld ausgelösten Verkehr häufig von der Bevölkerung als problematisch angesehen wird. Die Steine-Erden-Industrie versucht, Neuaufschlüsse entsprechend an das qualifizierte Verkehrsnetz anzuschließen.

Entsprechend einer Erhebung des Landesamtes für Geologie, Rohstoffe und Bergbau [16] nimmt der Anteil an nicht verwertbaren Bestandteilen in den Lagerstätten stetig zu, die Lagerstätteignung ab. Ob dies durch die Erweiterung der Brüche in schlechtere Bereiche ausgelöst wird oder durch höhere Qualitätsanforderungen an die Produkte und damit verbunden einen höheren Verwurf, sei dahingestellt.

Bürgerinitiativen formieren sich inzwischen regelmäßig bei zu genehmigenden Veränderungen an den Steinbrüchen und lösen für die Unternehmen erhebliche Aufwendungen aus. Die vom Land eingeführte frühe Öffentlichkeitsbeteiligung oder eine kontinuierliche Vorabkommunikation von Vorhaben hat an vielen Stellen, obwohl professionell durchgeführt, versagt.

## **4 Künftige Verfügbarkeit von Rohstoffen**

Die landesweiten Fördermengen werden in den Rohstoffberichten des Landes, herausgegeben vom LGRB in mehrjährigen Abständen veröffentlicht [16, 17, 18]. Die jüngsten Zahlen aus 2017 sind einer Landtagsanfrage [19] zu entnehmen.

Die Förderung von Kiesen und Sanden hatte demnach ihren letzten Hochpunkt im Jahr 2000 bei 45,7 Mio. Tonnen und fiel auf 36,1 Mio. Tonnen im Jahr 2005, um sich seither bei rund 37 Mio. Tonnen einzupendeln. D. h., dass trotz der in diesem Jahrzehnt zunehmenden Bautätigkeit die Gewinnung an Lockergesteinen etwa konstant blieb und weit hinter den Mengen um die Jahrtausendwende zurückbleibt. Dies lässt sich durch eine umfangreiche Substitution von Kies durch gebrochene Natursteine außerhalb der klassischen Kiesregionen erklären sowie durch rückläufige Verkaufszahlen in die Niederlande.

Demgegenüber ist die Rohfördermenge von Karbonatgesteinen zwischen 2000 und 2005 ebenfalls von 35,6 Mio. Tonnen auf 28,5 Mio. Tonnen eingebrochen, hat sich aber seither wieder auf das Ausgangsniveau im Jahr 2000 gesteigert. In einzelnen Regionen liegen die Fördermengen 2017 auch über den Mengen aus dem Jahr 2000: So hat die Region Schwarzwald-Baar-Heuberg bereits 2014 die Fördermengen von knapp 4 Mio. Tonnen Karbonatgestein wieder erreicht und bis 2017 auf 4,7 Mio. Tonnen gesteigert [20].

Ein anderes Bild zeigt sich bei den Grundgebirgssteinen, von denen im Jahr 2000 4,5 Mio. Tonnen entnommen wurden, während in den weiteren Berichtsjahren 2005, 2011 und 2017 die Mengen um 3,5 Mio. Tonnen pendelten.

Künftig könnte sich in Hinblick auf die Produktion von Zuschlagsstoffen für die Betonherstellung in den weit von den Kiesregionen entfernt liegenden Gebieten die Produktion von Brechsanden verstärken, die in der Herstellung zwar aufwändiger, aber transportkostengünstiger sein können. In den Grenzbereichen zwischen Kies- und Festgesteinsräumen wie z. B. zwischen Donau und Alb oder zwischen Kraichgau und Oberrheingraben wird der Markt zeigen, welches Produkt sich unter Materialeigenschaften, Kosten und Verfügbarkeit in welchem Umfang weiter entwickeln wird. Klar ist, dass auf keine der vorhandenen Rohstoffgruppen verzichtet werden kann und diese Prozesse sehr langfristig verlaufen.

Betrachtet man unter Berücksichtigung der Zahl der Gewinnungsstätten die durchschnittliche jährliche Fördermenge pro Werk, so ergibt sich folgendes Bild: Bei der Kies- und Sandgewinnung liegt in den Jahren 2000, 2011 und 2017 die durchschnittliche Fördermenge bei knapp 170.000 Tonnen. Lediglich 2005 ist ein Einbruch auf unter 150.000 Tonnen feststellbar. Somit wird deutlich, dass die nun deutlich niedrigere Fördermenge auch von wesentlich weniger Abbaustätten entnommen wird. Angesichts der planerischen Rahmenbedingungen ist absehbar, dass sich dies künftig ändern wird und durch den stark fortschreitenden Konzentrationsprozess die durchschnittliche Fördermenge je Werk stark ansteigen wird. Allein in der Region Mittlerer Oberrhein ist anhand der derzeit verbindlichen Rohstoffsicherung ein Rückgang auf nur noch 20 Baggerseen vorgezeichnet, mit entsprechend höherer Rohstoffnachfrage bei den verbleibenden Werken. Bereits derzeit stellt sich die Situation wesentlich problematischer dar als von der Regionalplanung im Plankonzept zugrunde gelegt: Bei einer Betriebsbefragung durch den ISTE im Jahr 2018 sind bei sieben Werken Flächenerweiterungen geplant oder in Vorbereitung, bei zehn Werken sind diese bereits im Verfahren, für lediglich ein Werk wurde auf Basis des neuen Teilregionalplans eine Erweiterung genehmigt, für 10 Werke ist eine Erweiterung der Fläche nicht geplant oder nicht möglich. Bei drei Werken ist die Situation offen oder unklar. Somit gehen nach abgeschlossener Restauskiesung ein Drittel aller Werke in der Region zeitnah aus der Produktion. Zwei große Werke haben seit der Erstellung des Teilregionalplans aufgrund unzureichender Perspektiven den Betrieb eingestellt und die Werksanlagen rückge-

baut. An der Festlegung einzelner Neuaufschlüsse als Ersatz wird kein Weg vorbei führen um die Rohstoffversorgung dezentral sicherzustellen.

Bei den Quarzsandgruben wurde diese Entwicklung bereits vorweggenommen, so dass die seit 2000 etwa halbierte Fördermenge aus wesentlich weniger Gruben entnommen wird und diese durchschnittlich 25 % mehr produzieren müssen. Bei einer theoretisch konstanten Fördermenge würde dies die eineinhalbfache Rohstoffentnahme pro Werk ergeben.

Bei den Jura- und Muschelkalksteinbrüchen stellt sich angesichts des etwas geringeren Konzentrationsprozesses und der steigenden Fördermengen die Situation so dar, dass heute die durchschnittliche Fördermenge pro Werk bei über 345.000 Tonnen liegt, mehr als doppelt so hoch wie bei den Kies- und Sandgruben bzw. Baggerseen.

Für die dauerhafte, verlässliche und dezentrale Verfügbarkeit von Rohstoffen in der Zukunft ist die (Wieder-)herstellung und der Erhalt der Zugänglichkeit von Rohstoffvorkommen und -lagerstätten Herausforderung und Daueraufgabe zugleich:

- Die Akzeptanz- und Bewusstseinsschaffung für die Erweiterung von Gewinnungsstätten und für Neuaufschlüsse muss intensiviert werden. Dies gilt sowohl für die Bevölkerung, aber auch für die Politik und die Behörden.
- Das Zusammenspiel von Rohstoffgewinnung und Schutzgebieten muss dahingehend justiert werden, dass der Ermessensspielraum der Behörden zugunsten von Vorhaben genutzt wird. Oft können im Dialog Verbesserungen für beide Seiten gefunden werden. Dies gilt auch bei einer raumnutzungsüberreifenden Betrachtung im Zuge der Rohstoffsicherung.
- Das politische Ziel des Flächensparens (unter das die Rohstoffgewinnung eigentlich nicht fällt, sondern lediglich Siedlungs- und Verkehrsflächen) sollte von allen Beteiligten berücksichtigt werden mit der Konsequenz der Neuerschließung mächtiger Rohstoffvorkommen, insbesondere beim Nassabbau.
- Der Abbau nicht zugänglicher Lagerstättenteile sollte unter Wahrung der wirtschaftlichen Verhältnismäßigkeit, der Genehmigungsfähigkeit und der technischen Realisierbarkeit angestrebt werden.
- Die Mitnutzung bisher nicht verwertbarer Bestandteile könnte in Einzelfällen die Effizienz einer Gewinnungsstätte erhöhen. Von einer generellen wirtschaftlichen Verwertbarkeit ist jedoch nicht auszugehen, da die Potentiale bereits heute weitgehend genutzt sein dürften.

Als zweiter Bereich für die Befriedigung der Nachfrage nach Betonzuschlagsstoffen ist die Inkaufnahme eines erhöhten Aufbereitungs- und Herstellungsaufwandes durch alle Beteiligten zu sehen:

- Intensivierung der Nutzung komplex zusammengesetzter Moräneablagerungen außerhalb der Talfüllungen in Oberschwaben unter Inkaufnahme größerer Materialumlagerungen. Dies schließt auch, soweit möglich, die Aufbereitung von mit Nagelfluh durchsetzten Lagerstättenteilen mit ein.
- Konsequente Nutzung der (temporären) Nasauskiesung in Oberschwaben, soweit dies mit den örtlichen Verhältnissen zum Trink- und Grundwasserschutz vereinbar ist. Nur hierdurch kann ein vollständiger Abbau bis zur Neige einer Lagerstätte in vielen Fällen ermöglicht werden.
- Nutzung von kleinräumigen Kies- und Sandvorkommen mit geringem Lagerstättenpotential unter Inkaufnahme eines höheren Erschließungsaufwands. Die Nutzung dieser Vorkommen kann die Gewinnung in der Fläche sicherstellen und gleichzeitig zur Mitversorgung großer, zentraler Kies- und Splittwerke längerfristig beitragen.
- Schließlich können in Teilräumen des Landes außerhalb der Lockergesteinsregionen Brechsande und Splitte aus gebrochenen Natursteinen Natursande und Kiese teilweise ersetzen. Hierbei sind die höheren Herstellungskosten den Transportkosten gegenüberzustellen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass rohstoffgeologisch für Betonzuschläge kein großräumiger Mangel in Baden-Württemberg zu erkennen ist. Jedoch bestehen teilträumig große Herausforderungen, um ausreichend Rohstoffe aus dem regionalen Umfeld bereitzustellen. Die Steine-Erden-Industrie erhofft sich durch die Erarbeitung der Rohstoffstrategie des Landes Baden-Württemberg als Fortschreibung und Ergänzung des vorhandenen Rohstoffsicherungskonzepts Stufe II [21] aus dem Jahr 2004 wesentliche und zwingend notwendige Impulse für die heimische Rohstoffsicherung und -gewinnung. Allerdings sind diesbezüglich seit der letzten Arbeitskreissitzung im März 2018 keine inhaltlichen Verlautbarungen des federführenden Umweltministeriums mehr erfolgt. Dies zeigt auf bedrückende Art und Weise, wie schwerfällig das Verwaltungshandeln im Bereich der Gewinnung von mineralischen Rohstoffen neben der Genehmigungs- und Planungsebene auch auf höchster Ebene im Land vonstattengeht.

Möglicherweise wird aber auch die erst seit kurzem in Erarbeitung befindliche Rohstoffstrategie des Bundes schneller Impulse setzen und hierbei Impulse aus anderen Bundesländern mit weniger restriktiven Rohstoffsicherungsprozessen aufgreifen.

## 5 Literatur

- [1] Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg (2017): Verwaltungsvorschrift des Wirtschaftsministeriums über die Aufstellung von regionalplänen und die Verwendung von Planzeichen (VwV Regionalpläne), RN 3, Stuttgart.
- [2] Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg (Hrsg., 2002): Landesentwicklungsplan 2002 Baden-Württemberg, Seite 39, Stuttgart.
- [3] Verband Region Rhein-Neckar (Hrsg., 2014): Einheitlicher Regionalplan Rhein-Neckar, Mannheim.
- [4] Regionalverband Mittlerer Oberrhein (Hrsg., 2015): Kapitel 3.3.6 Oberflächennahe Rohstoffe - Kies und Sand, Karlsruhe.
- [5] Regionalverband Südlicher Oberrhein (Hrsg., 2017): Regionalplan Südlicher Oberrhein, Freiburg.
- [6] Regionalverband Bodensee-Oberschwaben (Hrsg., 2003): Teilregionalplan Oberflächennahe Rohstoffe 2003, Ravensburg.
- [7] Regionalverband Hochrhein-Bodensee (Hrsg., 2005): Teilregionalplan Oberflächennahe Rohstoffe für die Region Hochrhein-Bodensee, Waldshut-Tiengen.
- [8] Regionalverband Donau-Iller (Hrsg., 2006): Regionalplan 3. Teilfortschreibung Gewinnung und Sicherung von Bodenschätzen, Ulm.
- [9] Verband Region Stuttgart (Hrsg., 2010): Regionalplan, Stuttgart.
- [10] Regionalverband Heilbronn-Franken (Hrsg., 2006): Regionalplan Heilbronn-Franken 2020, Heilbronn.
- [11] Regionalverband Ostwürttemberg (Hrsg. 2019): Kapitel 3.5 Gebiete für Rohstoffvorkommen - Teilfortschreibung Rohstoffsicherung des Regionalplans 2010 Ostwürttemberg, Schwäbisch Gmünd.
- [12] Regionalverband Schwarzwald-Baar-Heuberg (Hrsg., 2010): Regionalplan Schwarzwald-Baar-Heuberg Fortschreibung Rohstoffsicherung, Villingen-Schwenningen.
- [13] Regionalverband Nordschwarzwald (Hrsg., 2015): 2. Änderung und Ergänzung des Teilregionalplans Rohstoffsicherung 2000-2015, Pforzheim.
- [14] Regionalverband Neckar-Alb (Hrsg., 2015): Regionalplan Neckar-Alb 2013, Mössingen.
- [15] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Hrsg., 2004): Kiesgewinnung und

Wasserwirtschaft - Empfehlungen für die Planung und Genehmigung des Abbaues von Kies und Sand, Karlsruhe.

[16] Regierungspräsidium Freiburg - Abteilung 9 Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) (Hrsg., 2013): Rohstoffbericht Baden-Württemberg 2012/2013, Seite 156, Freiburg.

[17] Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) (Hrsg., 2002): Rohstoffbericht Baden-Württemberg 2002, Freiburg.

[18] Regierungspräsidium Freiburg - Abteilung 9 Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) (Hrsg., 2006): Rohstoffbericht Baden-Württemberg 2006, Freiburg.

[19] Landtag von Baden-Württemberg (2018): Drucksache 16/4174, Stuttgart.

[20] Regierungspräsidium Freiburg - Abteilung 9 Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) (Hrsg., 2018): Rohstoffgewinnung in der Region Schwarzwald-Baar-Heuberg, in: LGRB-Nachrichten, Nr. 2018/06, Freiburg.

[21] Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg Referat Wirtschaft, Umwelt und Nachhaltigkeit (Hrsg., 2004): Rohstoffsicherungskonzept des Landes Baden-Württemberg Stufe 2 "Nachhaltige Rohstoffsicherung", Stuttgart.

## **Autor**

### **Dipl.-Ing. Lothar Benzel**

Industrieverband Steine und Erden  
Baden-Württemberg e. V.  
Gerhard-Koch-Straße 2  
73760 Ostfildern

# Geologische Aspekte und Umfeldanalyse zur überregionalen Rohstoffverfügbarkeit von Beton – Sand, Kalkstein, Gips

Christoph Hilgers und Ivy Becker

## Zusammenfassung

Die hohe Nachfrage an Beton stellt Herausforderungen an die Bauindustrie und Infrastrukturplanung. Dabei kann ein kontinuierlich steigender Bedarf, in Deutschland gleichermaßen wie global, verzeichnet werden, der das Ergebnis einer wachsenden Bevölkerung und steigenden ökonomischen Wohlstandes ist. Die Ausgangsrohstoffe für Beton, wie Kalk- und Tonsteine, Sande und Kiese, sowie Gips und Anhydrit, verzeichnen dabei eine höhere jährliche Wachstumsrate als die steigende Bevölkerung (2,4 % zu 1,2 % in 2017), weshalb Strategien zu einer globalen Sicherung der Bereitstellung geschaffen werden müssen. Aus geologischer Sicht ist keine Limitierung dieser Massenrohstoffe in Sicht, allerdings wird die Verfügbarkeit durch politische, ökonomische, gesetzliche und Umweltaspekte sowie Unterschiede in der regionalen Verteilung begrenzt. Auch in Deutschland sind die Baurohstoffe in abbauwürdigen Mengen vorhanden. Viele dieser Vorkommen sind aber durch vorrangige Flächennutzung verplant oder in privatem Besitz, wodurch es bei steigender Bautätigkeit zu regionaler Rohstoffknappheit kommt, da Neueröffnungen von Abbauf Flächen oder Erweiterungen langjährige Genehmigungsverfahren mit sich ziehen. In Zukunft werden sich dadurch auch Baurohstoffe verteuern, da lange Transportstrecken bei heutigen Preisen nicht wirtschaftlich sind. Gleichzeitig werden Recycling-Baustoffe eine immer größere Rolle spielen, um der steigenden Nachfrage gerecht zu werden.

## 1 Einleitung

Beton ist weiterhin der vorwiegend eingesetzte Baustoff. Deshalb nimmt die Sicherung einer On-Demand Bereitstellung der für die Herstellung benötigten Massenrohstoffe eine tragende Rolle in der Bauindustrie und Infrastrukturplanung ein, wobei auch überregionale Zulieferer steigende Bedeutung erlangen. Er wird mit Wasser aus Sand und Kies sowie Zement angemischt (z. B. [1]). Für den Zement werden gemahlene Kalksteine und Tone oder Mergel sowie unterschiedliche Zuschlagstoffe wie Sand, Gips, Hütensande und Flugasche bei ca. 1450 °C gebrannt, wobei aus dem Karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) und den Tonen und Mergeln verschiedene Calciumsilikate, -aluminat, der Branntkalk ( $\text{CaO}$ ) und Kohlenstoffdioxid gebildet werden.

Die global wachsende Weltbevölkerung und deren zunehmender ökonomischer Wohlstand haben einen weiterhin wachsenden Energie- und Rohstoffverbrauch zur Folge [41]. Von einem konstanten Rohstoffverbrauch oder einer Kreislaufwirtschaft ist die globale Ökonomie noch weit entfernt [18]. Vielmehr nimmt die globale Materialeffizienz seit dem Wirtschaftsaufstieg Chinas und der Produktionsverlagerung aus materialeffizienten Ländern wie Deutschland, Japan oder Korea in weniger materialeffiziente Ökonomien wie China, Indien und Asien seit der Jahrtausendwende ab (UNEP 2016:16) [48]. Zudem führt

anthropogener Druck durch eine wachsende Weltbevölkerung und zusätzlich wachsenden Wohlstands zunehmend auch zu Engpässen bei der globalen und auch nationalen Rohstoffverfügbarkeit von Massenrohstoffen.

Bei der Bewertung der Rohstoffverfügbarkeit müssen neben der geologischen Verfügbarkeit der Massenrohstoffe für Beton auch andere Kontrollfaktoren, die zu deren Bereitstellung beitragen, berücksichtigt werden. In diesem Beitrag tragen wir ausgewählte Aspekte des globalen und nationalen Bedarfs der Massenrohstoffe Sand und Kies, Kalkstein und Gips zusammen. Wir zeigen an Beispielen auf, wie sich die quantitative und qualitative Verfügbarkeit dieser Massenrohstoffe an der Schnittstelle Geologie, Technologie und Politik verändert. Hierzu werden unterschiedliche Einflussfaktoren anhand einer Umfeldanalyse in Anlehnung an eine PESTLE-Analyse dargestellt [24]. Dazu werden neben den naturwissenschaftlichen Aspekten einige ausgewählte politische (P=political), ökonomische (E=economic), rechtliche (L=legal) und ökologische (E=environmental) Aspekte dargestellt, um externe (Risiko)-Faktoren bei der Rohstoffverfügbarkeit einzubeziehen. Der Beitrag erhebt aufgrund der umfassenden Thematik keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern beabsichtigt einen Ein- und Überblick in das komplexe Themenfeld der Massenrohstoffe zu liefern.

## 2 Geologische Verfügbarkeit

### 2.1 Reserven, Ressourcen, Geopotential

Die ökonomische Gewinnung der geologisch verfügbaren Massenrohstoffe ist eng mit den technologischen Entwicklungen bei der Exploration und Produktion von Rohstoffen gekoppelt. Entsprechend ändern sich die Volumina der bekannten, derzeit technisch förderbaren und wirtschaftlich abbaubaren *Reserven*. Kommt es zu höheren Preisen und wurden technische Innovationen entwickelt, die beispielsweise den Abbau in bisher nicht förderwürdigen Tiefen oder als Beiprodukt ermöglichen, werden ungenutzte, bekannte Lagerstätten rentabel und somit steigt das Volumen unserer bekannten Reserven. Damit einher geht eine entsprechende Änderung der Volumina der *Ressourcen*. Ressourcen bezeichnen die bekannten Lagerstätten, die zum Teil noch nicht geologisch voll erfasst, und die nach heutiger Technik nicht wirtschaftlich abgebaut werden können. Durch Innovation kann also eine Ressource zu einer Reserve werden.

Neben den Reserven und Ressourcen ist das Geopotential eine schlecht erfassbare Kenngröße. Das Geopotential sind die Lagerstätten, die derzeit noch unbekannt sind, und durch neue Explorationsaktivitäten und neue Technologien entdeckt werden (z. B. [14]). Zahlreiche Gebiete der Erde sind noch nicht oder nicht nach neuesten Standards exploriert, und daher das Lagerstättenpotential nicht vollständig bekannt. Dies beinhaltet sowohl kontinentale als auch marine Lagerstättenpotentiale. Durch die Exploration unbekannter Gebiete und die neue Bewertung bekannter Gebiete mit neuesten Technologien werden auch zukünftig neue Geopotentiale erkannt und als neue Ressourcen und Reserven erfasst. Die *geologischen* Ressourcen der Massenrohstoffe für Beton sind global und in Deutschland auf lange Zeit in ausreichender Menge nach den derzeitigen Qualitätsstandards verfügbar.

Im Folgenden wird der Bedarf und die zugrundeliegenden Volumina der geologischen Verfügbarkeit dargestellt.

### 2.2 Bedarf

Der Rohstoffverbrauch steigt mit der seit 1970 etwa verdoppelten Weltbevölkerung von derzeit 7,7 Mrd. Menschen mit einer jährlichen Zunahme von ca. 83 Mio. Menschen, was in etwa der Gesamtbevölkerung Deutschlands entspricht [47], kontinuierlich an. Die globale Bevölkerungszunahme verringerte sich von 2,1 % in 1969 auf 1,2 % in 2017, aber das nahezu lineare Wachstum wird sich weiter fortsetzen [22,47]. Der durchschnittliche globale Wohlstand per capita steigt stärker als das globale Bruttoinlandsprodukt mit derzeit 3,2 % (Stand 2017) [57] und geht mit einem globalen steigenden Rohstoffverbrauch einher.

Krausmann et al. [17,19] differenzieren den Rohstoffverbrauch und zeigen für den Zeitraum 1973 bis 2002, dass der per capita Verbrauch von Biomasse sank (1,2 % Zunahme), fossile Energien konstant blieben (1,4 %), aber Erze und Industriemineralien (2,1 %) sowie vor allem Baurohstoffe mit 2,4 %/Jahr (3,5 t/per capita/Jahr) stärker zunahm als die Weltbevölkerung. Insbesondere durch das wirtschaftliche Wachstum von China und anderen unterentwickelten Ländern liegt seit 2002 der Rohstoffverbrauch aller Rohstoff-Sparten wieder über dem Bevölkerungswachstum (Biomasse 2,1 %, fossile Energien 2,6 %, Erze 5,7 %, mineralische Rohstoffe 4,0 % [19]). Dabei kann der Anstieg der Baurohstoffe in Europa und den USA mit dem Bevölkerungswachstum, in den anderen Ländern mit dem Wachstum des BIP korreliert werden [23].

In ihrem Ausblick für 2060 geht die OECD von einem weiterhin starken Wachstum des Baustoffsektors (Sand, Kies, Kalkstein, Gips, Ton, Natursteine) um 97 % von derzeit 44 Mrd. t (2017) auf 86 Mrd. t (2060) aus (OECD 2018:123, 124) [33]. Dabei nimmt die Entkopplung des erwarteten globalen Wirtschaftswachstums (+224 %) vom Rohstoffverbrauch (+97 %) von derzeit 5,8 (2017) auf 8,4 t/per capita/Jahr (2016) weiter zu (OECD 2018: 124, 128) [33].

Angaben zu Produktion, Reserven und Ressourcen von Rohstoffen im Baustoffsektor sind in vielen Ländern nicht richtig erfasst und großen Unsicherheiten unterworfen [z. B. 23, 19]. So wird beispielsweise die Produktion von Gips in China, dem mit Abstand größten Massenrohstoffproduzenten, innerhalb eines Jahres mit 15,5 Mio. t (USGS 2019:75, Stand 2017) [46] und 130 Mio. t (USGS 2018:77, Stand 2016) [45] angegeben. Trotz dieser variablen Bewertung sind die Massenrohstoffe Sand, Kies, Kalkstein und Gips für die Bauindustrie weltweit weit verbreitet und eine generelle geologische Knappheit aufgrund geologischen Rohstoffmangels ist nicht absehbar (USGS 2019:43) [46].

#### 2.2.1 Gips

Die kontinuierlich ansteigende, globale Produktion von Gips beträgt 260 Mio. t im Jahr, wovon alleine 50 % in China gewonnen werden (USGS 2018:75, Stand 2017) [45]. An globalen, bekannten Reserven werden mehr als 1,8 Mrd. t angenommen (USGS 2018:75, Stand 2017) [45], die globalen Ressourcen sind groß und nicht detailliert erfasst. In Deutschland werden ca. 4 Mio. t Gips und Anhydrit pro Jahr abgebaut [5], davon über 1 Mio. t/a aus 17 Betrieben in Baden-Württemberg [20]. Neben natürlichen Lagerstätten steigt der Anteil von Gips aus Industrieabfällen, insbesondere durch die Rauchgasentschwefelung (REA-Gips) in Kohlekraftwerken. Der Anteil synthetischen Gipses am Bedarf beträgt in den USA ca. 50 % [45], in Deutschland werden 6,7 Mio. t/a REA-

Gips produziert [58]. In Deutschland werden bei der Zementherstellung etwa 1,5 Mio. t Gips und Anhydrit als Erstarrungsregler eingesetzt, wovon knapp 20 % durch den Sekundärrohstoff REA-Gips gedeckt werden [50]. Der REA-Gips wird fast vollständig für die Baustoffindustrie, insbesondere der Gipsbaustoffindustrie, verwendet [59].

Ein Ende der Kohlekraftwerke in Deutschland bedingt einen Ersatz der derzeitigen Gipsmassen (5,1 Mio. t aus Braunkohle-, 1,6 Mio. t aus Steinkohlekraftwerken) durch eine signifikante Steigerung der Produktion aus natürlichen Lagerstätten und die Erhöhung der Recyclingrate.

Das globale Handelsvolumen an Gips (HS92:2520) [27] stieg von 1995 (541 Mio. USD) auf 1,29 Mrd. USD 2017, Hauptexporteure sind Thailand (26 %), der Oman (13 %) und Deutschland (11 %) [34,38]. Deutschland ist Nettoexporteur mit einem Handelsvolumen von knapp 128 Mio. USD (Stand 2017) [34].

### 2.2.2 Kalkstein

Die globale Produktion von Kalkstein nimmt kontinuierlich zu und betrug 2018 knapp 425 Mio. t [39]. Da die Produktion von Kalkstein nicht in allen Ländern akkurat erfasst wird, schlägt die EU (2007:55) zur Ableitung der globalen Kalkstein-Fördermengen einen Faktor von 1,19 je Tonne Portlandzement vor. Die globalen Reserven und Ressourcen sind groß und nicht detailliert erfasst. In Deutschland werden ca. 53 Mio. t Kalk- und Dolomitstein pro Jahr abgebaut [6]. Allein zur Zementherstellung importiert Deutschland 2,1 Mio. t Kalkstein und exportiert 0,27 Mio. t [5]. Durch die erhöhte Bauaktivität in Deutschland mit einem erhöhten Zementverbrauch von 4,8 % zwischen 2016 und 2017 steigt auch der Kalksteinverbrauch [51].

Das globale Handelsvolumen an Kalkstein (HS92:2521) [28] stieg von 1995 (174 Mio. USD) auf 815 Mio. USD in 2017, Hauptexporteure sind die Vereinigten Arabischen Emirate (35 %), Malaysia (11 %), die Philippinen (5 %) und der Oman (4,6 %) (Stand 2017) [34,38]. Deutschland ist Nettoimporteur von Kalkstein mit einem Warenwert von ca. 15 Mio. USD (Stand 2017) [34]. Ebenso stieg das Handelsvolumen von gebranntem Kalk (HS92:2522) global auf 949 Mio. USD im Jahr 2017, bei dem Deutschland als drittgrößter Exporteur einen Anteil von 8,6 % (82 Mio. USD) einnimmt, was einem Nettoexport von fast 30 Mio. USD (Stand 2017) entspricht [34].

### 2.2.3 Sand und Kies

Die globale Produktion von Sand und Kies allein für die Bauindustrie beträgt 30 bis 40 Mrd. t, insgesamt wird von einem Verbrauch von 40 bis 50 Mrd. t ausgegangen [49]. Da global der illegale Sand- und Kiesabbau signifikant ist, gibt die EU (2007:58) zur

Ableitung von Bausand und -kies Fördermengen aus der Zementproduktion mit einem Faktor von 6,09 je Tonne Zement an. Die globalen Reserven und Ressourcen sind groß und nicht detailliert erfasst. In Deutschland werden ca. 247 Mio. t Bausand und -kies pro Jahr produziert (Stand 2016) [6] und die Abbaugebiete sind grundsätzlich landesweit verbreitet (Abbildung 1). Von der Gesamtproduktion werden in Baden-Württemberg 37,9 Mio. t Sand gewonnen, davon knapp 1 % aus Sandstein (Mürbsand) [20]. Der Nettoexport Deutschlands bleibt wegen der hohen Transportkosten mit 11,6 Mio. t gering (Stand 2016) [6]. Durch die erhöhte Bauaktivität in Deutschland mit einem erhöhten Zementverbrauch von 4,8 % zwischen 2016 und 2017 [51] steigt auch der Verbrauch von Bausand und -kies.



Abb. 1: Verteilung von Bausand und Kiesvorkommen in Deutschland (verändert nach [12,13])

Zusätzlich werden in Deutschland ca. 9,9 Mio. t Industriesand produziert, wobei es sich in Deutschland fast ausschließlich um Quarzsande handelt (Stand 2016) [6,13]. Die globale Produktion von Industriesand beträgt 300 Mio. t (USGS 2019: 143, Stand 2018) [46]. Global und insbesondere in den USA ist in den letzten Jahren ein exponentieller Anstieg des Bedarfs zu verzeichnen. Etwa 25 % der globalen Produktion werden als Fracking-Sand in den USA verwendet (USGS 2019: 143, Stand 2018) [46].

Das globale Handelsvolumen an Sand (HS92:2505) [29] stieg von 1995 (741 Mio. USD) auf 1,23 Mrd. USD im Jahr 2017 [34]. Hauptexporteure sind Deutschland mit einem Anteil von 12 %

(149 Mio. USD), die Niederlande (11 %), Australien (11 %) und die USA (7,2 %). Hauptimporteure sind Belgien/Luxemburg (11 %), die Niederlande (9,3 %), Singapur (6,6 %) und Mexico (6,4 %) [34]. Von den 1,23 Mrd. USD hatten Natursande aller Art (HS92:250590) [30] 2017 einen Anteil am globalen Handelsvolumen von 528 Mio. USD [34]. Neben den Hauptexporteuren, den Niederlanden (19 %) und Deutschland (16 %), stellen Vietnam (6,4 %), China (5,4 %) und Jordanien (4,5 %) die Hauptexporteure im asiatischen Wirtschaftsraum [34]. Deutschland ist Nettoexporteur mit einem Wert von von 60,9 Mio. USD [34]. Der Anteil von Quarzsand (HS92:250510) [31] am globalen Handelsvolumen beträgt 705 Mio. USD (2017). Des Weiteren ist Deutschland nach Australien (15 %), den USA (12 %) und Belgien/Luxemburg (11 %) mit 8,9 % der viertgrößte Exporteur von Quarzsand (62,9 Mio. USD) und Nettoexporteur mit einem Wert von 32,5 Mio. USD (Stand 2017) [34].

#### 2.2.4 Zement

Die globale Produktion von Zement betrug 4,7 Mrd. t im Jahr 2016, davon produzierte China 52 % [8]. Der USGS [46] gibt eine globale Zementproduktion von 4,1 Mrd. t in 2016 und 2018 an. Die globalen Reserven und Ressourcen von Kalkstein, dem Hauptbestandteil bei der Herstellung von Zement, sind groß und ein geologischer Mangel dieser Massenrohstoffe nicht absehbar [46]. In Deutschland werden ca. 34 Mio. t Zement pro Jahr mit einer Steigerung von 4 % zum Vorjahr produziert (Stand 2017) [52]. Zur Herstellung von Zement werden neben gemahlenem Kalkstein kieselsäure- und tonerdehaltige Zusatzstoffe benötigt, die bei Zugabe von Wasser schnell erhärtungsfähige Calciumsilikat- und -aluminat-Hydrate bilden. Diese hydraulischen Zusatzstoffe werden ebenfalls aus natürlichen Lagerstätten wie Ölschiefern, Ton(steinen), oder vulkanischen Gesteinen wie Trass (feinkörniger Tuff), oder aus Industrieabfällen wie Flugaschen gewonnen. Als latent-hydraulischer Zusatzstoff wird dem Zement fein gemahlener Hütten sand der glasig erstarrten Hochofenschlacke zugegeben, der mit den sulfatischen Anregern Gips oder Anhydrit, oder dem alkalischen Anreger Calciumhydroxid (gewonnen durch die Hydratation des Branntkalks) langsam verfestigt. Ein zunehmender Bedarf an Zusatzstoffen führt aufgrund des Rückgangs der Schwerindustrie und der Energiewende in Deutschland zu Problemen.

Hütten sande aus der Schlacke der Roheisenherstellung und insbesondere hochwertige Flugaschen aus der Steinkohle werden mittelfristig importiert oder substituiert werden müssen [15]. Im Jahr 2013 fielen 3,2 Mio. t Steinkohlenflugaschen in Deutschland an [3], die mit einem Anteil von 88 % in der Zement- und Betonindustrie Verwendung fanden [3]. Im Jahr

2018 wurde bereits nahezu die gesamte Flugasche zur Zementherstellung und im Betonbau verwendet [15].

Das globale Handelsvolumen an Zement (HS92:2523) [32] stieg von 4,7 Mrd. USD (1995) auf 9,1 Mrd. USD im Jahr 2017 [34]. Hauptexporteure sind China (7,3 %), die Türkei (6,8 %), Spanien (5,7 %) und Deutschland (5,3 %) (Stand 2017) [34,38]. Deutschlands Nettoexport betrug 2017 4,4 Mio. t (Stand 2017) [50]. Deutschland exportiert Zement im Wert von 480 Mio. USD und importiert Zement im Wert von 188 Mio. USD (Stand 2017) [34].

### 2.3 Geologische Verfügbarkeit und anthropogener Einfluss

#### 2.3.1 Sand

Sand wird durch natürliche Erosion gebildet. Global werden mindestens 12 Mrd. t pro Jahr an Sedimentfracht als natürliche Erosion in die Weltmeere verbracht [42,53,54]. Durch den anthropogenen Einfluss mit Wald-Rodungen, durch Flussbegradigungen, sowie durch die Anlage großer landwirtschaftlicher Flächen u. a. nimmt die Erosion signifikant zu. So werden nach Wailling [53] bis zu 24 Mrd. t/a Sediment von Dämmen zurückgehalten. Wilkinson & McElroy [58] schließen auf natürlichen Stofftransport in Flüssen von 21 Mrd. t/a und zusätzliche anthropogen verursachte Erosionsraten von 75 Mrd. t/a. Somit liegt die natürliche Bildung von Sanden und Kiesen deutlich unterhalb des globalen Verbrauchs von 30-40 Mrd. t/a.

Die Qualität des Sands korreliert mit dessen Ablagerungsbedingungen. Geologisch wird zwischen äolischen (Windablagerungen), fluviatilen (Flussablagerungen) und marinen Sanden (Meeresablagerungen) unterschieden. Die homogene Sortierung und gute Rundung des äolischen Feinsandes verhindert ein Verzahnen der Quarzkörner. Diese kann bisher nur durch ein mechanisches Aufbrechen unter erhöhten Kosten, oder durch alternative Bindemittel für Wüstensand wie bspw. Polymerbeton erfolgen [60].

Im marinen Bereich abgebaute Sande zeigen gute Sortierung und einen schlechteren Rundungsgrad der Quarzkörner. Begleitminerale wie Tone erhalten den Kornverbund, mögliche Salzkristalle reduzieren allerdings die Qualität des Sandes und müssen ausgewaschen werden. Insbesondere gut sortierte fossile, also vor langer Zeit im marinen Randbereich abgelagerte und durch geologische Fluide überprägte, Sande werden wegen ihrer besonderen Reinheit in Deutschland als Glassande gewonnen. Für die Bauindustrie werden größtenteils fluviatil abgelagerte Sande und Kiese abgebaut. Auch gering verfestigte Sandsteine und Kiessteine werden aufgebrochen (Mürbsande) und als Sande und Kiese für die Bauindustrie verwendet.

### 2.3.2 Kalk

Kalke werden als chemische Ausfällung vorwiegend im marinen Raum um den Äquator bis zum 30. Breitengrad gebildet, und als Gestein in fossilen Lagerstätten gewonnen. Global werden derzeit etwa 3,5 Mrd. t/a Karbonat [37] in den Weltmeeren ausgefällt. Mit einem globalen Verbrauch von über 4 Mrd. t Kalkstein pro Jahr liegt der anthropogene Verbrauch über der derzeitigen, jährlichen globalen Bildung. Das globale Karbonat-Budget wird durch die globale Temperatur und natürliche Aufwärmung des Meeresswassers wie durch El Niño beeinflusst. Perry & Morgan [35] zeigen, wie Korallen und damit große Rifffkörper durch Bleichung absterben. Diese können sich aber innerhalb von ca. 10 Jahren vollständig erholen, sofern nicht Massenvermehrungen von Seeigeln und anthropogene Einflüsse wie erhöhter Sedimenteintrag und Gewässer-Eutrophierung durch den Ausbau von Resorts sowie Überfischung stattfinden [35]. Durch den erhöhten Ausstoß von Kohlenstoffdioxid bei der Verbrennung organischer Rohstoffe wird ein Drittel des CO<sub>2</sub> in den Weltmeeren gelöst, sodass der pH-Wert der marinen Oberflächenwässer seit Beginn der industriellen Revolution um 26 % reduziert wurde [16]. Während das Wachstum von Algen und Seegrass durch den erhöhten CO<sub>2</sub> Gehalt steigen sollte, werden Kalkschaler und Riffbildner durch das sauer werdende Meerwasser reduziert und der Kaskadeneffekt bleibt unklar [26].

Die in küstennahen Lagunen, Riffen, Vorriffen und Atollen gebildeten Karbonate zeigen, vergleichbar zu den Sanden unterschiedlicher Ablagerungsräume, abhängig vom Ablagerungsraum unterschiedliche Gesteinsqualitäten. Zwar wird die Kalksteinqualität durch unterschiedliche geologische Prozesse, wie chemische Änderungen durch beispielsweise den Einbau von Magnesium bei der Dolomitisierung, verschlechtert, dennoch sind die geologischen Reserven Deutschlands und auch global auf lange Zeit in ausreichender Menge verfügbar.

### 2.3.3 Gips

Evaporite wie Gips und Anhydrit werden durch Eindampfung in zeitweise abgeschlossenen und temporär mit Meeresswasser überspülten Randbecken und in intrakontinentalen Senken ausgefällt. Dies geschieht vor allem in ariden Gebieten um den 30. Breitengrad, vergleichbare Gebiete finden sich aber auch bis zum Äquator und zur polaren Tundra (z. B. Anden, Himalaya). Gips wird für die Bauindustrie aus fossilen Lagerstätten, d. h. Steinbrüchen, als Festgestein abgebaut, und als Abfallprodukt bei der Rauchgasentschwefelung weiterverwendet. Aus diesen Produkten, die beispielweise bei der Luftreinhaltung von Kohlekraftwerken freigesetzt werden, wird der sogenannte REA-Gips gewonnen, der knapp 20 % (Stand 2014)

der benötigten Gipsmengen bei der Zementherstellung deckt [50].

## 2.4 Qualitative Verfügbarkeit

Wegen des regionalen Mangels an Bausand wird Sand insbesondere von China vermehrt aus Spülungen im marinen Bereich gewonnen. Der Salzgehalt wird in der Regel nicht vollständig ausgewaschen, sodass die Lebenszeit der Bauwerke signifikant reduziert wird.

Im Gegensatz dazu hat Japan in den 1990er Jahren die Gewinnung von marinen Spülsanden verboten, was einen Einbruch der Sandindustrie um 60 % zur Folge hatte und die Entwicklung von M-Sand (manufactured sand) vorantrieb [21]. Japan führt Sand im Wert von 63,5 Mio. USD (Stand 2017) [34] ein, wovon allerdings fast 97 % Quarzsande sind, die zu 70 % aus Australien und knapp 10 % aus dem Vietnam stammen (Stand 2017) [34].

Gleichzeitig hat der erhöhte Anspruch an die Baustoffe einen erhöhten Anspruch an die Rohstoffqualität zur Folge.

## 2.5 Regionale Verfügbarkeit und nationale Politik

Obwohl die globale, geologische Verfügbarkeit von Massenrohstoffen auf lange Sicht gegeben ist, zeigen sich regional große Unterschiede im Zugang zu Baurohstoffen. Wirtschaftsstarke Kleinststaaten wie Singapur oder die Vereinigten Arabischen Emirate verzeichnen einen stetigen Bauboom, können den Bedarf mangels geologischer Verfügbarkeit aber nicht durch heimische Rohstoffe decken. Der Mangel führt zu intensivem und auch illegalen Abbau von Sand in benachbarten Ländern, was Länder wie Kambodscha im Jahr 2016, und zuvor Malaysia im Jahr 1997, sowie Indonesien im Jahr 2007 veranlasste, den Export von Bausanden nach Singapur einzuschränken bzw. zu beenden [2]. In den Medien wird der Begriff „Sandkrieg“ verwendet, aber bisher kann der Export von Bausanden beispielsweise aus Australien in die Vereinigten Arabischen Emirate den Ausfall der Importe aus anderen asiatischen Ländern ersetzen.

Auch in Schwellenländern wie bspw. Indien ist die Versorgung mit Sand nicht überall gegeben. So wird für manche Regionen der Sand durch Schlacke, Formsande aus den Gießereien, Bettasche aus der Kohleverbrennung oder durch andere industrielle Abfallstoffe substituiert, um den Bedarf an Sand und Beton zu decken [z. B. 36]. Der Verbrauch Indiens ist mit 0,7 t/p.c./a noch wesentlich geringer als der Chinas (3,4 t/p.c./a) [9], steigt aber auch kontinuierlich an. Wenn durch den Ausbau der Infrastruktur und des Hochbaus in Indien sich der Verbrauch von Baurohstoffen weiter auf den Stand entwickelter Länder von ca. 3 t/p.c./a entwickelt, ist bei einer Bevölkerung von fast 1,4 Mrd. Einwohnern der weiter zunehmende, globale Bedarf an Baurohstoffen absehbar.

Chinas Ausbau der Infrastruktur, seiner Urbanisierung und seine territoriale Ausdehnung mit dem Bau künstlicher Inseln benötigt mehr als die Hälfte der global produzierten Sande und Kiese [49]. Mindestens sieben künstliche Inseln von insgesamt 13 km<sup>2</sup> wurden von China auf Riffen im Südchinesischen Meer aufgeschüttet, die zu militärischen Basen ausgebaut wurden [44]. Damit soll der Zugang zu den reichen Fischbeständen, der Einfluss auf die globalen Handelsrouten [44] sowie auf die großen Kohlenwasserstoffvorkommen gesichert werden [11].

Solange die Politik den freien Welthandel der Rohstoffe gewährleistet [13] und das Innovationspotential fördert [14], ist weder von einer absoluten noch von einer relativen Knappheit auszugehen.<sup>3</sup>

### 2.5.1 Deutschland

Deutschland hat mit der norddeutschen Tiefebene, dem Rheingraben und dem Molassebecken große Sedimentbecken, in denen geologisch ausreichende Mengen von Sand und Kies im Verlauf der jüngeren Erdgeschichte abgelagert wurden, die den Bedarf langfristig decken würden. Hinzu kommen zahlreiche kleinere Vorkommen von Sanden und gering verfestigten Sandsteinen. Jedoch ist auch in Deutschland die regionale Verfügbarkeit beeinträchtigt. So sind in Baden-Württemberg rund 85 % aller bekannten Lagerstätten von Sand und Kies wegen Bebauung und Schutzgebieten für den Abbau nicht verfügbar [13]. In den Regionen Karlsruhe-Mannheim, Stuttgart, dem Ruhrgebiet und Berlin führt das bereits zu temporärem Mangel an Baurohstoffen, was sich in den nächsten Jahren bei weiterhin steigendem Baurohstoffbedarf noch verstärken wird [13].

### 2.6 Ökonomische Aspekte und Verfügbarkeit

Die heterogene Verteilung der Sand- und Kieslagerstätten in Deutschland hat für weiter entfernte Gebiete, die keinen Zugang zu Sand und Kies vor Ort haben, erhöhte Transportkosten zur Folge. Sofern eine Verschiffung mangels Lagerstätten an schiffbaren Flüssen ausbleibt, machen die Transportkosten per LKW den Sand nach ca. 50 km unwirtschaftlich [56]. Während eine Tonne Mauersand in Heinsberg 10 € netto kostet, sind in Kamen 17,50 € pro Tonne aufzuwenden. Für eine Lieferung von Kamen nach Bochum über knapp 50 km Distanz sind bereits 180 € zu veranschlagen. Des Weiteren bleibt der Ausbau von am Rhein gelegenen Sand- und Kieswerken aus, wodurch die Transportkosten erniedrigt und die Versorgungsdistanz erhöht werden könnte. Allein in Baden-Württemberg hat sich die Anzahl der Kieswerke am mittleren Oberrhein von 60 im Jahre 1992 auf 35 im Jahre 2014 verringert und wird nach aktuellen Schätzungen 2045 nur noch bei 20 liegen [4].

Mit den erhöhten Preisen für Bauland geht auch ein starker Anstieg der Preise von Ackerland einher.

Zwar ist der Anstieg abhängig von der Region unterschiedlich, jedoch ist der gemittelte Verkaufspreis Ackerland in Baden-Württemberg mit 26.800 €/ha um 10 % zum Vorjahr gestiegen (Stand 2017) [40]. Bei steigenden Preisen und einem zunehmenden Mangel an Ackerland hat der Wille der Eigentümer, landwirtschaftliche Fläche für den Rohstoffabbau zu veräußern, stark abgenommen [13].

### 2.7 Gesetzliche Aspekte und Verfügbarkeit

Den illegalen Sand-Abbau versucht man auf allen Kontinenten mit gesetzlichen Maßnahmen einzuschränken. In Marokko sind 10 Mio. t, die Hälfte des Bausandes des Landes, durch illegale Entnahme an den Küsten zu verzeichnen [48]. Neben dem illegalen Abbau gingen zahlreiche Regierungen Afrikas wie Botswana und Südafrika mit gesetzlichen Maßnahmen gegen den illegalen Abbau der Sand-Mafia vor.

In Deutschland ist die Planung für Baurohstoffe unsicher. So erfolgte etwa im Gebiet des Mittleren Oberrheins in Baden-Württemberg trotz geologischer, abbauwürdiger Vorkommen seit über 30 Jahren keine Neugenehmigung eines weiteren Sand- und Kies-Abbaus wegen konkurrierender Raumnutzung, vorgegebener Schutzabstände zu vorhandener Infrastruktur, Natur- und Wasserschutzgebieten und Fehlen von Ersatzflächen zu vorgeschriebenen Ausgleichsmaßnahmen [4].

### 2.8 Umweltaspekte und Verfügbarkeit

Umwelteinwirkungen sind durch den illegalen Abbau von Sand auf allen Kontinenten zu beklagen. Kalksteine und Gips verzeichnen wegen des technischen Aufwands beim Abbau, wenn überhaupt, einen geringen Anteil an unerlaubter Gewinnung von Baurohstoffen. Nur die europäischen und nordamerikanischen Richtlinien zeigen nachhaltige Rohstoffproduktion auf.

Der illegale Abbau von Strandsand führt zu Kaskadenwirkungen wie erhöhter Küstenerosion. Bei nachgelagertem illegalen Abbau wandern Salzwasserfahnen in die Grundwässer, es kommt zu Bodensenkungen mit höheren Risiken für Überflutungen, und in entsprechenden Klimaten zu Gesundheitsgefahren wie Malaria in neu gebildeten, stehenden Gewässern [43].

Gleichzeitig investieren viele entwickelte Länder in Sandvorspülungen in den Küstengebieten. Durch die Bevölkerungszunahme der letzten 200 Jahre wurden zunehmend risikobehaftete, strandnahe Gebiete besiedelt und durch effizienten Deichbau große Gebiete urbar gemacht. Für den dadurch bedingten Küstenschutz wurden allein in Sylt seit 1972 rund 50 Mio. m<sup>3</sup> Sand für ca. 228 Mio. € vorgespült, weitere 1,2 Mio. m<sup>3</sup> für 6,5 Mio. € kommen 2019 hinzu [25]. Insgesamt werden in Deutschland etwa 2,5 Mio. t Sand pro Jahr vorgespült (Stand 2016) [13]. Derzeit

wird untersucht, ob die in den vorgespülten Sanden der Ostsee enthaltenen Schwerminerale, insbesondere Zirkon, als wirtschaftsstrategischer High-Tech Rohstoff abgetrennt und die darin enthaltenen Seltenen Erden umweltfreundlich gewonnen werden können [10].

Der Umwelteinfluss der Vorspülungen wird nur selten berücksichtigt. Neben einem Eingriff in Meeres-Flora und -Fauna werden die Sanddepots auf dem Meeresgrund geringer, weil die vorgespülten Sande, die bis zu 10-mal schneller erodiert werden als die natürlichen Strandsande, auch weiter ins Meer hinaustreiben [7]. Dies kann zu massiven Suspensionen von Sedimentfracht im Meerwasser führen, die sich küstenfern bspw. auf Korallen ablagern und zu deren Absterben führen können [55].

Der legale Abbau von Baurohstoffen in Deutschland erfolgt in enger Zusammenarbeit von Behörden, Unternehmen, Rohstoff- und Umweltverbänden. Der Abbau geht mit einer Änderung der Flora und Fauna einher, die den Lebensraum von Arten temporär zerstört, und gleichzeitig neuen Lebensraum für andere Arten schafft [6]. So wird von einer Besiedlung von 90 % der Uhus und 94 % der Uferschwalben in Felswänden und Sandböschungen in aktiven Steinbrüchen der Wallonie Belgiens berichtet [49]. Auch die Rekultivierung erfolgt nach engen Richtlinien, wobei im Sinne des Naturschutzes einer Renaturierung Vorzug eingeräumt wird [6].

### 3 Schlussfolgerung

Der globale und nationale Bedarf von Baurohstoffen steigt kontinuierlich an. Beton, und damit die benötigten Ausgangsstoffe Kalk- und Tonstein, Sande und Kiese sowie Gips und Anhydrit, ist der führende Baustoff.

Die Baurohstoffe sind zwar aus geologischer Sicht unbegrenzt vorhanden, ihre Verfügbarkeit ist aber durch Unterschiede in der regionalen Verteilung sowie durch politische, ökonomische, umwelt- und gesetzliche Aspekte begrenzt. Weitere Einschränkungen sind durch die höheren Ansprüche an die Rohstoffqualitäten zu erwarten.

Der Anteil an Recycling-Baustoffen muss weiter steigen, um der globalen Nachfrage nachzukommen. Eine alleinige Fokussierung auf Recycling wird den nationalen und globalen Bedarf jedoch nicht decken können, da Ansprüche an die Rohstoffqualität steigen, die benötigten Volumina steigen und die Lebenszeit von Gebäuden und damit die Verfügbarkeit der darin verbauten Rohstoffe zu langfristig ist, um durch Abriss der steigenden Anzahl von Neubauten nachzukommen.

Um die Verfügbarkeit von Baurohstoffen zu gewährleisten, müssen frühzeitig mögliche Neu- oder

Wiedereröffnungen, sowie Erweiterungen von Abbauflächen geprüft und langwierige Genehmigungsverfahren effizient gestaltet werden.

Weitere Innovationen beim Abbau und Produktion, beim Bau und Recycling können auch zukünftig die Natureingriffe effizienter gestalten, die begleitet von politischen und gesetzlichen Maßnahmen die Rohstoffverfügbarkeit langfristig sicherstellen.

### 4 Literatur

- [1] Baunetz Wissen (2019), <https://www.baunetz-wissen.de/beton/fachwissen/herstellung/wasserzementwert-150934>, assessed 06/2019.
- [2] BBC (2017) Cambodia bans sand exports permanently. <https://www.bbc.com/news/business-40590695>, assessed 19.5.2019.
- [3] BBS (2016) Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2035 in Deutschland, Studie Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e. V., 50 pp.
- [4] Benz, L., (2019) Bewertung der regionalen Rohstoffverfügbarkeit für die Herstellung von Beton. Fachvortrag 15. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Karlsruher Institut für Technologie, 14. März 2019.
- [5] BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2017a) Deutschland - Rohstoffsituation 2016. Hannover, 190 pp.
- [6] BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2017b) Heimische mineralische Rohstoffe - unverzichtbar für Deutschland!. ISBN: 8-3-943566-80-2, 84 pp.
- [7] Blasberg, M., Henk, M., (2014) Wie Gold am Meer, Die Zeit, Nr. 34, <https://www.zeit.de/2014/34/strand-sand-verschwinden>, assessed 20.5.2019.
- [8] Cembureau (2017) Activity report 2017. 48 pp.
- [9] Chilamkurthy, K., Marckson, A.V., Chopperla, S.T., Santhanam, M. 2016. A statistical overview of sand demand in Asia and Europe. CTMC conference, 15 pp.
- [10] CUTEC (2018) Forschung zur Bereitstellung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe - Zwischenergebnisse. 120 pp.
- [11] Daiss, T., (2019) South China Sea Energy Politics Heat Up Oil Price, <https://oilprice.com/Geopolitics/Asia/South-China-Sea-Energy-Politics-Heat-Up.html>, assessed 19.5.2019.

- [12] Dill, H.G., Röhling, S. (2007) Bodenschätze der Bundesrepublik Deutschland (BSK 1000) 1: 1.000.000.- 1 Karte, Hannover.
- [13] Elsner, H., (2018) Sand - auch in Deutschland bald knapp?. BGR Commodity top News, Vol. 56, 7 pp.
- [14] Fraunhofer-ISI (2005) Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen. Endbericht Forschungsprojekt 09/05 BMWi, 350 pp.
- [15] Heinz, D., Heisig, A., (2018) Flugasche und Hütensand - Zusatzstoffe mit Zukunft?, in Nolting, U., Dehn, F., Haist, M., Link, J., Betone der Zukunft - Herausforderungen und Chancen, Tagungsband 14. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 21. März 2018, 108 pp.
- [16] IGBP, IOC, SCOR (2013) Ocean Acidification Summary for Policymakers - Third Symposium on the Ocean in a High-CO2 World. International Geosphere-Biosphere Programme, Stockholm, Sweden.
- [17] Krausmann, F., Gingrich, S., Eisenmenger, N., Erb, K.-H., Haberl, H., Fischer-Kowalski, M., (2009) Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. *Ecological Economics*, Vol. 68(10), p. 2696-2705. doi:10.1016/j.ecolecon.2009.05.007.
- [18] Krausmann, F., Wiedenhofer, D., Lauk, C., Haas, W., Tanikawa, H., Fishman, T., Miatto, A., Schandl, H., Haberl, H., (2017) Global socioeconomic material stocks rise 23-fold over the 20th century and require half of annual resource use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 114 (8), p. 1880-1885; doi:10.1073/pnas.1613773114.
- [19] Krausmann, F., Lauk, C., Haas, W., Wiedenhofer, D., (2018) From resource extraction to outflows of wastes and emissions: The socioeconomic metabolism of the global economy, 1900-2015. *Global Environmental Change*, Vol. 52, p. 131-140, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2018.07.003
- [20] Landtag (2018) Antwort des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft auf die Anfrage des Abg. Fabian Gramling zu Mineralische Rohstoffe in Baden-Württemberg. Drucksache 16 / 4174, 5 pp.
- [21] Lusty, A., (2013) Manufactured sand for tomorrow. NZ Concrete Industry Conference Queenstown, 8 pp.
- [22] Lutz, W., Samir, K.C., (2010) Dimensions of global population projections: what do we know about future population trends and structures? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, Vol. 365(1554), p. 2779-2791, doi:10.1098/rstb.2010.0133.
- [23] Miatto, A., Schandl, H., Fishman, T., Tanikawa, H. (2016) Global Patterns and Trends for Non-Metallic Minerals used for Construction. *Journal of Industrial Ecology* Vol. 21(4), p. 924-937, doi: 10.1111/jiec.12471.
- [24] More, E., Probert, D., Phaal, R., (2015) Improving Long-Term Strategic Planning: An Analysis of STEEPLE Factors Identified in Environmental Scanning Brainstorms. *Proceedings of PIC MET '15: Management of the Technology Age*, p. 381-394.
- [25] NDR (2019) Küstenschutz: Albrecht begutachtet Strand auf Sylt. <https://www.ndr.de/nachrichten/schleswig-holstein/Kuestenschutz-Albrecht-begutachtet-Strand-auf-Sylt,sylt1146.html>, assessed 19.5.2019.
- [26] NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration (2019) What is oceanic acidification?. <https://www.pmel.noaa.gov/co2/story/What+is+Ocean+Acidification%3F>, assessed 3.6.2019.
- [27] Observatory of Economic Complexity (OEC), HS data BACI International Trade Database, Gypsum HS92:2520, <https://atlas.media.mit.edu/de/profile/hs92/2520/>, assessed 05/2019.
- [28] Observatory of Economic Complexity (OEC), HS data BACI International Trade Database, Kalkstein HS92:2521, <https://atlas.media.mit.edu/de/profile/hs92/2521/>, assessed 05/2019.
- [29] Observatory of Economic Complexity (OEC), HS data BACI International Trade Database, Sand HS92:2505, <https://atlas.media.mit.edu/de/profile/hs92/2505/>, assessed 05/2019.
- [30] Observatory of Economic Complexity (OEC), HS data BACI International Trade Database, Natursande aller Art HS92:250590, <https://atlas.media.mit.edu/de/profile/hs92/250590/>, assessed 05/2019.
- [31] Observatory of Economic Complexity (OEC), HS data BACI International Trade Database, Quarzsand HS92:250510, <https://atlas.media.mit.edu/de/profile/hs92/250510/>, assessed 05/2019.

- [32] Observatory of Economic Complexity (OEC), HS data BACI International Trade Database, Zement HS92:2523, <https://atlas.media.mit.edu/de/profile/hs92/2523/>, assessed 05/2019.
- [33] OECD (2018) Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental. OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>.
- [34] OES (2019) The Observatory of Economic Complexity, <https://atlas.media.mit.edu/en/>, assessed 05/2019.
- [35] Perry, C.T., Morgan, K.M., (2017) Bleaching drives collapse in reef carbonate budgets and reef growth potential on southern Maldives reefs. *Nature Scientific Reports*, Vol. 7:40581, doi:10.1038/srep40581.
- [36] Sankh, A.C., Biradar P.M., Naghathan, S.J., Ishwargol, M.B., (2014) Recent Trends in Replacement of Natural Sand With Different Alternatives. *International Conference on Advances in Engineering & Technology - 2014 (ICAET-2014)*, p. 59-66.
- [37] Schneider, R.R., Schulz, H.D., Hensen, C., (2000) Chapter 9: Marine carbonates: Their formation and destruction. In: Schulz, H.D., Zabel, M. (eds): *Marine Geochemistry*. Springer, Berlin, p. 283-307.
- [38] Simoes, A.J.G., Hidalgo, C.A., (2011) The Economic Complexity Observatory: An Analytical Tool for Understanding the Dynamics of Economic Development. *Workshops at the Twenty-Fifth AAAI Conference on Artificial Intelligence*.
- [39] Statista (2019) <https://www.statista.com/statistics/657049/production-of-lime-worldwide/>, assesses 06/2019.
- [40] Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2018) Kaufpreise für landwirtschaftliche Flächen 2017 wieder gestiegen - Leichter Rückgang in 2016 mehr als ausgeglichen. *Pressemitteilung 188/2018*.
- [41] Steffen, W., Sanderson, A., Tyson, P.D., Jäger, J., Matson, P.A., Moore, B., Oldfield, F., Richardson, K., Schellnhuber, H.J., Turner, B.L., Wasson, R.J., (2004) *Global Change and the Earth System: A Planet Under Pressure*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, ISBN 3-540-40800-2, doi:10.1007/b137870, 336 pp.
- [42] Syvitski, J. P., Vörösmarty, C. J., Kettner, A. J., Green, P., (2005) Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science*, Vol. 308(5720), p. 376-380, doi:10.1126/science.1109454.
- [43] Torres, A., Brandt, J., Lear, K., Liu, J., (2017) A looming tragedy of the sand commons. Increasing sand extraction, trade, and consumption pose global sustainability challenges. *Science*, Vol. 357, p. 970-971.
- [44] Tweed, D. (2018) Why the South China Sea Fuels U.S.-China Tensions. *Bloomberg Businessweek*, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-10-07/why-the-south-china-sea-fuels-u-s-china-tensions-quicktake>, assessed 19.5.2019.
- [45] U.S. Geological Survey (2018) Mineral commodity summaries 2018: U.S. Geological Survey, 200 p., <https://doi.org/10.3133/70194932>.
- [46] U.S. Geological Survey (2019) Mineral commodity summaries 2019. U.S. Geological Survey, 200 p., <https://doi.org/10.3133/70202434>.
- [47] UN, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2017) *World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables*. Working Paper No. ESA/P/WP/248, 53 pp.
- [48] UNEP (2016) *Global Material Flows and Resource Productivity. An Assessment Study of the UNEP International Resource Panel*. H. Schandl, M. Fischer-Kowalski, J. West, S. Giljum, M. Dittrich, N. Eisenmenger, A. Geschke, M. Lieber, H. P. Wieland, A. Schaffartzik, F. Krausmann, S. Gierlinger, K. Hosking, M. Lenzen, H. Tanikawa, A. Miatto, and T. Fishman. Paris, United Nations Environment Programme, ISBN: 978-92-807-3554-3, 200 pp.
- [49] UNEP 2019. *Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources*. GRID-Geneva, United Nations Environment Programme, Geneva, Switzerland.
- [50] Verein Deutscher Zementwerke (2014) *Rohstoffgewinnung und -einsatz in der deutschen Zementindustrie*. Information Rohstoffe, Verein Deutscher Zementwerke e.V., 4 pp.
- [51] Verein Deutscher Zementwerke (2018) *Zementindustrie im Überblick 2018/2019*. Verein Deutscher Zementwerke Berlin, 2018, 36 pp.
- [52] Verein Deutscher Zementwerke (2019) *Zahlen und Daten*. <https://www.vdz-online.de/publikationen/zahlen-und-daten/a-wichtige-daten-auf-einen-blick/>, assessed 05/2019.
- [53] Walling, D.E., (2015) The changing suspended sediment loads of the world's rivers and implications for land-ocean sediment fluxes. 45. *Internationales Wasserbau-Symposium Aachen (IWASA) RWTH Aachen*, 21 pp.

[54] Walling, D.E., Webb., B.W. (1996) Erosion and sediment yield: a global overview. IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences, Vol. 236, p. 3-20.

[55] Wanless, H.R., Maier, K.L., (2014) An evaluation of beach renourishment sands adjacent to reefal settings, Southeast Florida. Southeastern Geology, Vol. 45, p. 25-42.

[56] Welt (2019) In Deutschland wird der Sand knapp. Die Welt, 13.02.2019, assessed 26.5.2019.

[57] Weltbank (2018) Weltbank  
<https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.KD.ZG?end=2017&start=1967&view=chart>, accessed 5/2019.

[58] Wilkinson, B.H., McElroy, B.J. (2007) The impact of humans on continental erosion and sedimentation. Geological Society of America Bulletin, Vol. 119.1-2, p. 140-156.

[59] WIN (2018) Produktinformation REA-Gips. Wirtschaftsverband mineralische Nebenprodukte e.V., 5 pp.

[60] Zimmermann, M. (2019) Legosteine aus Wüstensand könnten die Zukunft des Bauens sein. Augsburger Allgemeine, 13.2.2019, <https://www.augsburger-allgemeine.de/kultur/Journal/Legosteine-aus-Wuestensand-koennten-die-Zukunft-des-Bauens-sein-id53423601.html>.

## **Autoren**

### **Prof. Dr. Christoph Hilgers**

Institut für Angewandte Geowissenschaften,  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT),  
Adenauerring 20a  
76131 Karlsruhe

THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien  
Baden-Württemberg

RohstoffWissen e.V. -  
Initiative zur Förderung der Rohstoffkultur  
Lessenicher Straße 1  
53123 Bonn

### **Dr. Ivy Becker**

Institut für Angewandte Geowissenschaften,  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT),  
Adenauerring 20a  
76131 Karlsruhe

THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien  
Baden-Württemberg

# Konzepte zur Herstellung von ressourceneffizienten Betonen am Beispiel Zement

Christoph Müller

## Zusammenfassung

Ressourceneffizienz und Klimaschutz werden die Betonbauweise weiter vor Herausforderungen stellen. Dabei sind neben neuen Lösungsansätzen wie der CO<sub>2</sub>-Abscheidung im Zementwerk die Potentiale bewährter Konzepte, wie die Senkung des Klinker/Zement-Faktors, weiter auszuschöpfen. Letzteres bedarf der gemeinsamen Anstrengung aller am Bau Beteiligten.

## 1 Allgemeines

Portlandzementklinker bleibt auf absehbare Zeit der wesentliche Bestandteil von Zement. Alternativen in ausreichender technischer Qualität, die den stetig wachsenden globalen Bedarf an Zement decken können, sind nicht in Sicht. Umso wichtiger wird die Frage, wie die Klinkereffizienz weiter gesteigert bzw. die Klinkerintensität und damit die CO<sub>2</sub>-Intensität im Beton weiter gesenkt werden können. Mit Klinkerintensität wird der auf ein oder mehrere Leistungsmerkmale von Mörtel oder Beton bezogene Klinkereinsatz verstanden. Im einfachsten Fall ist dies die Druckfestigkeit.

## 2 Ausgangssituation

Bezieht man den „CO<sub>2</sub>-Gehalt“ im Beton auf die erreichte Betondruckfestigkeit und trägt diesen Wert wiederum über der Betondruckfestigkeit auf, so ergibt sich beispielhaft der im folgenden Bild dargestellte Zusammenhang.

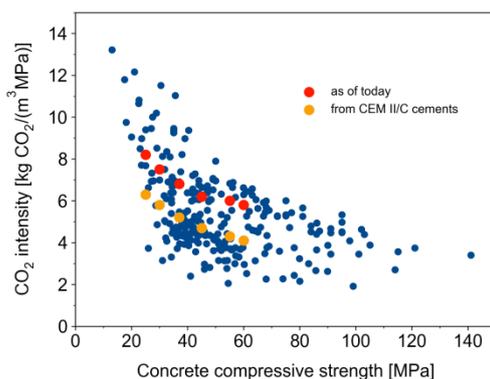


Abb. 1: CO<sub>2</sub>-Intensität: Ausgangssituation und CEM II/C-Szenario

Aus den Ökobilanzen für Betone verschiedener Festigkeitsklassen, die der VDZ im Auftrag des Bundesverbandes der Deutschen Transportbetonindustrie e. V. (BTB) und der Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilebau e. V. (FTB) erstellt hat, konnte eine statistisch abgesicherte CO<sub>2</sub>-Intensität für die jeweilige Festigkeitsklasse ermittelt werden, die im Bild als „Stand heute“ eingetragen wurde. Diese Daten bilden den Ausgangspunkt für die weiteren Überlegungen.

## 3 Erweiterung der Zementnorm EN 197-1

Mit der nächsten Ausgabe der EN 197-1 werden u. a. Zemente mit einem Mindestklinkerhalt von 50 % als CEM II/C genormt sein. Weitere Hauptbestandteile können bis zu 20 % Kalkstein und entweder bis zu 30 % Hüttensand, Flugasche oder natürliches Puzzolan sein. Im VDZ wurden in verschiedenen Forschungsprojekten die Eigenschaften von Mörteln und Betonen unter Verwendung solcher Zemente untersucht. Das Erreichen baupraktisch relevanter Festigkeiten im Beton stellte unter entsprechenden betontechnologischen Randbedingungen keine Hürde für eine Anwendung dar. Ähnliches gilt z. B. für Portlandkalksteinzemente mit Kalksteingehalten von bis zu 30 M.-%. Insofern kann für Innenbauteilbetone, bei denen neben baustellenge-rechten Frischbetoneigenschaften die Festigkeits- und Verformungseigenschaften relevant sind, der Zusammenhang zwischen CO<sub>2</sub>-Intensität und Betondruckfestigkeit - wie in Abbildung 1 als „CEM II/C-Szenario“ dargestellt - angegeben werden.

#### 4 Druckfestigkeit vs. Dauerhaftigkeit

Eine Beschränkung der Verwendung der Zemente auf Innenbauteile erscheint insbesondere unter baupraktischen Überlegungen aber nicht zielführend. Sobald eine Anwendung im Außenbauteil zu bewerten ist, muss neben der Druckfestigkeit auch die Dauerhaftigkeit betrachtet werden. Bei üblichen Außenbauteilen des Hochbaus sind dies konkret die Expositionsklassen XC3 bzw. XC4/XF1. Untersuchungen des VDZ weisen darauf hin, dass bei Wasserzementwerten im Bereich  $w/z = 0,50$  und damit verbunden einer Betondruckfestigkeit etwa der Klasse C30/37 ein ausreichender Karbonatisierungswiderstand sowie Frostwiderstand bei mäßiger Wassersättigung erreicht werden können. Unter diesen Randbedingungen könnte die  $CO_2$ -Intensität von etwa 65 % des jährlichen Transportbetonvolumens in Deutschland um rd. 25 % verringert werden. Für dieses Szenario steht nach derzeitigen Prognosen auch auf längere Sicht genügend Hüttsand zur Verfügung. Um dieses Ziel zu erreichen, wird man bei den zur Verfügung stehenden Rohstoffen ggf. eine anwendungsbezogene Differenzierung in Kauf nehmen müssen: Zemente und Betone für weite Teile des üblichen Hochbaus auf der einen Seite sowie Zemente und Betone unter besonderer Beanspruchung auf der anderen Seite. Mit dem Konzept der Betonbau-Qualität BBQ bereitet sich die Betonbauweise in gewisser Hinsicht hierauf aktuell bereits vor.

#### 5 Neue Technologien

Prognosen der Internationalen Energie Agentur gehen davon aus, dass der Beitrag der Zementindustrie zum Erreichen des Zwei-Grad-Ziels global nur bei paralleler Ausschöpfung aller Strategien zu erreichen sein wird. Hierzu gehört neben der Steigerung der thermischen Energieeffizienz, dem Einsatz alternativer Brennstoffe und der Senkung des Klinker/Zement-Faktors die Abscheidung von  $CO_2$ . Die Betonbauweise selbst wird darüber hinaus zeigen müssen, mit welchen innovativen Konstruktions- und Produktionstechniken ein Beitrag möglich ist. Beispielfhaft genannt seien hier

- Leichtbau im Betonbau
- Carbonbeton
- Additive Produktionstechniken

Bei diesen Technologien werden ein langer Atem und eine Weiterentwicklung der Qualitätskette nötig sein, um eine breite Anwendung erschließen zu können.

#### Autor

**Dr.-Ing. Christoph Müller**

VDZ gGmbH  
Tannenstr. 2  
40476 Düsseldorf

# Konzepte zur Herstellung von ressourceneffizienten Betonen am Beispiel der Granulometrie

Jack Moffatt und Michael Haist

## Zusammenfassung

Beton ist einer der meistproduzierten industriellen Stoffe weltweit und alle verfügbaren Prognosen gehen von einer weiter zunehmenden Betonproduktion aus. Im Hinblick auf den Klimaschutz ist es daher von zentraler Bedeutung die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Betonherstellung stark zu reduzieren, da mit der Herstellung von Beton – bzw. dessen Bestandteil Zement – bislang ausgeprägte CO<sub>2</sub>-Emissionen verbunden sind. Neben der Entwicklung neuartiger Zemente stellt hierbei die Reduktion des Bindemittelgehalts einen vielversprechenden Ansatz dar. Gleichzeitig müssen die technischen Eigenschaften der Betone auch bei abnehmender Verfügbarkeit von Gesteinskörnungen mit für die Betonherstellung günstigen Eigenschaften gewährleistet werden. Für beide dieser Anforderungen wird die Granulometrie der Gesteinskörnungen eine zentrale Stellschraube sein. Der vorliegende Beitrag stellt Ansätze zur Entwicklung nachhaltiger und ressourceneffizienter Betone vor, die auf der Optimierung der granulometrischen Eigenschaften seiner Ausgangsstoffe beruhen.

## 1 Einführung

Bauwerke bilden das Rückgrat moderner Industriegesellschaften. Die Errichtung und Instandhaltung von Bauwerken erfordern jedoch erhebliche Aufwendungen an natürlichen Ressourcen und verursachen signifikante Umweltwirkungen. Dies gilt insbesondere für den Werkstoff Beton. Ein Anteil von 5 % bis 10 % aller anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen stammt mittlerweile aus der Herstellung von Portlandzement und viele Milliarden Tonnen an Gesteinskörnungen und Wasser werden jährlich durch Beton im Gebäudebestand gebunden [1, 2, 3]. Starke Zuwächse zur Betonproduktion werden zudem aus Entwicklungsländern erwartet, sodass eine weitere Vervielfachung der weltweiten Produktionsmenge aus heutiger Sicht realistisch erscheint [2, 3].

Um die Nachhaltigkeit des Werkstoffs Beton zu verbessern, werden verschiedene technische Ansätze verfolgt. Der klimaschädliche Portlandzementklinker wird bereits heute in großen Anteilen durch reaktive Zementersatzstoffe ersetzt, was sich jedoch auf die Frischbetoneigenschaften auswirkt und die Festigkeitsentwicklung der Betone beeinträchtigt.

Auch wurden gänzlich neue Bindemittelarten, wie kalzinierte Tone [4] oder Celitement [5] vorgestellt. Durch die Autoren dieses Beitrags sowie durch andere Quellen wurden schließlich Ansätze vorgestellt, um den Bindemittelgehalt im Beton zu minimieren [6, 7, 8].

Solche zementreduzierten Betone werden im Folgenden als Ökobetone bezeichnet. Der Schlüssel für die Entwicklung zementreduzierter Ökobetone liegt in den granulometrischen Eigenschaften ihrer inerten Gesteinskörnungen. Durch die Steigerung der Packungsdichte dieser Körnungen gelingt es, den Zementleimgehalt der Betone zu reduzieren und dabei dennoch ausreichende Verarbeitbarkeitseigenschaften zu gewährleisten. Gesteinskörnungen sind jedoch regional in unterschiedlicher Art und Qualität verteilt und bereits jetzt zeichnet sich eine Verknappung geeigneter Gesteinskörnungen in einzelnen Regionen ab [9, 10].

Im vorliegenden Beitrag werden die technischen Entwicklungsansätze und die Eigenschaften zementreduzierter Ökobetone vorgestellt. Zudem werden Aspekte und Anforderungen bezüglich ihrer Ressourceneffizienz hervorgehoben.

## 2 Wege zum nachhaltigen und ressourcenschonenden Beton

Abbildung 1 stellt betontechnologische Ansätze zur Steigerung der Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz des Konstruktionsbetons durch Veränderung seiner Zusammensetzung dar.

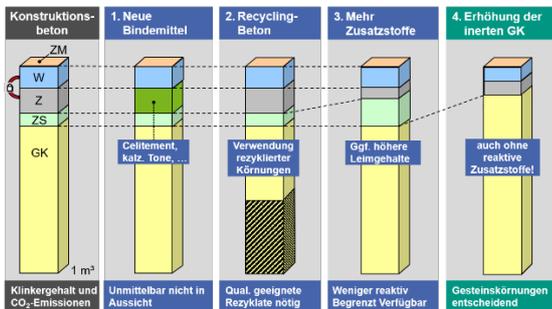


Abb. 1: Betontechnologische Ansätze für nachhaltigen Beton (Gesteinskörnung (GK), Zusatzstoff (ZS), Zement (Z), Wasser (W) und Zusatzmittel (ZM))

Ziel aller Ansätze ist es, die von den Ausgangsstoffen verursachten Umweltwirkungen – und hier insbesondere die CO<sub>2</sub>-Emissionen – zu reduzieren. Es stehen prinzipiell vier Ansätze zur Verfügung. Im Ansatz „Neue Bindemittel“ wird das Bindemittel Zement durch emissionsärmere alternative Bindemittel ausgetauscht. Hierfür kommen beispielsweise der Klinker Celitement [5], kalzinierte Tone [4] oder weitere alkalisch aktivierte Geopolymere in Frage [11]. Das restliche System des Betons bleibt unverändert. Voraussetzung für diesen Ansatz ist die Verfügbarkeit eines technisch geeigneten und emissionsarmen Bindemittels, das in großen Quantitäten und unter wirtschaftlichen Bedingungen über einen möglichst kurzen Zeitraum eingeführt werden kann. Diese großtechnische Verfügbarkeit ist derzeit jedoch nicht absehbar.

Der zweite Ansatz „Recycling-Beton“ beinhaltet den Austausch der Gesteinskörnungen natürlichen Ursprungs mit rezyklierter Gesteinskörnung. Dieser Ansatz, der bereits über das technische Regelwerk erfasst ist [12], schränkt derzeit die zulässigen Austauschraten auf maximal 45 % der Körnungen mit einem Kleinstkorndurchmesser von 2 mm ein. Der Einsatz von feineren Rezyklaten, sogenanntem Brechsand, ist derzeit nicht vorgesehen. Das Potenzial des Ansatzes ist daher stark eingeschränkt. Seine Wirtschaftlichkeit und Umweltfreundlichkeit sind zudem stark von der Transportentfernung für die Körnungen abhängig, sodass nur die Wiederaufbereitung in Nutzungsnähe wirtschaftlich und umwelt-

freundlich sinnvoll erscheint. Maßgebende Schwierigkeit bei diesem Ansatz ist die ausgeprägte Unregelmäßigkeit der Eigenschaften der rezyklierten Gesteinskörnungen sowie der aus dem Saugen der Rezyklate resultierende erhöhte Wasseranspruch. Dies hat zumeist einen erhöhten Zementleimbedarf zur Folge, was die Herstellung von Recyclingbetonen weniger wirtschaftlich macht und sich nachteilhaft auf die Umweltfreundlichkeit der Recyclingbetone auswirkt. Der dritte Ansatz „Mehr Zusatzstoffe“ zielt darauf ab, den Portlandzementklinker durch Ersatzstoffe, die als Nebenprodukte der Herstellungsprozesse anderer Industrien anfallen, auszutauschen, die als Nebenprodukte der Herstellungsprozesse anderer Industrien anfallen. Die Ersatzstoffe sind in der Regel weniger reaktiv als der Portlandzementklinker, sodass eine geringfügige Reduktion des w/z-Werts erforderlich wird. Die Austauschrate ist dabei durch das Regelwerk beschränkt [13]. Die Verfügbarkeit von Zusatzstoffen ist vom Produktionsniveau ihrer Quellindustrien abhängig und kann daher stark schwanken. Die Verfügbarkeit wichtiger Zementersatzstoffe und Zusatzstoffe in Deutschland, wie dem Hüttsand und der Flugasche, ist jedoch bei einem Rückgang der Stahlproduktion und der Verbrennung von Kohle in Kraftwerken geschuldet perspektivisch rückläufig [14].

Beim vierten Ansatz „Erhöhung des Anteils inerte Gesteinskörnungen“ wird der Leimgehalt im Beton reduziert. Um dennoch eine ausreichende Verarbeitbarkeit zu gewährleisten muss die Packungsdichte der Gesteinskörnungen gesteigert werden. Hierin liegt die zentrale Herausforderung dieses Ansatzes in der Gewährleistung ausreichender Verarbeitungseigenschaften trotz ihres reduzierten Wassergehalts. Dadurch ist die Effektivität des Ansatzes von der Art und Qualität der regional verfügbaren Gesteinskörnungen abhängig. Im Folgenden wird die Entwicklung von Ökobetonen nach diesem Ansatz vorgestellt, die in einem ersten Schritt eingesetzt werden können, um den Zementverbrauch und damit die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Betons drastisch zu reduzieren und das primäre Ziel des Klimaschutzes zu unterstützen. Die technischen Prinzipien dieses Ansatzes, die auf der Erfassung des Einflusses granulometrischer Eigenschaften der Gesteinskörnung auf ihr Verhalten beim Bilden einer dichten Packung beruhen, könnten jedoch in einem weiteren Schritt eingesetzt werden, um die Zusammensetzung des Betons entsprechend der regionalen Verfügbarkeit von Ausgangsstoffen zu optimieren. Somit könnten großzügig verfügbare Körnungen gegenüber den sich verknappenden und rezyklierte Körnungen gegenüber natürlichen Körnungen zitielsicher bevorzugt werden.

### 3 Ausgangsstoffe

Das Ziel der Untersuchungen war es, die Leistungsfähigkeit der jeweiligen Betonausgangsstoffe möglichst optimal auszunutzen. Da sich die Umweltbilanzdaten von niedrig- und hochfesten Zementen nur marginal voneinander unterscheiden (siehe [15]), wurde ein Portlandzement der Zementfestigkeitsklasse 52,5 R nach [16] eingesetzt. Auch ein deutlich feineres Mikrozement wurde verwendet. Aus technischer Sicht sollte eine möglichst hohe Feinheit des Zements angestrebt werden, um diesen trotz des geringen Gehalts im Beton möglichst gut zu dispergieren. Ausgewählte Eigenschaften der Zemente sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tab. 1: Ausgewählte Eigenschaften der verwendeten Bindemittel

Eigenschaft	Einheit	CEM I 52,5 R	Mikrozement ( $\mu$ CEM)
Rohdichte [17]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	3,15	3,11
Blaine-Wert [18]	[cm <sup>2</sup> /g]	5500	6900
Erstarrungszeitpunkt [19]	[Min]	107	77
Druckfestigkeit $f_{c,28d}$ [20]	[MPa]	91,9	106,3
Ausgewählte mineralogische Zusammensetzung mittels Riedveld-Analyse			
C <sub>3</sub> S monoclinic (NISHI)	[M.-%]	67,4	77,5
C <sub>2</sub> S beta (MUMME)		6,4	6,2
C <sub>3</sub> A Na orthorhombisch		3,0	3,1

C <sub>3</sub> A kubisch		3,6	6,5
Granulometrische Kenngrößen siehe auch [21]			
RRSB-Äquivalentdurchmesser d'	[ $\mu$ m]	8.851	4.594
RRSB-Parameter n	[-]	0.874	1.067
Experimentelle Packungsdichte	[-]	0.558	0.592
Kompressionsindex ki	[-]	12.2	12.2
Packungsdichte der Unterklassen $\phi_k$	[-]	0.361	0.338
Treibhauspot. GWP, siehe [22]	[kg CO <sub>2</sub> /kg]	0.871-0.885	

Natürliche Gesteinskörnungen vom Oberrhein nach [23] wurden bei den Untersuchungen verwendet. Zusätzlich wurden die Körnungen um zwei Quarzmehle ergänzt, um genügend Feinanteile bei sinkendem Zementgehalt zu gewährleisten. Repräsentative Angaben zu den Treibhauspotenzialen der Zemente und Gesteinskörnungen sind in den Tabellen 1 und 2 aufgeführt. Hinsichtlich der Packungsdichteoptimierung des granularen Korngerüsts bestehend aus den Zement- und Gesteinskörnern, wurden Ausgangsstoffe mit eng gestufter Korngrößenverteilung gewählt. Eine Ausnahme hiervon bildet die Sandfraktion 0,1/1 mm welche eine bi-modale Verteilung aufweist. Ausgewählte Eigenschaften der Körnungen sind in Tabelle 2 dargestellt. Die Kornverteilungskurven der Ausgangsstoffe sind in Abbildung 2 dargestellt.

Tab. 2: Eigenschaften der Gesteinskörnungen

Eigenschaft	Einheit	Quarzmehl 1	Quarzmehl 2	Sand 0,1/1 mm	Sand 1/2 mm	Kies 2/8 mm	Kies 8/16 mm
Rohdichte [17, 24]	[kg/d m <sup>3</sup> ]	2,64	2,65	2,65	2,61	2,51	2,54
Wasseraufnahme [24]	[M.-%]	-	-	0,2	0,3	1,8	1,5
Blaine-Wert [18]	[cm <sup>2</sup> /g]	18 000 <sup>1</sup>	1 448	-	-	-	-
Granulometrische Kenngrößen (siehe [21])							
Experimentelle Packungsdichte	[-]	0,549	0,623	0,796	0,584	0,602	0,604
Kompressionsindex ki	[-]	12,2	12,2	4,1	4,1	4,1	4,1
Packungsdichte der Unterklassen $\Phi_K$	[-]	0,436	0,552	0,703	0,831	0,685	0,721
Treibhauspot. GWP, siehe [22]	[kg CO <sub>2</sub> /kg]	0,120		2,955·10 <sup>-3</sup>		2,955·10 <sup>-3</sup>	

<sup>1</sup> Herstellerangabe

Um eine ausreichende Verarbeitbarkeit zu gewährleisten, wurde ein PCE-Fließmittel gemäß [25] verwendet. Der Wirkstoffgehalt hierin betrug 35 M.-%. Der Wassergehalt wurde bei der Bestimmung des w/z-Werts berücksichtigt. Das Fließmittel wurde mit 1,2 M.-% auf den Feinkornanteil, bestehend aus Zement und Quarzmehl, dosiert (vgl. [7]).

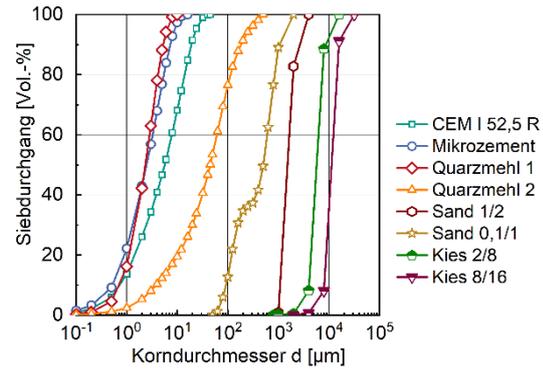


Abb. 2: Korngrößenverteilung der Zemente und inerten Gesteinskörnungen

#### 4 Mischungsentwurf

Dem Grundansatz folgend, dass die Leistungsfähigkeit des Betons von seinem w/z-Wert abhängt, resultiert eine Reduktion des Zementgehalts bei konstantem w/z-Wert auch in einer Reduktion des Wassergehalts. Die maßgebende Herausforderung bei der Entwicklung zementreduzierter Betone mit minimalen Umweltwirkungen liegt daher darin, die Verarbeitbarkeit der Betone mit reduziertem Wassergehalt aufrecht zu erhalten. Da im Frischbeton Wasser benötigt wird, um die Hohlräume zwischen den Körnern aus Zement und inerter Körnung zu füllen und um die Reibung infolge einer Scherung des Haufwerks zu reduzieren, würde die Senkung des Wassergehalts bei unverändertem Hohlraumgehalt bzw. Packungsdichte zu einem Verlust der Verarbeitbarkeit führen. Daher sind Methoden der Packungsdichteoptimierung für das granulare Haufwerk im Beton beim Betonentwurf zementreduzierter Betone unverzichtbar.

In einem ersten Schritt wurde eine Parameterstudie durchgeführt, um den Einfluss der Zusammensetzung der Ausgangsstoffe auf die Packungsdichte der Mischungen zu untersuchen. Der Zementgehalt wurde hierbei auf 10, 6 und 4 Vol.-% des Feststoffvolumens festgelegt. Jede Mischung enthielt jeweils nur ein Bindemittel (d. h. CEM I 52,5 R oder Mikrozement). Der volumetrische Gehalt aller weiteren Ausgangsstoffe, d. h. der inerten Gesteinskörnungen, wurde variiert, um Verteilungen mit maximaler Packungsdichte der Mischung zwischen Zement- und Gesteinskörnern zu identifizieren.

Die Korngrößenverteilung aller Partikel wurde mittels der Kornverteilungskurve nach Funk und Dinger [26] optimiert und das CIPM-Modell von Fennis [7] zur Berechnung der Packungsdichten angewendet. Bei der Verwendung des Ansatzes nach Funk und

Dinger wurde der Einfluss verschiedener Lageparameter  $n$  auf die Korngrößenverteilung über das CIPM bestimmt. In Abbildung 3 ist erkennbar, dass unter Anwendung eines Lageparameters  $n$  zwischen 0,37 und 0,40 die Packungsdichte der Korngemische maximal wird. Dies gilt unabhängig vom Zementgehalt. Es ist jedoch ebenfalls erkennbar, dass die Packungsdichte tendenziell mit sinkendem Zementgehalt zunimmt, woraufhin zurückgeführt werden kann, dass das störende Überangebot an feinsten Partikeln mit sinkendem Zementgehalt abnimmt. Eine Ausnahme hiervon bildet die Mischung mit einem Fitparameter  $n = 0,20$ . Diese Mischung enthält jedoch ein solch großes Angebot feinsten Partikel, dass die Erniedrigung ihres Zementanteils im Volumen der Feststoffe sich nicht positiv auf die Packungsdichte auswirkt.

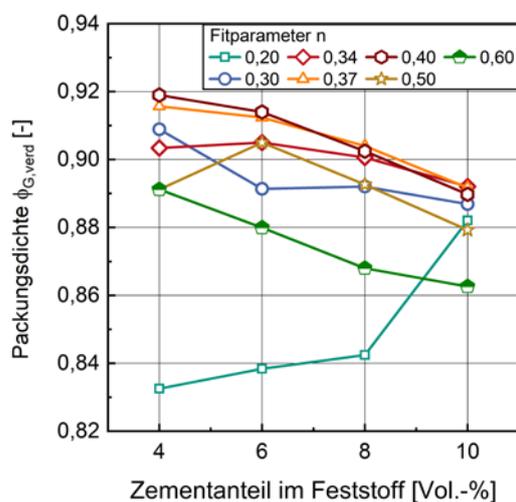


Abb. 3: Packungsdichte der granularen Mischungsbestandteile berechnet mittels CIPM-Modell [7] als Funktion des Lageparameters  $n$  [-] des Funk- und Dinger Modells [26] sowie des Zementgehalts

Auf Grundlage der in Abbildung 3 dargestellten Ergebnisse wurden Zusammensetzungen mit möglichst hoher Packungsdichte ausgewählt und diese im Labor auf ihre Frisch- und Festbetoneigenschaften hin untersucht. Die Zusammensetzung der Mischungen ist in Tabelle 3 angegeben. Die Mischungen zeichnen sich durch Zementgehalte zwischen 4 Vol.-% und 10 Vol.-% des Feststoffs aus, was ca.  $110 \text{ kg/m}^3$  bis  $265 \text{ kg/m}^3$  Beton entspricht.

Tab 3: Zusammensetzung und Eigenschaften der untersuchten Betone

Komponente / Eigenschaft	Einheit	Mischung					
		Parameter					
Zementanteil an der granularen Mischung	[Vol.-%]	10	6	4	4	4	4
Fitparameter der Korngrößenverteilung [26]	[-]	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
Zementart	[-]	CEM I 52,5 R			$\mu$ CEM		
		Mischungsentwurf					
Zement	[kg/m <sup>3</sup> ]	264	165	113	109	110	111
Quarz-Quarz-1 mehl		44	46	48	92	96	96
Quarz-Quarz-2 mehl		22	70	143	138	72	145
Sand 0,1 mm		429	482	479	478	499	502
Sand 1/2 mm		357	372	383	414	384	435
Kies 2/8 mm		535	557	575	460	576	483
Kies 8/16 mm		491	511	527	483	528	507
Wasser		158	124	96	129	94	89
PCE-FM		3,96	3,37	3,70	4,10	3,30	4,20
w/z		[-]	0,54	0,64	0,69	1,05	0,68
		Eigenschaften					
Druckfestigkeit $f_{cm, 7d}$ [27]	[N/mm <sup>2</sup> ]	52,8	41,9	41,4	20,1	63,2	66,3
Verdichtungsmaß $c$ [28]	[-]	n.b.	1,19	1,26	1,16	1,26	1,27

In Abbildung 4 ist erkennbar, dass die Frischbetoneigenschaften (hier das Verdichtungsmaß  $c$ ) im Wesentlichen vom  $w/z$ -Wert abhängen. Mit zunehmendem  $w/z$ -Wert sinkt das Verdichtungsmaß  $c$  und die Verarbeitbarkeit nimmt somit zu. Trotz ihrer annähernd identischen Korngrößenverteilung benötigen Mischungen mit reduziertem Zementgehalt einen höheren  $w/z$ -Wert um eine gute Verarbeitbarkeit zu erreichen. Dieser Trend ist besonders bei Mischungen mit weniger als 6 Vol.-% Zement im Feststoff zu beobachten.

Darüber hinaus korreliert die Verarbeitbarkeit der Mischungen mit dem sogenannten Packungsdichteverhältnis, welches die in situ Packungsdichte des Betons  $\phi$  ins Verhältnis zu seiner maximal (rechnerisch) möglichen Packungsdichte im verdichteten Zustand  $\phi_{G,verd}$  setzt (siehe Abbildung 4, unten).

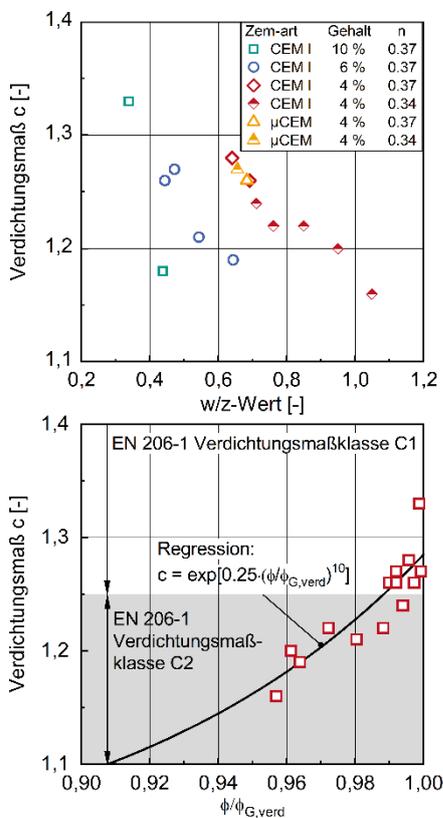


Abb. 4: Verdichtungsmaß  $c$  des Frischbetons nach [28] als Funktion des  $w/z$ -Werts (oben) und des Packungsdichteverhältnisses  $\phi/\phi_{G,verd}$  (unten). Kennzeichnung der Verdichtungsmaßklassen nach [29]

Mit abnehmendem Packungsdichteverhältnis  $\phi/\phi_{G,verd}$  nimmt die Dicke des schmierenden Wasserfilms zwischen den Partikeln zu, sodass die Verarbeitbarkeit der Mischungen sich stark verbessert und das Verdichtungsmaß sinkt. Die in situ Packungsdichte der Mischung kann hierbei aus den Volumenanteilen des Wassers  $V_w$  und der Partikel  $V_p$  nach Gleichung 1 berechnet werden.  $\phi_{G,verd}$  wird mittels des CIPM-Modells berechnet [7].

$$\phi = \frac{V_p}{(V_p + V_w)} \quad (1)$$

Bezüglich der Leistungsfähigkeit der Betone im erhärteten Zustand zeigt Abbildung 5 (oben), dass alle Mischungen eine äquivalente oder stark verbesserte Druckfestigkeit im Vergleich zu herkömmlichen Betonen mit Portlandzement und vergleichbaren  $w/z$ -Werten aufweisen. Dies gilt auch im frühen Alter von 7 Tagen (durchgezogene Trendlinie in Abbildung 5 entspricht dem Erwartungswert der Druckfestigkeit nach 7 Tagen, siehe [27]). Eine besonders ausgeprägte Verbesserung der Druckfestigkeit wurde bei den Betonen beobachtet, die mit dem sogenannten Mikrozetement, einem besonders feinen Portlandzement, hergestellt wurden (siehe Tabelle 1). Danach sind ca. 4 Vol.-% Portlandzement in der granularen Mischung offenbar ausreichend, um die inertesten Gesteinskörner mit Zementleim zu benetzen und ausreichend stark miteinander zu verkitten. Die so hergestellten Mischungen erzielten eine Druckfestigkeit von 65 N/mm<sup>2</sup> nach 7 Tagen.

Abbildung 5 (unten) stellt die Bindemittelintensität  $b_i$  der Betone dar, welche ausdrückt, wieviel Zement in einem Kubikmeter Beton benötigt wird, um 1 N/mm<sup>2</sup> an Druckfestigkeit zu erzeugen. Die Ökobetonen sind hierbei im Vergleich zu Literaturdaten von Daminelli et al. [31] sowie mit weiteren Ökobetonen von Proske et al. [6] und Fennis [7] dargestellt. Die Reduktion des Zementgehalts führt in dieser Betrachtung zu einer erheblichen Reduktion der Bindemittelintensität, welches auf ein Potenzial für eine starke Verbesserung der Nachhaltigkeit deutet, vorausgesetzt die Anforderungen an ihre Dauerhaftigkeit sind gering.

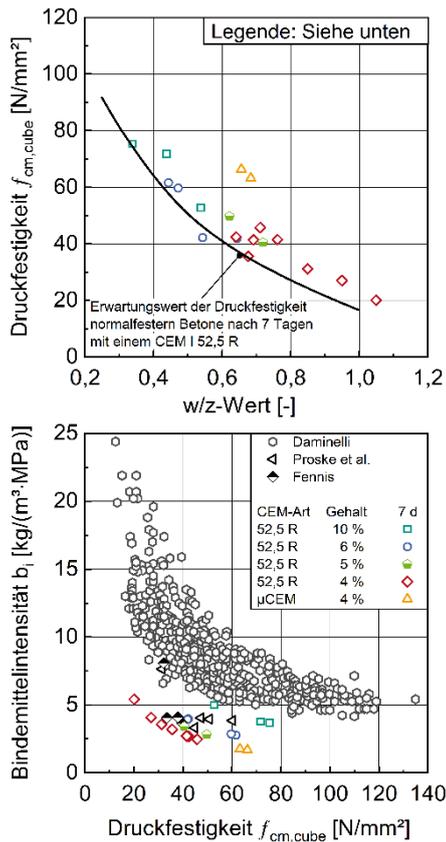


Abb. 5: Druckfestigkeit der Ökobetone nach 7 Tagen als Funktion des w/z-Werts sowie Walz-Kurve für Betone gemäß [30]; Umrechnung zu 150 mm Würfelfestigkeit und 7 Tage Festigkeiten nach *fib* Model Code 2010 (oben); Bindemittelintensität der Betone im Vergleich zu Literaturwerten von Fennis [7], Proske et al. [6] and Daminelli et al. [31] (unten)

Abbildung 5 (unten) zeigt auch, dass es keinem der Ansätze für Ökobeton – einschließlich dem hier vorgestellten – gelingt, die Abhängigkeit der Bindemittelintensität von der Druckfestigkeit zu trennen. Bei geringerer Druckfestigkeit wird in allen Fällen eine erhöhte Bindemittelintensität benötigt. Diese Abhängigkeit kann dadurch erklärt werden, dass mit sinkender Festigkeitsanforderung die Mindestzementmenge nach dem funktionalen Zusammenhang zum w/z-Wert gegen den Grenzwert null strebt. In Realität jedoch, wird eine Mindestmenge an Zement benötigt, um ausreichend Zementleim zum Benetzen der weiteren Gesteinskörnungen zu generieren, sodass ein Mindestzementgehalt erforderlich ist, der die beobachtete Zunahme der Bindemittelintensität bewirkt.

Auf Grundlage dieser Arbeiten wurde die in Abbildung 6 dargestellte Systematik für den Mischungs-entwurf zementreduzierter Betone abgeleitet. Die Vorgehensweise baut auf den Empfehlungen von Fennis auf [7].

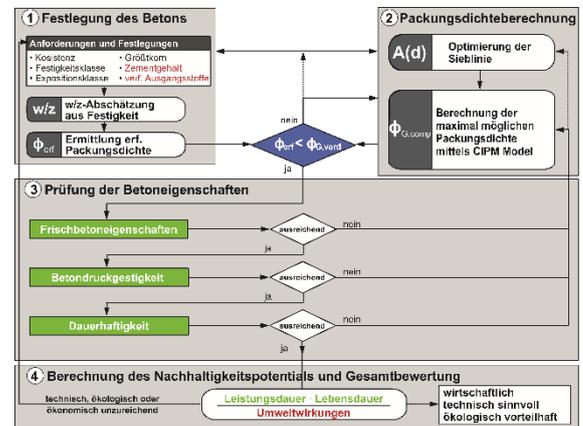


Abb. 6: Systematik des Mischungs-entwurfs für zementreduzierte Betone

Im ersten Schritt werden die gewünschten Betoneigenschaften definiert. Zusätzlich müssen die Eigenschaften der Ausgangsstoffe experimentell bestimmt werden. Auf Grundlage des definierten Zementgehalts und der Anforderungen an die Druckfestigkeit kann der w/z-Wert nach Abbildung 4 (oben) und darüber hinaus die erforderliche Packungsdichte  $\phi_{\text{erf}}$ , welche mit dem resultierenden Wassergehalt zu einer Sättigung des granularen Haufwerks führen muss, nach Gleichung 1 ermittelt werden. Im nächsten Schritt wird die Korngrößenverteilung der granularen Ausgangsstoffe mit einer Kombination aus den Modellen nach Funk-Dinger [26] und dem CIPM-Modell [7] optimiert, sodass die maximal erreichbare Packungsdichte im verdichteten Zustand  $\phi_{G,\text{verd}}$  die erforderliche Packungsdichte übertrifft. Auf Grundlage des resultierenden Packungsdichteverhältnisses kann die Verarbeitbarkeit des Betons nach Abbildung 4 (unten) abgeschätzt werden. Eine detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise ist in Fennis [7] und Haist et al. [21] enthalten.

## 5 Ausblick

Im vorgestellten Beitrag wird die Vorgehensweise für die Entwicklung zementreduzierter Betone vorgestellt und es werden die Frisch- und Festbetoneigenschaften dieser Betone diskutiert. Die Betone verzichten dabei auf Zementersatzstoffe und Zusatzstoffe,

da die Verfügbarkeit dieser zukünftig in den westlichen Industrienationen rückläufig sein wird. Zudem ist der tatsächliche ökologische Vorteil der intensiven Verwendung dieser Stoffe bei genauerer Betrachtung ihrer Entstehung fraglich. Vor diesem Hintergrund wurden Betone entwickelt, die ausschließlich mit dem sehr leistungsfähigen und zuverlässigen Bindemittel Portlandzement hergestellt werden, wobei die möglichst effiziente Ausnutzung seiner Eigenschaften angestrebt wird. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine gleichbleibende Verarbeitbarkeit bei sinkendem Zementgehalt erreicht werden kann. In den vorliegenden Arbeiten gelang es leider jedoch nicht den w/z-Wert unverändert zu lassen. Leider war eine Erhöhung erforderlich, um eine ausreichende Verarbeitbarkeit zu gewährleisten. Betone, die mit Wassergehalten hergestellt werden, die dem Hohlraumgehalt der Mischung bei maximaler Packungsdichte entsprechen, weisen Verarbeitbarkeitseigenschaften auf, die denen erdfrechter Betonmischungen ähneln. Ihre Verarbeitbarkeit verbessert sich jedoch mit sinkendem Feststoffgehalt rapide.

Hinsichtlich der Festigkeit der untersuchten Betone kann festgehalten werden, dass die Druckfestigkeit zementreduzierter Betone diejenige von konventionellen Betonen mit gleichem w/z-Wert signifikant übertrifft. Insbesondere führt die Verwendung von sehr feinen Zementen mit signifikant erhöhtem Blaine-Wert, sogenannten Mikrozementen, zu einer erheblichen Verbesserung der Druckfestigkeit in jungem Alter.

Zusammenfassend bestätigen die Ergebnisse, dass die Leistungsfähigkeit zementreduzierter Betone sehr hoch sein kann, jedoch ihre Verarbeitbarkeit noch Verbesserungen bedarf. Dies gilt insbesondere für Betone mit sehr niedrigen Zementgehalten. Die Untersuchungen hinsichtlich der Dauerhaftigkeit dieser Betone dauern noch an.

## 6 Literatur

- [1] Favier, A., Scrivener, K. L., Habert, G. (2019) Decarbonizing the Cement and Concrete Sector: Integration of the Full Value Chain to Reach Net Zero Emissions in Europe. IOP Conference Series Earth and Environmental Science 225 012009
- [2] Uwasu, M., Hara, K., Yabar, H. (2014) World cement production and environmental implications. Environmental Development 10, S. 36-47
- [3] Aïtcin, P. C., Mindess, S. (2011) Sustainability of Concrete. Spon Press, Oxon
- [4] Fernandez, R., Martirena, F., Scrivener, K. L. (2019) The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals - A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. Cement and Concrete Research 41, Nr. 1, S. 113-122
- [5] Stemmermann, P., Schweike, U., Garbev, K., Beuchle, G., Möller, H., (2010) Celitement - a sustainable prospect for the cement industry. Cement International 8, Nr. 5, S. 52-66
- [6] Proske, T.; Hainer, St.; Jakob, M.; Garrecht, H.; Graubner, C.-A. (2012) Stahlbetonbauteile aus klima- und ressourcenschonendem Ökobeton. Beton- und Stahlbetonbau, Heft 107, Nr. 6, S. 401-413
- [7] Fennis, S. A. A. M. (2010) Design of ecological concrete by particle packing optimization. Dissertation, Technische Universität Delft, Niederlande. Gildeprint Verlag, Niederlande
- [8] Haist, M.; Moffatt, J. S.; Breiner, R.; Müller, H. S. (2014) Entwicklungsprinzipien und technische Grenzen der Herstellung zementarmer Betone. Beton- und Stahlbetonbau, Heft 109, S. 202-215
- [9] Ioannidou, D., Meylan, G., Sonnemann, G., Habert, G. (2017) Is Gravel Becoming Scarce? Evaluating the Local Criticality of Construction Aggregates. Resources, Conservation and Recycling 126, S. 25-33
- [10] Habert, G., Bouzidi, Y., Chen, C., Jullien, A. (2010) Development of a Depletion Indicator for Natural Resources Used in Concrete. Resources, Conservation and Recycling 54, Nr. 6, S. 364-376
- [11] Habert, G., d'Espinose de Lacaillerie, J. B., Rousel, N. (2011) An Environmental Evaluation of Geopolymer Based Concrete Production: Reviewing Current Research Trends. Journal of Cleaner Production 19, Nr. 11, S. 1229-38
- [12] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (2010) DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620 - Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN EN 1992- 1-1. Beuth Verlag, Berlin
- [13] DIN 1045-2:2008-08, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1. Beuth Verlag, Berlin
- [14] Heinz, D., Heisig, A. (2018) Flugasche und Hütensand - Zusatzstoffe mit Zukunft? 14. Symposium für Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), (Hrsg.) Nolting, U., Dehn, F., Haist, M., Link, J. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe
- [15] Haist, M., Mueller, H. S. (2012) Nachhaltiger Beton - Betontechnologie im Spannungsfeld zwischen Ökobilanz und Leistungsfähigkeit, 9. Symposium für Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), (Hrsg.) Mueller, H. S., Nolting, U., Haist, M., Kromer, M. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe

- [16] DIN EN 197-1:2011-11: Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement. Beuth-Verlag, Berlin
- [17] DIN EN 1097-7:2008-08: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 7: Bestimmung der Rohdichte von Füller - Pyknometer-Verfahren. Beuth-Verlag, Berlin
- [18] DIN EN 66126:2015-08: Bestimmung der spezifischen Oberfläche disperser Feststoffe mittels Gasdurchströmung - Blaineverfahren. Beuth-Verlag, Berlin
- [19] DIN EN 196-3:2009-02: Prüfverfahren für Zement - Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit. Beuth-Verlag, Berlin
- [20] DIN EN 196-1:2005-05: Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit. Beuth-Verlag, Berlin
- [21] Haist, M., Moffatt, J. S., Breiner, R., Müller, H. S. (2014) Entwicklungsprinzipien und technische Grenzen der Herstellung zementarmer Betone. Beton- und Stahlbetonbau 109, Nr. 3, S.202-215
- [22] Haist, M., Moffatt, J. S., Breiner, R., Vogel, M., Müller, H. S. (2016) Ansatz zur Quantifizierung der Nachhaltigkeit von Beton auf der Baustoffebene. Beton- und Stahlbetonbau 111, Nr. 10, S.645-656
- [23] DIN EN 12620:2009-06: Gesteinskörnungen für Beton. Beuth-Verlag, Berlin
- [24] DIN EN 1097-6:2013-09: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme. Beuth-Verlag, Berlin
- [25] DIN EN 934-2:2012-08: Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel - Teil 2: Betonzusatzmittel - Definitionen, Anforderungen, Konformität, Kennzeichnung und Beschriftung. Beuth-Verlag, Berlin
- [26] Funk, J. E., Dinger, D. R. (1994) Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions Applied to Ceramic Manufacturing. Kluwer Academic Publishers, Norwell, USA
- [27] DIN EN 12390-3:2009-07: Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern. Beuth-Verlag, Berlin
- [28] DIN EN 12350-4:2009-08: Prüfung von Frischbeton - Teil 4: Verdichtungsmaß. Beuth-Verlag, Berlin
- [29] DIN EN 206:2014-07: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Beuth-Verlag, Berlin
- [30] Walz, K. (1970) Beziehung zwischen Wasserzementwert, Normfestigkeit des Zements (DIN 1164 Juni 1970) und Betondruckfestigkeit. Beton 20, Nr. 11, S. 499-503
- [31] Damineli, B. L., Kemeid, F. M., Aguiar, P. S., John, V. M. (2010) Measuring the eco-efficiency of cement use. Cement and Concrete Composites 32, S. 555-562

## Autoren

### **Dipl.-Ing. Jack Moffatt**

Institut für Baustoffe  
Leibniz Universität Hannover  
Appelstraße 9A  
30167 Hannover

### **Prof. Dr.-Ing. Michael Haist**

Institut für Baustoffe  
Leibniz Universität Hannover  
Appelstraße 9A  
30167 Hannover



# Ressourceneffizientes Bauen mit Beton unter besonderer Berücksichtigung der Methode der Lean Construction

Dominik Steuer, Svenja Oprach und Shervin Haghsheno

## Zusammenfassung

Das Bauwesen ist ein Schlüsselsektor der Wirtschaft. Dreizehn Prozent des weltweiten Bruttoinlandsprodukts werden durch das Bauwesen erwirtschaftet. Trotz der Wichtigkeit für die Wirtschaft hält sich die jährliche Produktivitätssteigerung mit circa einem Prozent die letzten 20 Jahre in Grenzen [1]. Lösungsvorschläge zur Überwindung dieses Produktivitätsdilemmas können in der Anwendung der Grundprinzipien des Lean Thinkings gefunden werden. Diese Grundprinzipien werden durch Womack und Jones als Wert aus Sicht des Kunden, Identifikation des Wertstromes, Produktion entlang des Wertstromes nach dem Fluss-Prinzip, bedarfsorientierte Produktion nach dem Pull-Prinzip und dem Streben nach Perfektion definiert [2]. Die Anwendung dieser Lean Prinzipien wird im Bauwesen als Lean Construction bezeichnet und kann im Wesentlichen in die folgenden Strömungen unterteilt werden: Gestaltung und Steuerung von Produktionssystemen, kooperative Arbeitsplanung und integrierte Projektabwicklung [3]. Im Hinblick auf das ressourceneffiziente Bauen mit Beton wird hier im Speziellen auf die Gestaltung und Steuerung von Produktionssystemen eingegangen.

## 1 Herausforderungen der Baubranche

Die Baubranche unterscheidet sich in ihrem Aufbau stark von anderen Wirtschaftssektoren. Sie leidet heute unter einem enormen wirtschaftlichen Druck und einer annähernden Vollaustattung. Ein steigender Effizienzdruck wird durch gesetzliche Vorgaben zum Einsatz erneuerbarer Energien und der Energieeinsparung angetrieben. Zusätzlich führt die globale Niedrigzinsphase zu einer Überflutung des Marktes mit billigem Geld, was die Nachfrage im Bauwesen

erhöht [4]. Trotz des massiven Effizienzdrucks ist seit vielen Jahren eine wachsende Lücke zwischen der Produktivität des produzierenden Gewerbes und der Baubranche zu beobachten (siehe Abbildung 1).

So zeigt auch die wirtschaftliche Entwicklung der Bauindustrie, dass es hier einen großen Handlungsbedarf und einen Bedarf zum Umdenken gibt [5]: Die Arbeitsproduktivität (die preisbereinigte Bruttowertschöpfung je geleisteter Erwerbstätigenstunde) ist zwar zwischen 1995 und 2005 leicht gestiegen, das

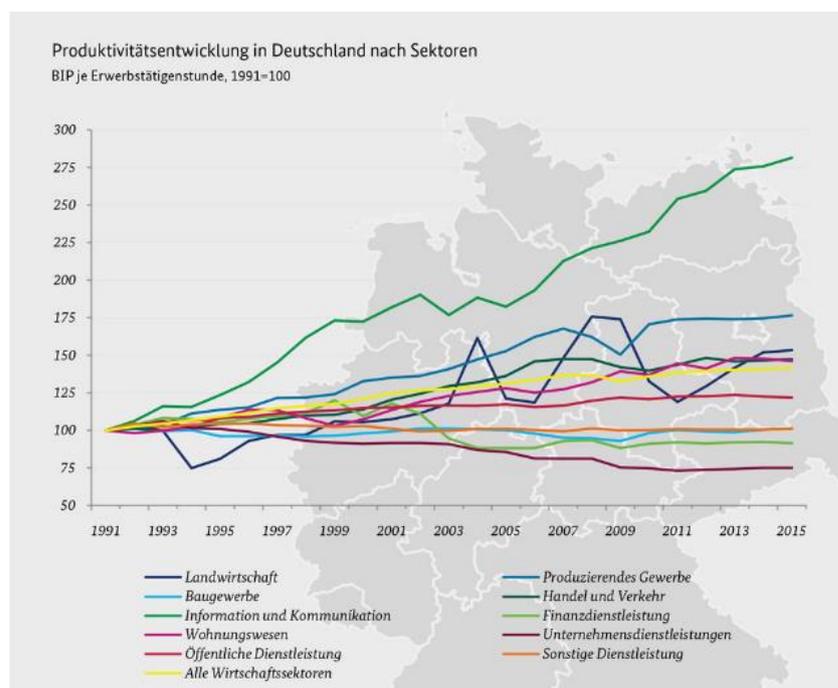


Abb. 1: Produktivitätsentwicklung in Deutschland nach Sektoren; Quelle: Statistisches Bundesamt

produzierende Gewerbe konnte in diesem Zeitraum jedoch einen Produktivitätszuwachs von 30 % nachweisen [6]. In den Jahren 2005 bis 2010 verzeichnete das Baugewerbe wieder einen Produktivitätsrückgang in Höhe von 5,7 % [7]. Zudem führte die jahrelange Rezession zu einem starken Konkurrenzkampf um Bauaufträge mit niedrigen Angebotspreisen und einer steigenden Anzahl an Nachträgen [8]. Dies wiederum führte zu Imageverlusten und der Gefahr von Insolvenzen bei den Bauunternehmen.

Die wirtschaftliche Entwicklung der Bauindustrie kann u. a. auf nicht voll genutzte Ressourcen, nicht funktionierende Schnittstellen zwischen Gewerken, nichtexistierende Qualitätsregelkreise, Sicherheitsrisiken und Lieferprobleme zurückgeführt werden [9]. „Die sich im Verlauf des Bauvorhabens verändernden Umstände führen dazu, dass viele Probleme nicht vorhersehbar sind und Entscheidungen oftmals direkt vor Ort getroffen werden müssen. Dabei besteht das Projektteam aus einer Vielzahl von unterschiedlichen Unternehmen mit verschiedenen Interessen, die für das jeweilige Projekt neu zusammengesetzt worden sind. Selten können sie auf bestehende Beziehungen zurückgreifen und müssen sich als Projektteam neu aufeinander einstellen.“ [10]. Bei Bauprojekten wird, als Inhalt des Bauvertrags, ein Großteil des Risikos vom Auftraggeber an den Bauunternehmer weitergegeben. Der Bauunternehmer überträgt dieses Risiko weiter an seine Nachunternehmer [4]. Dadurch entsteht ein langer Entscheidungsweg. Als Folge können oft Meilensteine in Bauprojekten durch die fehlende Zuverlässigkeit von Terminplänen nicht eingehalten werden [11]. Damit steigt der Druck zu Ende eines Bauprojektes, welcher wiederum Kosten, Qualität sowie Arbeitssicherheit beeinflussen kann. Nach Ballard [12] werden mehr als 30 % der Baupläne verspätet übergeben, 25-50 % der Arbeitszeit wird für Nacharbeiten aufgewendet und nur 50-70 % aller Einzelaktivitäten werden zum geplanten Zeitpunkt fertiggestellt [13,14]. Hier parallelisieren oder überschneiden sich Aktivitäten gegen Ende des Bauprojektes und Gewerke behindern sich gegenseitig [15]. Weiter führt eine mangelnde Kooperation zwischen allen Projektbeteiligten zu einer hohen Anzahl von Behinderungsanzeigen und Nachträgen. Ein hohes Konfliktpotential ist die Folge, welche sich an den zahlreichen Gerichtsverfahren im Bauwesen erkennen lässt. Eine weitere Herausforderung im Bauwesen stellt die hohe Anzahl an Arbeitsunfällen auf Baustellen dar. So wurden in Deutschland allein im Jahr 2017 873.562 Arbeitsunfälle registriert (DGUV).

Die langjährige Produktivitätsentwicklung, die mangelhafte Wertschöpfung und die steigenden Kundenanforderungen zeigen, dass Qualität, Kosten und Zeit eine genauere Planung erfordern [16].

Es wird immer wichtiger, den Umfang der zu erbringenden Leistung zu definieren, mit einer Reihenfolge und Terminen zu koppeln [17].

## **2 Grundlagen Lean Philosophie**

### **2.1 Begriffe**

Im Rahmen des Lean Construction wird der Kundewert in den Mittelpunkt gestellt und der Prozess hinsichtlich seiner Verschwendungen analysiert. Dabei wird Verschwendung als alles definiert, welches keinen direkten Wert für den Kunden stiftet. „Lean Construction“ (engl.) bedeutet demnach ein „schlanker Bauprozess“. Im Gegensatz dazu stellt „Lean Thinking“ die übergeordnete Philosophie dar, welche auch in anderen Wirtschaftssektoren zunehmend Anwendung findet. „Lean Management“ fasst die Gesamtheit der Management-Werkzeuge zusammen, welche in der Umsetzung des Lean Thinkings unterstützen. Und Lean Construction ist die spezifische Anwendung von Lean Management im Bauwesen, auch LMB genannt.

Das Lean Construction Institut Deutschland (LCI) definiert Lean Construction als die „kluge Zuordnung von Ressourcen für die Transformation von Ausgangsmaterialien in Baustrukturen, während gleichzeitig der Fluss von Material und Informationen geglättet und der maximale Kundennutzen angestrebt wird.“ Ziel des Lean Construction ist ein nachhaltiges und intelligentes Bauen mit einer hohen Wertschöpfung.

### **2.2 Geschichtliche Entwicklung**

Die heute bekannte Lean-Philosophie [2] entstammt den Grundgedanken verschiedener Produktionssysteme. So ist die Produktion von venezianischen Militärschiffen im 15. und 16. Jahrhundert eine der ersten gut dokumentierten Aufzeichnungen eines schlanken Produktionssystems. Weitere wichtige Einflüsse hinsichtlich des Lean-Grundgedanken waren die Arbeitsteilung nach Taylor (1900), die Fließbandfertigung nach Ford (1910), die Entwicklung des Toyota Produktionssystems (TPS) (1945), oder die Segmentierung von General Motors sowie die Produktionssysteme weiterer Organisationen. Dabei ist das TPS als ein wesentlicher Entwicklungsschritt zur Lean-Philosophie hervorzuheben. Im Folgenden wird die geschichtliche Entwicklung genauer dargestellt:

### 2.2.1 Henry Ford

Henry Ford entwickelte aus dem Taylorismus, das Prinzip einer strikten Teilung von Kopf und Handarbeit und einer genauen Vorplanung aller Arbeitsschritte, den Fordismus. Dadurch realisierte er die Massenfertigung des Ford-Modells T mit dem Fließband (vgl. Reinhart 2017). Henry Ford strebte in seiner neuen Fabrik „River Rouge“ in den 1920er Jahren an, durch das Fließband die Integration von Arbeit, Rhythmus und zeitlicher Einteilung, von der Gewinnung der Rohmaterialien bis zum Verkauf der Automobile beim Einzelhändler, zu erreichen. Nach diesem Plan sollte die Arbeit von Millionen Menschen zu einer Einheit zusammengefasst werden [19].

### 2.2.2 Sakichi Toyoda

Viele Japanerinnen, so auch Toyodas Familie, arbeiteten am Anfang der 1900er Jahre an Webstühlen in Heimarbeit oder in Spinnereien. Sie mussten hierbei an technisch und ergonomisch unzureichenden Maschinen arbeiten, was Toyoda dazu motivierte, den ersten elektrisch betriebenen Webstuhl zu entwickeln. Der von ihm genannte „Power Loom“ wurde 1926 über seine Firma „Toyoda Automatic Loom Works, Ltd.“ auf den Markt gebracht. An dem Webstuhl war eine Vorrichtung eingebaut, dessen Prinzip wegweisend für spätere Produktionsarten sein wird. Ein Mechanismus, den er „Jidoka“ nannte, bewirkte, dass sich die Maschine beim Auftreten eines Problems selbst stoppte. Diese selbstgesteuerte Fehlererkennung gewährleistete die Qualität in der Produktion. „Jidoka“ wurde später eine Komponente des Toyota Production System (TPS) [19].

### 2.2.3 Taiichi Ohno

Die Ursprünge der Lean Management-Philosophie liegen im Toyota-Produktionssystem. Taiichi Ohno (Produktionsleiter Toyota) entwickelte Henry Fords Massenproduktion, bei dem die maßgebende Kennzahl die Maschinenproduktion war, weiter und legte den Fokus auf den Fluss eines einzelnen Produkts durch das Produktionssystem. Das TPS entstand aus einem Zwang zur Veränderung und Verschlankeung: Aufgrund der Isolationspolitik der USA gegenüber Japan in den 1930er Jahren und einer Ressourcenknappheit war Japan gezwungen, Ressourcen gezielt und effizient einzusetzen. Aus diesem Hintergrund heraus überdachten Toyoda Kiichirō, Taiichi Ohno und andere Mitarbeiter von Toyota die bestehenden Ansätze für Produktionssysteme. Ihr Ziel war es, mit einfachen Methoden und Werkzeugen einen konti-

nuierlichen Fluss der Produkte und eine hohe Variantenvielfalt ermöglichen zu können. Dies war eine Erweiterung des Ansatzes von Ford, der eine Produktion ohne Variantenvielfalt anstrebte. Ohnos Produktionsphilosophie war nicht auf die Erstellung einer standardisierten Massenware ausgerichtet, sondern hatte die Fertigung von am Kundenbedarf ausgerichteten Produkten zum Ziel [20]. Die neu entwickelten und zusammengestellten Methoden und Werkzeuge beziehen nicht nur Prozesse, sondern auch Mitarbeiter ein und bilden in ihrer Gesamtheit das TPS [12].

### 2.2.4 Womack & Jones: „The machine that changed the world“

James P. Womack und Daniel T. Jones beschreiben das TPS und wesentliche Ansätze anderer stabiler, verschwendungsarmer Produktionssysteme in ihren Büchern „The Machine that changed the world“ (1990) und „Lean Thinking“ (1996). Durch diese Werke etablierte sich der Begriff „Lean“. Lean bedeutet „schlank“ im Sinne von „verschwendungsarm“. Dies bedeutet eine Orientierung am Kundenwert, nicht-wertschöpfende Aktivitäten werden eliminiert bzw. reduziert.

Die Ansätze des Toyota-Produktionssystems wurden im Folgenden durch Womack, Jones, Goldratt sowie andere Persönlichkeiten weiterentwickelt. Die Etablierung des Terminus „Lean Production“ wird Womack, Jones und Roos in ihrem 1990 veröffentlichten Buch „The Machine that Changed the World“ zugeschrieben, in dem sie Methoden basierend auf den Lean Management-Prinzipien zur Verbesserung der Produktion von Automobilen beschreiben [6]. Das Buch ist eine Zusammenfassung, der von den Autoren von 1985 - 1990 durchgeführten Studie am Massachusetts Institute of Technology. In der Studie wurde Toyotas Produktionssystem mit amerikanischen und europäischen Produktionskonzepten verglichen.

Ergebnisse MIT-Studie [18]:

- 3-fache Produktivität mit der Hälfte an Mitarbeitern im Vergleich zu westlichen Produktionswerken
- 4-mal kürzere Lieferzeiten
- gleichzeitiges Angebot doppelt so vieler Modelle
- um 50 % kürzere Modellentwicklungszeiten
- Rückgriff auf nur 20 % der Lieferanten im Vergleich
- Fertigung auf einer um 50 % geringeren Montagefläche

### 3 Grundsätze des Lean Managements

Grundgedanke des Lean-Thinking ist es, den Fokus auf den Kundennutzen zu legen. Dazu wird eine kontinuierliche Verbesserung (jap. „Kaizen“) angestrebt und die Verschwendung (jap. „Muda“) wird in allen Bereichen reduziert. Das „Lean Thinking“ wurde in Europa und den USA mit den fünf heruntergebrochenen Grundprinzipien von Womack und Jones bekannt:

- Kunden-Wert: Erkenne den Wert aus Sicht des Kunden
- Wertstrom: Zeichne den Strom der notwendigen Schritte, um den Kundenwert abzuliefern.
- Fluss-Prinzip: Lasse die Arbeit entlang dieses Stroms fließen
- Pull-Prinzip: Benutze das Pull-Prinzip
- Streben nach Perfektion: Strebe nach Perfektion durch kontinuierliche Verbesserung [2]

Der Zusammenhang der 5 Grundprinzipien ist in der nachfolgenden Abbildung 2 visualisiert.

Der Kunde innerhalb des Erstellungsprozess von Bauwerken kann vielseitig gedeutet werden. Der Kunde kann der Bauherr sein, welcher das Bauwerk übernimmt. Aber auch der Generalplaner, Generalunternehmer oder Generalübernehmer stehen in einer Kundenbeziehung zu den Bauherren. Planer- und Gewerkegruppen wiederum sind einzelne Prozesskunden vorheriger Prozesse und Aufgaben. Der **Kundenwert** bezeichnet dabei die einzelnen notwendigen Wünsche dieser Kundengruppen. „Wo immer es ein Produkt für einen Kunden gibt, gibt es auch einen

Wertstrom. Unsere Herausforderung liegt darin, ihn zu sehen und zu verbessern“ [2]. Der Wertstrom umfasst alle Schritte (wertschöpfend und nicht-wertschöpfend), die nötig sind, um aus Rohmaterial ein Endprodukt für den Kunden zu erstellen. Der **Wertstrom** beinhaltet den Material- sowie den Informationsfluss. Um nicht-wertschöpfende Arbeitsschritte zu reduzieren und damit Möglichkeiten zu schaffen, wertschöpfende Tätigkeiten zu erhöhen.

Der **Fluss** betrachtet alle Teilleistungen auf der Baustelle und fordert einen gleichmäßigen Fortschritt von Bauabschnitt zu Bauabschnitt, ohne Stautufen und mit sorgfältig berechneten Wartezeiten [22]. Synchronisationspunkte koppeln die Phasen, Gewerke und Arbeitspakete aneinander [23]. In der stationären Produktion wird ein Fluss erzeugt, indem das Produkt (Objekt) durch die Arbeitsstationen (Subjekt) fließt. Im Gegensatz dazu fließt im Bau die Leistung (Subjekt), das Produkt (Objekt) hingegen ist stationär [6, 15]. Allerdings ist der Fluss auf einer Baustelle nur schwer erkennbar. „We all were educated to see resource utilization. Are workers busy? Are crane hooks loaded and swinging? But we were not educated to see work flow; e. g., to understand the various types of buffers, to select the right type of buffer for a given situation, and to locate and size those buffers to perform their tasks of absorbing variability and rebatching“ [6]. Weiter besteht das ideale Bild eines „One-Piece-Flows“. Bei einem One-Piece-Flow fließt in der stationären Industrie immer genau ein Produkt (Objekt) von einer Bearbeitungsstation zur nächsten (Subjekt). Vergleichend dazu besteht auf der Baustelle die ideale Struktur eines „Ein-Gewerke-

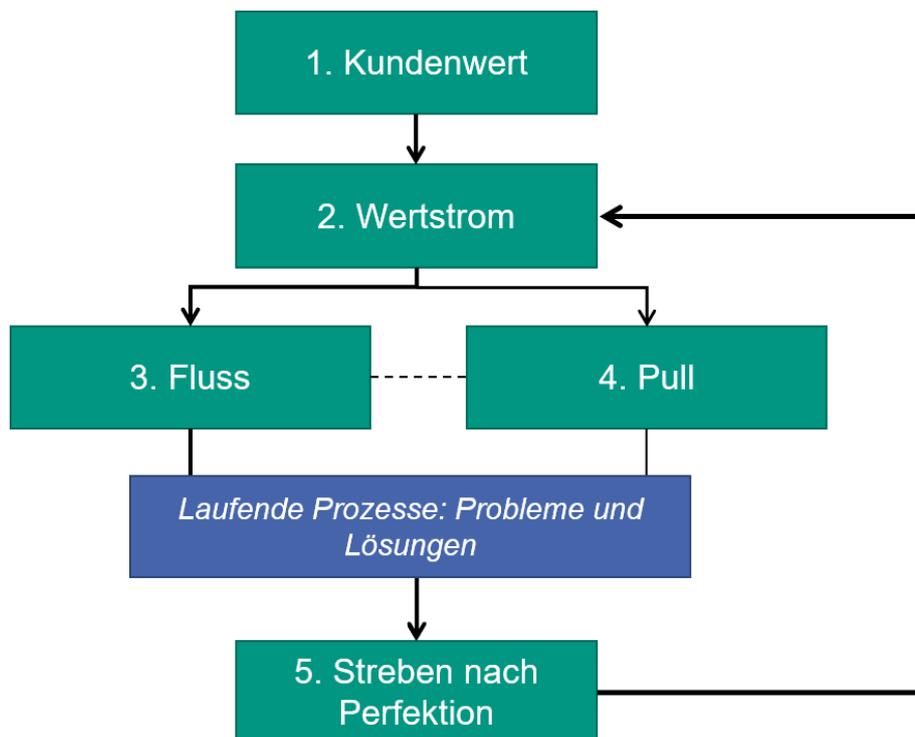


Abb. 2: Grundprinzipien des Lean Thinkings [2]

Flusses". Bei einem „Ein-Gewerke-Fluss“ bearbeiten Gewerke nacheinander jeweils nur einen Taktbereich. Es sollte sich immer nur ein Gewerk in einem Taktbereich befinden und nach der Erledigung des Arbeitspaketes in den nächsten Taktbereich wandern. Damit bearbeitet im Idealfall ein Wagon des Taktzuges mit einem Gewerk einen Taktbereich innerhalb eines Taktes. So kann eine einfache Kontrollierbarkeit und Übersichtlichkeit der Gewerke in den Taktbereichen gewährleistet werden. Außerdem werden klare Verantwortlichkeiten (Raum, Sauberkeit, Termintreue) festgelegt. Um Teilleistungen und Inkonsistenzen jedoch ausgleichen zu können, ist ein „Ein-Gewerke-Fluss“ nicht immer realisierbar. Ein „Mehr-Gewerke-Fluss“ (vergleichbar mit einem Multi-Piece-Flow in der stationären Produktion) muss an einigen Stellen eingeführt werden. Zugwagons bestehen in diesem Fall aus mehreren Gewerken und Arbeitspaketen.

Kommt es zu Terminverzögerung und ein Gewerk benötigt länger als das definierte Taktzeitintervall, so entsteht ein **Sog/Pull** in der Gewerkesequenz [28]. Die nachfolgenden Gewerke warten und „ziehen“ an der Gewerkesequenz. Sie können erst mit ihrem Arbeitspaket beginnen, sobald das vorherige abgeschlossen ist. Sog-Systeme werden auf der Baustelle bewusst zwischen den Zulieferern und Gewerken eingesetzt. „Pull systems release materials or information into a system based on the state of the system“, so Hopp und Spearman [24]. Die Gewerke geben den Zulieferern zeitgerecht Informationen zu benötigten Ressourcen und Materialien. So können sie ihren Bedarf nachfrageorientiert auf die Baustelle ziehen [15]. Zum Beispiel werden Beton-Anlieferungen über Pull-Systeme zur richtigen Zeit auf die Baustelle gezogen. Grund hierfür ist die sehr geringe Lagerbeständigkeit. Andere Ressourcen und Materialien haben jedoch eine sehr lange Lieferzeit und werden daher über Push-Systeme auf die Baustelle geschoben. Ihr Bedarf wird im Voraus antizipiert [13].

Um auf Störungen schnell reagieren zu können, ist eine schnelle Problemevaluation und Maßnahmenfindung notwendig. Maßnahmen müssen in Form neuer Standards dokumentiert werden. Diese vereinheitlichen und bündeln das Wissen bei Partnern, in Prozessen, Modulen und dem Layout. Dafür ist eine aktive Kommunikation zwischen den Gewerken und dem Baumanagement notwendig [31]. Die Standards können auf Basis eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses (jap. „Kaizen“) weiterentwickelt werden und stabilisieren die Prozesse. So kann gewährleistet werden, dass alle benötigten Ressourcen Just-in-Time (JIT) angeliefert werden und keine ungeplanten Störungen auftreten. Mit dem kontinuierlichen Verbesserungsprozess wird die Perfektion angestrebt.

## 4 Adaption Lean Construction

Im nächsten Schritt wurden die erarbeiteten Grundsätze von Lean Production auf eine abstraktere Ebene gehoben und als Lean Thinking im Sinne einer Management-Philosophie allgemein für die Führung in Organisationen, sowie die Gestaltung von Leistungserstellungsprozessen jeglicher Art beschrieben. In den folgenden Jahren wurden die Lean Management-Prinzipien nicht mehr nur im Bereich der Produktion selbst eingesetzt, sondern teilweise zur Abwicklung von Logistik-, Einkaufs- und Vertriebsprozessen verwendet [21]. Lean Construction ist die Übertragung von Lean Management auf das Bauwesen.

Die Entwicklung des Lean Ansatzes im Bauwesen ist jedoch noch seit 1992 in ihren Anfängen. Vergleichend dazu hat die Automobilindustrie seit dem Ende der 1980er Jahre einen enormen Wandel hinsichtlich Lean-Aspekten durchlaufen. In Deutschland wurden bisher im Bauwesen gelegentlich nur einzelne Werkzeuge und Methoden des Lean Management verwendet. Bauprojekte mit Anwendung von Lean Construction sind vor allem in den USA, dem Vereinigten Königreich, Dänemark, Finnland, Australien, Brasilien, Chile und Peru zu finden. Weitere erste Entwicklungen sind in Singapur, Indonesien, Ecuador und Kolumbien zu verfolgen [6]. Lean-Methoden und Werkzeuge werden u. a. bei Linienbaustellen oder Hochbauprojekten angewendet. Potenziale sind jedoch in jeder Projektart gegeben. Die Umsetzung von Lean Construction in der deutschen Baupraxis steht ausgehend vom Gesamtpotenzial noch am Anfang [8].

### 4.1 Chancen durch Lean Construction

Ziel des Lean Construction ist ein nachhaltiges und intelligentes Bauen mit einer hohen Wertschöpfung. So muss zuallererst eine stabile Basis geschaffen werden. Dies geschieht durch eine enge Kollaboration, Transparenz und Standardisierung. Es werden die richtigen Informationen und Entscheidungen zur Planung und Durchführung übermittelt [12]. Erst wenn diese Stabilität erreicht ist, können die eigentlichen Ziele des Lean Managements konkret verfolgt werden: Höchste Qualität, geringste Kosten und kürzeste Durchlaufzeiten. Kundenanforderungen werden mit verbesserten Prozessen und einer reduzierten Verschwendung ausgeführt. Aktivitäten, die keinen zusätzlichen Wert schaffen, sind zu eliminieren [12]. Folglich gilt es, eine prozessoptimierte Gewerkesequenz ohne offensichtliche Verschwendung und minimierter verdeckter Verschwendung zu planen und zu steuern. Wartezeiten sowie unnötige Zwischenlagerungen von Baumaterialien werden vermieden und

der Herstellungsprozess kann in einem kontinuierlichen Fluss erfolgen [12]. Produktivität wird signifikant gesteigert und die Leistungserstellung wird gleichmäßig verteilt. Zuletzt wird der Bauablauf zur Einhaltung der Lean-Ansätze permanent kontrolliert und gesteuert [12].

### 5 Verschwendung

Lean Construction bedeutet die Identifikation des Wertes und die Ausrichtung am Kundenwert. Der Kundenwert soll maximiert werden, indem die Verschwendung (japanisch: Muda) entlang des Wertstroms minimiert wird.

Öno nennt die drei M's der Verschwendung auf Japanisch als „Muda“ (= Abfall), „Muri“ (= Überlastung) und „Mura“ (= Ungleichmäßigkeit) [30]. Muda sind Aktivitäten, die Ressourcen verbrauchen, ohne dabei einen Kundenwert zu erzeugen [19]. Mura ist ein nicht-synchroner Gesamtablauf der Teilprozesse, dessen Ausgleichmechanismen Muda erzeugen. Muri ist die Überlastung einzelner Produktionsteile (Maschinen, Menschen, Vorgänge...) und damit der Verursacher von Mura. Sowohl Mura als auch Muri erzeugen Muda [4]. In Abbildung 3 sind die drei M's der Verschwendung dargestellt.

Es gibt sieben Arten der Verschwendung. Ordnet man diese vertikal an, so lässt sich aus den ersten Buchstaben der Name „TIM WOOD“ ablesen.

Tab. 1: Tim Wood

<b>T</b>	Transportation	Transport
<b>I</b>	Inventory	Lagerbestände
<b>M</b>	Motion	Überflüssige Bewegungen
<b>W</b>	Waiting	Wartezeiten
<b>O</b>	Overproduction	Überproduktion
<b>O</b>	Overprocessing	Ineffiziente Arbeitsprozesse
<b>D</b>	Defects/ Rework	Produktionsfehler/ Nacharbeiten

Verschwendung beim Transport sind zum Beispiel unnötig lange Transporte aufgrund von großen Abständen zwischen zwei Produktionsstätten bzw. Prozessschritten. Außerdem muss eine optimale Liefermenge gewährleistet sein, damit weder der Produktionsfluss gefährdet ist, noch die Lagerbestände ein ungesundes Maß übersteigen [4]. Ein zu großes Lager bindet unproduktives Kapital, dessen Wert über die

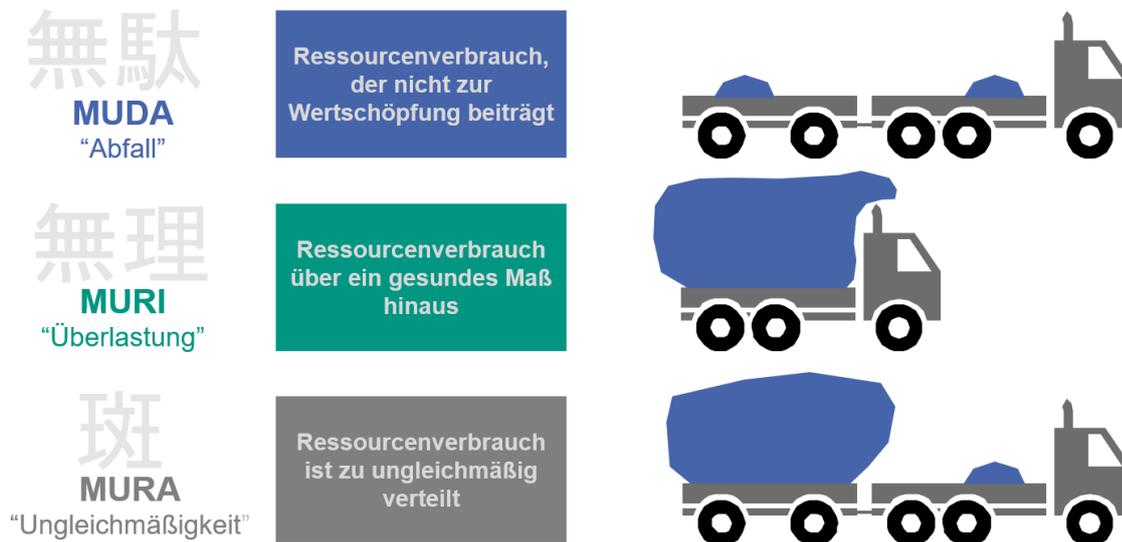


Abb. 3: Muda, Muri, Mura; eigene Darstellung

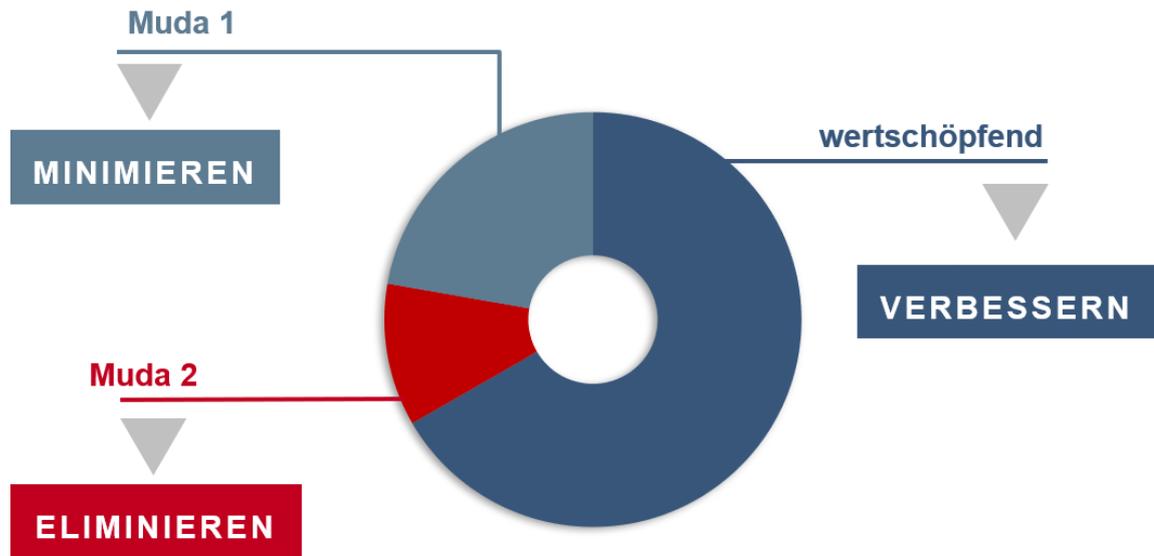


Abb. 4: Der Verschwendungskreis; eigene Darstellung

Lagerdauer abnimmt und für dessen Unterhalt Kosten anfallen. Lagerhaltung ist zwar ein gutes Mittel zur Pufferung der Produktionskapazitäten, verhindert aber, dass Unregelmäßigkeiten konsequent weiterverfolgt werden [4]. Mit „überflüssigen Bewegungen“ sind keine Transportvorgänge von Waren, Maschinen oder Personen gemeint, sondern die Bewegungen des Arbeiters während der Produktion. Zur Schonung des Mitarbeiters und Erhöhung der Geschwindigkeit sollte dieser seine Tätigkeiten möglichst einfach und ohne überflüssige Handgriffe oder Wege erledigen können. Die räumliche und übersichtliche Anordnung der Produktionsmittel ist hierbei von besonderer Wichtigkeit [4]. Wartezeiten sind eine Unterbrechung des Produktionsflusses und führen zu einem Verbrauch der Ressource Arbeitskraft. Sie sollten daher als eine Art von Muda auf jeden Fall vermieden werden [4]. Die Überproduktion dient als Puffer, um Unregelmäßigkeiten abzufangen. Die zu viel produzierte Ware muss eingelagert werden und verursacht dadurch Lagerhaltungskosten. Außerdem entsteht das Risiko, dass die Überproduktion nicht verkauft werden kann [4]. Produktionsfehler und Nacharbeiten machen sich direkt als Verschwendung durch Nachbesserung oder Entsorgung und damit Wertvernichtung bemerkbar [4]. Es wird zwischen zwei Typen von Muda unterschieden. Beim Muda Typ 1 handelt es sich um eine Scheinleistung. Das heißt der Vorgang sorgt für keinen Wertzuwachs, ist aber unvermeidbar unter den gegenwärtigen Technologien und Fertigungseinrichtungen. Muda Typ 2 ist eine Blindleistung, die keinen Wert erzeugt und direkt vermeidbar ist [2]. Muda vom Typ 2 kann und sollte sofort aus dem Produktionsprozess eliminiert werden. Muda

vom Typ 1 und wertschöpfende Tätigkeiten müssen mit den Grundprinzipien Flow, Pull und Perfektion bearbeitet werden, um damit minimiert bzw. verbessert zu werden [2]. In Abbildung 4 ist der Verschwendungskreis dargestellt. Er zeigt den Anteil von Muda 1, Muda 2 und wertschöpfenden Tätigkeiten an der Gesamtheit des Produktionsprozesses.

## 6 Verbesserung von Prozessen

Womack und Jones [2] verfassen im fünften Grundprinzip des Lean Gedankens das Streben nach Perfektion. Darin ist die ständige Weiterentwicklung von Prozessen enthalten. Dieses Kapitel befasst sich deshalb ausführlich mit den Instrumenten und Methoden der Verbesserung von Prozessen und Verträgen.

### 6.1 Kaizen & Kaikaku

Die japanische Bezeichnung eines „kontinuierlichen Verbesserungsprozesses (KVP)“ ist „Kaizen“. Es handelt sich um einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess in kleinen Schritten, der durch die Einbeziehung der Mitarbeiter möglich gemacht wird [24]. Neben dem Prinzip „Kaizen“ gibt es noch das Prinzip „Kaikaku“, das die Verbesserung durch große Innovationssprünge beschreibt. Kaikaku sind große technologische Durchbrüche, neue Managementkonzepte oder neue Produktionstechniken. Kaizen ist im Vergleich zum Kaikaku eine langfristige Aufgabe, deren Implementierung in kleinen Schritten erfolgt. Kaikaku wird in einem großen Schritt implementiert und erfordert hierfür bedeutsame Investitionen. Ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess findet auf der Mitarbeiterenebene statt. Innovationen werden hingegen eher vom Management eingeführt [25].

### 6.2 Der Verbesserungszyklus als Instrument der Verbesserung

Ziel von Kaizen ist die kontinuierliche Verbesserung von Prozessen. Kaizen bedient sich hierbei dem Instrument des „nicht endenden Verbesserungszyklus“ [26]. Der Verbesserungszyklus wird auch PDCA-Zyklus genannt. Es handelt es sich um eine Qualitätstechnik, bei der die grundlegenden Phasen der Verbesserung als Instrumente des Lean Management definiert werden [19]. PDCA steht für die Anfangsbuchstaben der vier Kreisbestandteile Plan, Do, Act/Adjust und Check. Der Zyklus beginnt mit dem Schritt 1. Plan und wird dann in unendlich vielen Schleifen nach dem Prinzip von Kaizen durchlaufen [25].

**Plan:** Es erfolgt die Sammlung von Informationen, eine Analyse der Situation und eine genaue Beschreibung des Problems. Außerdem muss der Kundenbedarf klar ermittelt sein und ein Ziel der gewünschten Verbesserung gesetzt werden [19].

**Do:** In dieser Phase kommt es zur Implementierung der geplanten Verbesserung [26].

**Check:** Es wird die Wirkung der geplanten Verbesserung überprüft. Außerdem erfolgt ein Abgleich mit den gesetzten Zielen aus der „Plan“-Phase [19].

**Act/ Adjust:** Bei Nichterfüllung der Ziele wird das Problem mit einem weiteren Durchlauf von neuem verbessert. Wurden die Ziele mithilfe der Verbesserung erreicht, so wird die Verbesserung unternehmensweit standardisiert. Nach der Realisierung der Verbesserung werden neue Ziele, basierend auf der alten Verbesserung, gesetzt und der Zyklus läuft weiter [26].

### 6.3 Ursachenforschung von Problemen

In der Plan-Phase des PDCA-Zyklus, muss vor der Entwicklung eines Plans zur Verbesserung das Problem identifiziert werden.

#### 6.3.1 Die 5-W-Methode

Um Ursachen eines Problems zu identifizieren, kann die 5-W-Methode verwendet werden. Die 5-W-Methode ist ein einfaches System zur Ursachenforschung, bei dem ein unbekannter Fehler durch wiederholtes Fragen „Warum?“ spezifiziert wird, bis das Kernproblem identifiziert ist. Auf Basis der vorherigen Antwort, wird das Problem durch erneutes Fragen „Warum?“ weiter eingegrenzt, bis es eindeutig identifiziert ist.

## 7 Ansatzpunkte in der Betonproduktion

Die Lean Philosophie kann dort Anwendung finden, wo Prozesse stattfinden. Somit sind die Grundlagen zur Anwendung von Lean in der Betonproduktion gegeben. Die Produktion von Zement und Beton ist charakterisiert durch die Chargenproduktion, das heißt, es findet ein diskontinuierlicher Prozess statt, der anhand von Rezepturen ein bestimmtes Produkt in einer vorgegebenen Menge und Qualität herstellt [27]. Abbildung 5 zeigt schematisch und vereinfacht den Prozess der Betonindustrie. Es gibt Input Ressourcen in Form von Rohmaterialien, diese werden einem Produktionssystem zugeführt und in Beton umgewandelt. Je nach Anforderung der Baustelle wird dieser Beton in Form von Transportbeton auf die Baustelle transportiert oder in weiteren Produktionsschritten zu Betonfertigteilen verarbeitet und dann in Form von Bauteilen auf die Baustelle transportiert.

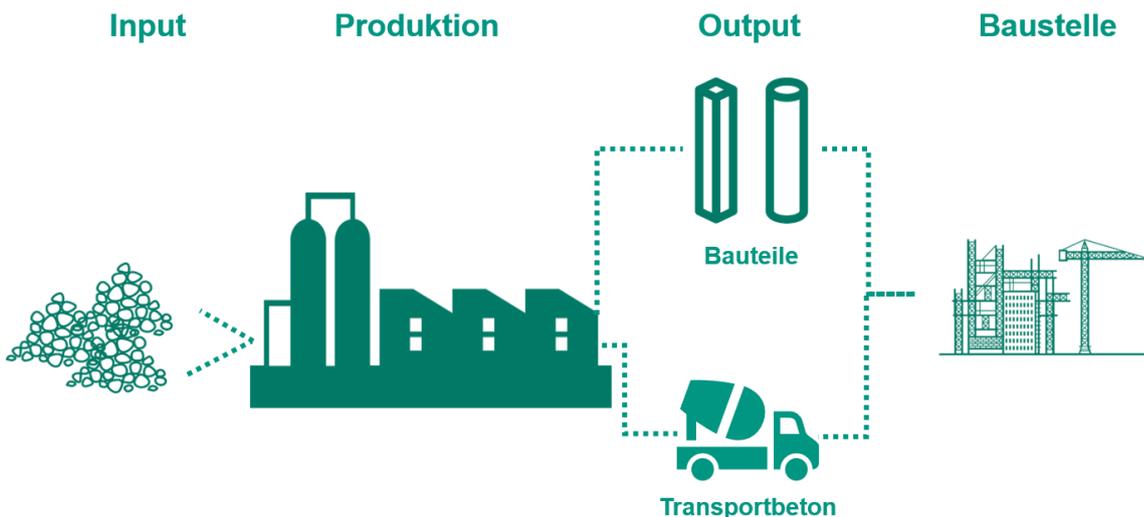


Abb. 5: Vereinfachter Prozess Betonindustrie; eigene Darstellung

Deutlich werden diese Potentiale, die sowohl im Fertigteilebau als auch in der Beton- und Zementindustrie Anwendung finden können, in folgenden Beispielen.

Ballard et al. haben bereits 2003 die Anwendung von Lean Konzepten in der Betonfertigteileindustrie untersucht. Dazu wurde ein Experiment in einer Produktionsstätte in England durchgeführt. Auszugsweise einige Ergebnisse:

- Steigerung der Produktion von Wandelementen von 3,2 Wänden/Tag auf 9 Wände/Tag
- Steigerung des wöchentlichen Umsatzes von £130.000 auf £260.000 bei einer Erhöhung der Mitarbeiterzahl von 115 auf 122.
- Qualitativ wurde durch die Baustelle eine Erhöhung der Qualität festgestellt, ohne diese bis dahin gemessen zu haben [28].

Wichtig hierbei ist zu erwähnen, dass während der ersten Implementierungsphase nichts an der technologischen Ausstattung der Produktion verändert wurde, es wurden nur Umstrukturierungsprozesse im Sinne der Lean Philosophie durchgeführt. Ein weiteres Beispiel, das eine Lösung für einen Engpass in der Produktion von Beton liefert, wurde von der Firma Alcemy entwickelt. Anhand einer Prozessanalyse wurde hier festgestellt, dass der Prozess der Qualitätsüberwachung für Betonmischungen kritisch sowohl für den Bauunternehmer, als auch für Produktionswerk ist. Mit gängigen Methoden dauert dieser Prozess aktuell circa 28 Tage. Um die möglichen Folgen einer schlechten Betoncharge abzufangen, wird der Anteil an Zement in der Mixtur mit bis zu 20 % überbemessen. Was im Sinne der Lean Philosophie eine klare Überproduktion darstellt. Die technische Lösung der Firma kann der Testzyklus von 28 Tagen auf 40 min reduzieren. Dies ermöglicht direkten Einfluss auf die Produktion, um nötige Anpassungen während des Prozesses vorzunehmen und so auf verschiedenen Rohmaterialressourcen zu reagieren. Konsequenz kann nun die exakt erforderliche Menge an Zement in die Betonrezeptur eingebracht werden. Würde diese Technologie weltweit genutzt, könnte das Äquivalent zum CO<sub>2</sub>-Ausstoß des Vereinten Königreiches eingespart werden. Interessant hierbei ist, dass dies unter der Annahme eines nicht weiter optimierten Produktionsprozesses stattfinden kann [29].

## 8 Ausblick

Die Lean Philosophie ist in allen Lebensbereichen, wo Prozesse stattfinden, einsetzbar und beinahe alle Interaktionen sind als Prozess abbildbar. Im Hinblick auf eine Prozessoptimierung, wie sie bei Toyota im Toyota Production System stattgefunden hat, steht die Betonindustrie sicherlich am Anfang. Obwohl wie die Beispiele zeigen, es schon seit längerer Zeit Ansatzpunkte für die Umstrukturierung von Prozessen, zumindest in der Fertigteilebranche, gibt. Spannend wird es ganz aktuell, wenn man die Prozessanalyse nutzt, um auch technologische Innovationen, wie zum Beispiel Künstliche Intelligenz Anwendungen, in Branche bringt. Hier deuten sich enorme Potentiale an. Das Attraktive an der Implementierung von Lean Methoden in Prozessen ist, dass dies in den meisten Fällen ohne große Investitionen möglich ist und mit einem Umdenken und Hinterfragen von Prozessen und deren Auswirkungen oft schon immense Erfolge erzielt werden können. Oder wie Rother et al. es formulieren, das „Sehen“ muss neu erlernt werden [23].

## 9 Literatur

- [1] McKinsey Global Institutes (MGI) (2017): Reinventing Construction: A Route To Higher Productivity. Online verfügbar unter <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Capital%20Projects%20and%20Infrastructure/Our%20Insights/Reinventing%20construction%20through%20a%20productivity%20revolution/MGI-Reinventing-construction-A-route-to-higher-productivity-Full-report.ashx>.
- [2] Womack, J. P.; Jones, D. T.; Ross, D.: The machine that changed the world. The story of lean production - Toyota's secret weapon in the global car wars that is revolutionizing world industry. Free Press, New York, 2007.
- [3] Haghsheno, Shervin, Marco Binnering, and Janosch Dlouhy. "Wertschöpfungsorientierte Planung und Realisierung von Bauvorhaben durch Lean Construction." Der Bauingenieur, Jahressausgabe 2016 (2015): 140ff.
- [4] Fiedler, Martin (Hg.) (2018): Lean Construction - das Managementhandbuch. Agile Methoden und Lean Management im Bauwesen. Berlin: Springer Gabler. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-55337-4>.

- [5] Haghsheno, Shervin: VDI Expertenforum.
- [6] Ballard, Glenn; Howell, Gregory A. (2003): Lean project management. In: Building Research & Information 31 (2), S. 119-133. DOI: 10.1080/09613210301997.
- [7] Schneider, Rolf (2013): Geringe Produktivitätszuwächse in Deutschland. Economic Research. Hg. v. Allianz. München. Online verfügbar unter [https://www.allianz.com/content/dam/onemarketing/azcom/Allianz\\_com/migration/media/economic\\_research/publications/working\\_papers/de/Produktivitaet13.pdf](https://www.allianz.com/content/dam/onemarketing/azcom/Allianz_com/migration/media/economic_research/publications/working_papers/de/Produktivitaet13.pdf).
- [8] Heidemann, Ailke (2011): Kooperative Projektentwicklung im Bauwesen unter der Berücksichtigung von Lean-Prinzipien - Entwicklung eines Lean-Projektentwicklungssystems: Internationale Untersuchungen im Hinblick auf die Umsetzung und Anwendbarkeit in Deutschland. s.l.: KIT Scientific Publishing. Online verfügbar unter <http://www.doabooks.org/doab?func=fulltext&rid=19448>.
- [9] Fockenber, Klaus (o.J.) (2008): Lean Construction auf der Baustelle. Frankfurt am Main: Fischer.
- [10] Zentrum für Bau- und Infrastrukturmanagement; Lehrstuhl für Bauwirtschaft und Baubetrieb, TU Braunschweig; Lehrstuhl für Infrastruktur- und Immobilienmanagement, TU Braunschweig: Tagungsband zum 29. BBB-Assistententreffen - Fachkongress der wissenschaftlichen Mitarbeiter der Bereiche Bauwirtschaft, Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik: Beiträge zum 29. BBB-Assistententreffen vom 06. bis 08. Juni 2018 in Braunschweig. Unter Mitarbeit von Universitätsbibliothek Braunschweig.
- [11] Potts, K. (Hg.) (2005): The New Scottish Parliament Building—a critical examination of the lessons to be learned in: Proceedings of the Third International Conference on Construction in the 21st Century. Third International Conference on Construction in the 21st Century.
- [12] Gehbauer, Fritz (Hg.) (2007): Was bedeutet Lean Construction? Lean Praxis Tag. Karlsruhe, 23.01.2007. Universität Karlsruhe. Online verfügbar unter <https://docplayer.org/682442-Was-bedeutet-lean-construction.html>, zuletzt geprüft am 17.06.2019.
- [13] Kalsaas, Bo Terje; Koskela, Lauri; Saurin, Tarcisio Abreu; Bygballe, Lena E.; Swärd, Anna (Hg.) (2014): Implementing Lean Construction - A Practice Perspective. 22nd Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Oslo, Norway.
- [14] Tucker, Selwyn N.; Ballard, Glenn (Hg.) (1997): Lookahead Planning: The Missing Link in Production Control. 5th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Gold Coast, Australia.
- [15] Friedrich, Till; Meijnen, Peter; Schriewersmann, Florian (2013): Lean Construction - die Übertragung der Erfolgsmodelle aus der Automobilindustrie. In: Christoph Motzko (Hg.): Praxis des Bauprozessmanagements. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, S. 37-52.
- [16] Volkmann, Walter (2003): Projektentwicklung. Handbuch für die planerische und baupraktische Umsetzung ; Methoden, Arbeitshilfen, Vordrucke ; [für Architekten und Ingenieure in Architekturbüros, in Ingenieurbüros, in Bauunternehmungen, bei Projektentwicklern, in Bauherrenorganisationen. 2., überarb. u. erw. Aufl. Essen: Verl. für Wirtschaft und Verwaltung Wingen.
- [17] Scheifele, Daniel R. (1991): Bauprojekttablauf. Grundlagen und Modelle für eine effiziente Ablaufplanung im Bauwesen. Köln: Verl. TÜV Rheinland (Schriftenreihe der Gesellschaft für Projektmanagement).
- [18] Womack, James P.; Jones, Daniel T.; Roos, Daniel (1990): The machine that changed the world. Based on the Massachusetts Institute of Technology 5 million dollar 5 year study on the future of the automobile. New York, NY: Rawson.
- [19] Zollondz, Hans-Dieter (2013): Grundlagen Lean Management. Einführung in Geschichte, Begriffe, Systeme, Techniken sowie Gestaltungs- und Implementierungsansätze eines modernen Managementparadigmas. München: Oldenbourg (Edition Management). Online verfügbar unter [http://www.degruyter.com/search?f\\_0=isbn&searchTitles=true](http://www.degruyter.com/search?f_0=isbn&searchTitles=true)
- [20] Howell, Gregory A. (Hg.) (1999): What is Lean Construction? 7th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Berkeley.
- [21] Staufen AG (Hrsg.) (2016): 25 Jahre Lean Management. Lean gestern, heute und morgen. Online verfügbar unter [http://www.staufen.ag/fileadmin/HQ/02-Company/05-Media/2-Studies/STAU-FEN.-studie25-jahre-lean-management-2016-de\\_DE.pdf](http://www.staufen.ag/fileadmin/HQ/02-Company/05-Media/2-Studies/STAU-FEN.-studie25-jahre-lean-management-2016-de_DE.pdf).
- [22] Faloughi, Mazen; Linnik, Meeli; Murphy, Dan (Hg.) (2015): WIP design in a construction projekt using takt time planning. Process 23rd Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Perth, 29.-31.07.2015. Online verfügbar unter [https://pdfs.semanticscholar.org/af4e/e3d327da8c7a55b4352ccd966dbfa40faf95.pdf?\\_ga=2.180475239.1911568754.1560761450-1199780985.1555487899](https://pdfs.semanticscholar.org/af4e/e3d327da8c7a55b4352ccd966dbfa40faf95.pdf?_ga=2.180475239.1911568754.1560761450-1199780985.1555487899), zuletzt geprüft am 17.06.2019.

[23] Rother, Mike, and John Shook. Learning to see: value stream mapping to add value and eliminate muda. Lean Enterprise Institute, 2003.

[24] Liker, Jeffrey K. (2004): The Toyota way. 14 management principles from the world's greatest manufacturer. New York, NY: McGraw-Hill. Online verfügbar unter <http://www.loc.gov/catdir/bios/mh041/2004300007.html>.

[25] Imai, Masaaki; Nitsch, Franz (1994): Kaizen. Der Schlüssel zum Erfolg der Japaner im Wettbewerb. 12. Aufl. München: Wirtschaftsverl. Langen Müller/Herbig.

[26] Schmelzer, Hermann J.; Sesselmann, Wolfgang (2013): Geschäftsprozessmanagement in der Praxis. Kunden zufriedenstellen, Produktivität steigern, Wert erhöhen: [das Standardwerk. 8., überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Hanser.

[27] Anschütz, Stefan. "Produktionsablaufplanung bei Chargenproduktion." Ablaufplanung bei Chargenproduktion. Deutscher Universitätsverlag, 2001. 21-44.

[28] Ballard, Glenn, Nigel Harper, and Todd Zabelle. "Learning to see work flow: an application of lean concepts to precast concrete fabrication." Engineering, Construction and Architectural Management 10.1 (2003): 6-14.

[29] Spenner, Leopold <https://www.youtube.com/watch?v=lvS4QYrsy5A> (abgerufen am 03.06.2019)

[30] Ōno, Taiichi; Bodek, Norman (2008): Toyota production system. Beyond large-scale production. [Reprinted]. New York, NY: Productivity Press.

[31] Hofacker, Alexander (2010): Bewertung und Einführung von Lean-Methoden in der Einzel- und Kleinserienfertigung am Beispiel des Stahlbaus. Unter Mitarbeit von Fritz Gehbauer und Gisela Lanza. Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe.

## **Autoren**

### **Dominik Steuer, M.Sc.**

Institut für Technologie und Management im Baubetrieb, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Gotthard-Franz-Str. 3  
76131 Karlsruhe

### **Svenja Oprach, M.Sc.**

Institut für Technologie und Management im Baubetrieb, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Gotthard-Franz-Str. 3  
76131 Karlsruhe

### **Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Shervin Hagsheno**

Institut für Technologie und Management im Baubetrieb, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Gotthard-Franz-Str. 3  
76131 Karlsruhe



# Neue Dauerhaftigkeitskonzepte in der Betonnormung – Potenziale für Ressourceneffizienz ?

Rolf Breitenbücher

In den einschlägigen Regelwerken wird die Dauerhaftigkeit von Beton nach wie vor über deskriptive Vorgaben wie Mindestzementgehalt, maximal zulässiger Wasserzementwert, Mindestbetondeckung usw. geregelt. Die Grenzwerte dieser Kriterien sind einzig empirisch begründet und wurden im Laufe der Zeit entsprechend den einschlägigen Beobachtungen in situ bei Bedarf auch modifiziert. Das setzt automatisch voraus, dass entsprechend langfristige Erfahrungen mit den jeweiligen Betonen vorliegen müssen.

In Zeiten, in denen sich auch die Betontechnik zunehmend mit immer rascher modifizierten und auch mit neuen Betonausgangsstoffen auseinandersetzen muss, kann sich hinsichtlich der Dauerhaftigkeit ein gewisses Risiko ergeben. Werden für diese Betone – mangels einschlägiger Erfahrung – die vorhandenen deskriptiven Regeln von den früher bewährten Betonen einfach übernommen, kann die Dauerhaftigkeit über Jahrzehnte möglicherweise nicht mehr sichergestellt sein.

Daher ergibt sich die Notwendigkeit, die Dauerhaftigkeit von Betonen zukünftig über entsprechende performance-basierte Konzepte zu regeln, wie dies z. B. für die Nachweise der Gebrauchstauglichkeit und Standsicherheit seit Jahrzehnten bereits praktiziert wird. Bei der Überarbeitung der einschlägigen Betonnormen (sowohl von Bemessungs- als auch Baustoffseite) sollen aufeinander abgestimmte Regelungen definiert werden. Hinsichtlich der Betontechnik werden dazu entsprechende Widerstandsklassen für die dauerhaftigkeitsrelevanten Einwirkungen in die Norm eingeführt werden, z. B. für die Carbonatisierung, die Chlorideindringung. Damit kann dann das tatsächliche Verhalten des jeweiligen Betons unter diesen Einwirkungen beschrieben und klassifiziert werden. Dieses Konzept erfordert gleichzeitig, dass für diese Einwirkungen entsprechende Prüfverfahren zur Verfügung stehen.

Mit diesen Konzepten wird somit das Verhalten der Betone unter den jeweiligen Einwirkungen realistischer als bisher beschrieben. Gleichzeitig kann damit auch überprüft werden, inwieweit die bisherigen empirisch basierten Grenzen für die Dauerhaftigkeit der Betone hinreichend sind. Möglicherweise ergeben sich dabei für einzelne Expositionsklassen Fälle, in denen sich die heutigen Mindestanforderungen an die Betonzusammensetzung als knapp auf der

unsicheren Seite abbilden, aber auch solche, bei denen die heutigen Vorgaben weit auf der sicheren Seite liegen. Bei Letzteren können dann die immer knapper werdenden Ressourcen an Betonausgangsstoffen deutlich effizienter genutzt werden als bislang.

## **Autor**

**Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher**

Ruhr-Universität Bochum

Universitätsstr. 150

44801 Bochum



# R-Beton aus der Sicht des Transportbetonproduzenten – Theorie und Praxis

Wolfgang Hirth

## Zusammenfassung

Die Steigerung der Ressourceneffizienz im Bausektor ist ein zentrales Element in der Nachhaltigkeitsstrategie des Landes Baden-Württemberg. Ein zentrales Ziel des nachhaltigen Bauens ist die Steigerung der Ressourcenproduktivität. Auf Bundesebene wurde am 29.02.2012 das „Deutsche Ressourceneffizienzprogramm“ ProgRess verabschiedet, welches 2016 als ProgRess II fortgeschrieben wurde. Die Bundesregierung hat die hohen Verwertungsquoten bei mineralischen Bau- und Abbruchabfällen von mehr als 90 Prozent realisiert. Sie sieht allerdings die Gefahr von regionalen Sättigungseffekten bei den bisherigen Verwertungswegen und möchte daher weitere Einsatzbereiche, wie zum Beispiel den Einsatz von Recyclinggesteinskörnung im Hochbau, erschließen.

Die Firma peterbeton Rudolf Peter GmbH & Co. KG, Kies- und Betonwerke, betreibt 2 Kies- und 6 Transportbetonwerke. Das erste Transportbetonwerk wurde 1961 in Betrieb genommen. Vier Transportbetonwerke haben ihren Standort in Kieswerken. Dies bedeutet eine wirtschaftliche, problemlose und ressourceneffiziente Versorgung mit Gesteinskörnung.

Die Aufgabenstellung „bis zu 45 % der Gesteinskörnung durch RC-Zuschlag zu ersetzen“ stellt uns bzw. die Transportbetonindustrie vor neue technische und logistische Herausforderungen. Aktuell gibt es zwei zertifizierte Lieferanten für RC-Zuschläge – die Firma Scherer + Kohl in Ludwigshafen ~ 75km – und die Firma Feess in Kirchheim ~ 105km – von unserem TB-Werk in KA-Rheinhafen entfernt. Die Verfügbarkeit größerer Mengen RC-Zuschlag über einen Bauzeitraum von 6-12 Monaten kann nur schwer gewährleistet werden. Für 1 m<sup>3</sup> Beton benötigt man bei 45 % RC-Anteil 810 kg RC-Zuschlag – für eine Betonage von 250 m<sup>3</sup> entspricht dies 200 to, also 8 Sattelzüge, die möglichst just-in-time, in einem Zeitraum von 4 Stunden, im TB-Werk angeliefert werden müssen.

Die Herstellung und pünktliche Belieferung mit R-Beton erfordert einen wesentlich höheren Abstimmungsbedarf zwischen Baustelle, TB-Werk und RC-Zuschlagslieferanten. Kurzfristige Abrufe der Baustelle sind nicht umsetzbar. Daher empfehlen wir ein R-Beton-Team, analog zum Sichtbeton-Team, in dem sich Bauherr, Bauunternehmer, RC-Lieferant und Transportbetonwerk schon vor Vergabe der Bau- und Lieferverträge abstimmen und austauschen können.

## 1 Was will die Politik?

Die Steigerung der Ressourceneffizienz ist ein zentrales Element in der Nachhaltigkeitsstrategie des Landes Baden-Württemberg. Ein zentrales Ziel des nachhaltigen Bauens ist die Steigerung der Ressourcenproduktivität.

Auf Bundesebene wurde am 29.02.2012 das „Deutsche Ressourceneffizienzprogramm“ ProgRess verabschiedet und 2016 als ProgRess II fortgeschrieben. Im Entwurf der Fortschreibung wurde noch eine signifikante Erhöhung des Einsatzes von Recycling-Gesteinskörnung als Betonzuschlagsstoff bis zum Jahr 2030 gefordert [Tab. 2, S. 49, Version RA 10.08.2015]. Im tatsächlichen Programm hat man aber erkannt: „Bei bereits sehr hohen Verwertungsquoten bei mineralischen Bau- und Abbruchabfällen in Höhe von mehr als 90 Prozent gibt es auf den ersten Blick nur ein geringes Potential zur Steigerung des Anteils an Sekundärrohstoffen in Bauprodukten“ [ProgRess II, S. 65].

Man sieht allerdings die Gefahr von regionalen Sättigungseffekten bei den bisherigen Verwertungswegen. „Damit die Sekundärrohstoffe auch zukünftig weitestgehend verwertet werden können und damit Primärrohstoffe und Deponieraum geschont werden, kann es erforderlich sein, weitere Einsatzbereiche zu erschließen, wie zum Beispiel den Einsatz von Recyclinggesteinskörnung im Hochbau“ [ProgRess II, S. 66]. Die Begriffe Up-/Down-Cycling werden in ProgRess II nur im Zusammenhang mit Edelstahl- und Aluminiumschrotten genannt. Diese Begriffe im Zusammenhang mit mineralischen Bau- und Abbruchabfällen zu nennen, dient nicht der Versachlichung des Themas. Die bisherigen Verwertungswege sind in der Graphik des ISTE übersichtlich dargestellt. Seit 2014 läuft ein Verbundforschungsvorhaben des Bundesministeriums für Bildung und Forschung mit dem Titel: „R-Beton – Ressourcen schonender Beton – Werkstoff der nächsten Generation“. Hierbei sollen eben auch

die ökologischen und ökonomischen Kriterien geprüft werden, denn der Einsatz von R-Beton muss auch unter Umweltgesichtspunkten vorteilhaft sein und sich wirtschaftlich darstellen lassen. Das Vorhaben endete am 30. April 2018 - der Schlussbericht liegt noch nicht vor.

**1.1 Definitionen**

**Ressourcenschonend:**  
Die vorhandenen Ressourcen in verantwortungsvoller Weise nutzend [Duden].

**Ressourceneffizienz:**  
Die optimale Ausnutzung von (natürlichen) Ressourcen [Duden].

Natürliche Ressourcen, insbesondere Rohstoffe, sind wesentliche Produktionsfaktoren und damit Grundlage unseres Wohlstandes. Ein schonender und gleichzeitig effizienter Umgang mit Ressourcen wird daher eine Schlüsselkompetenz zukünftiger Gesellschaften sein [BMU-Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit].

**Ressourcenproduktivität:**  
Die umweltfreundliche Vorgehensweise bei der Produktion, basierend auf der Steigerung der Produktivität von Ressourcen, um Abfallstoffe zu reduzieren [Onpulson-Wirtschaftslexikon].

**2 Was will der Bauherr?**

Ein Bauherr möchte im Regelfall ein kostengünstiges, wirtschaftliches und dauerhaftes Gebäude erstellen. Die ökologischen Gesichtspunkte sollten dabei auch eine wesentliche Rolle spielen.

Bislang gab es im gesamten Liefergebiet von perterbeton nur einen Bauherrn, der R-Beton ausschreibt - nämlich die Stadt Karlsruhe.

Die Stadt Karlsruhe möchte das Bauen mit R-Beton aktiv voranbringen - sie hat dies in ihrer Vergabeverordnung (VgV 2016) und in der entsprechenden Vergabedienstanweisung (VergDA 2018) verankert. Daher können neben dem Preis und den Kosten auch qualitative, umweltbezogene oder soziale Zuschlagskriterien berücksichtigt werden. Die Vergabestellen sind verpflichtet, bei Ausschreibungen und Freihändigen Vergaben sowie Teilnahmewettbewerben den Gesichtspunkt der Umweltverträglichkeit nach bestimmten Regeln zu prüfen und zu berücksichtigen.

Die Stadt Karlsruhe schreibt inzwischen gezielt R-Beton für alle städtischen Bauprojekte im Hochbau aus. Erstes Projekt war der Bau der neuen städtischen Hauptfeuerwache ab Sommer 2017 mit ca. 3.600 m<sup>3</sup> R-Beton. Es folgten der Fahrstuhlurm beim alten Bulacher Rathaus 2018 mit 50 m<sup>3</sup> und aktuell die Erweiterung der Draisschule mit 2.000 m<sup>3</sup> R-Beton.



Abb. 1: Massenströme der Steine- und Erdindustrie in Baden-Württemberg

### 3 Was will das Bauunternehmen?

Das Bauunternehmen will ein wirtschaftliches und wettbewerbsfähiges Angebot. Eine flexible Belieferung bei kurzfristigen Abrufen über den ganzen Tag – möglichst 6 Tage in der Woche und im Regelfall zwischen 6:00 und 20:00 Uhr, also einem Zeitkorridor von 14 Stunden, muss gewährleistet sein. Die Bauunternehmung benötigt hohe Stundenleistungen bei großen Bauteilen, wie z. B. Unterwasserbetonagen, Bodenplatten und massiven Decken.

Dabei legt der Kunde größten Wert auf eine gleichbleibend hohe Betonqualität über die gesamte Bauzeit, insbesondere Frischbetoneigenschaften, Verarbeitbarkeit und Pumpbarkeit müssen gewährleistet sein. Der gelieferte Beton muss den geltenden Normen entsprechen sowie fremd- und eigenüberwacht sein. Weiterhin ist eine uneingeschränkte Verwendbarkeit des Betons in allen Bauteilen ein wichtiger Aspekt.

### 4 Was kann ein Transportbetonunternehmen leisten?

#### 4.1 Vorstellung peterbeton

Hierzu möchte ich Ihnen die Firma peterbeton Rudolf Peter GmbH & Co. KG, Kies- und Betonwerke kurz vorstellen:

peterbeton betreibt 2 Kieswerke – ausschließlich für die Versorgung der eigenen Transportbetonwerke – sowie 6 Transportbetonwerke zwischen Karlsruhe-Neureut im Norden und Achern im Süden. Davon haben 4 Transportbetonwerke ihren Standort in Kieswerken – Karlsruhe-Neureut im KW Schempp – Bietigheim im KW Scherttle – Sandweier und Achern in eigenen Kieswerken.

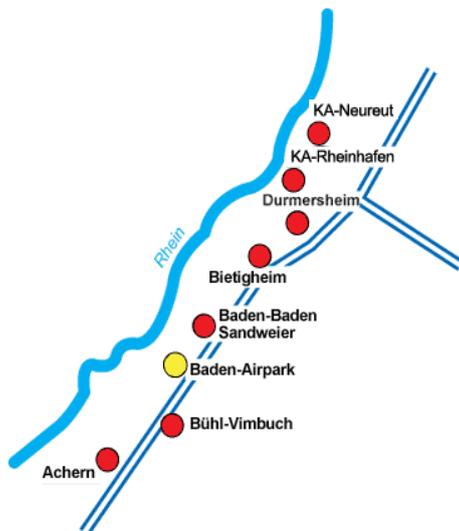


Abb. 2: Baden-Airpark & Durmersheim mögliche Standorte für mobile Anlagen

### 4.2 Ressourceneffizienter Transportbeton

Um das Ressourceneffizienz-Potential des Transportbetons objektiv beurteilen zu können, möchte ich den Transportbeton in seine „Einzelteile“ zerlegen.

1. Transport/Logistik
2. Beton
3. Herstellungsprozess
4. Recycling

#### 4.2.1 Transport/Logistik

- Bei der Beschaffung aller Rohstoffe
- Bei innerbetrieblichen Transporten
- Beim Ausliefern des Betons

Ein Standort im Kieswerk bedeutet für ein Transportbetonwerk eine wirtschaftliche, problemlose und ressourceneffiziente Versorgung mit Gesteinskörnung. Ein Transportbetonwerk in unmittelbarer Nachbarschaft bzw. in wirtschaftlicher Reichweite zu einem RC-Zuschlagsproduzenten sollte RC-Zuschlag für seine Betonproduktion verwenden können. Dabei wäre es natürlich ideal, wenn der RC-Zuschlag für alle Betone zugelassen und ein 100 %-Austausch möglich ist.

Die innerbetrieblichen Transporte können automatisiert, also über Förderbandanlagen und Elevatoren, oder manuell mit Radlader und/oder LKW durchgeführt werden.

Bei der Auslieferung des Betons sind kurze Frachtdistanzen auch sehr wichtig. Ein TB-Werk sollte möglichst verkehrsgünstig zu den Baustellen liegen. Insbesondere die Verkehrsverhältnisse in den Städten erfordern erhöhte Flexibilität bei der Ansetzung der Betonagen außerhalb der Hauptverkehrszeiten, damit die 90 Minuten Verarbeitbarkeitszeit nach DIN eingehalten werden kann.

Generell ist es wichtig, dass ein moderner Fuhrpark mit EURO 5/6 Fahrzeugen und Start-Stop-Funktion des Motors beim Abladen und geschultes Personal eingesetzt wird. Auch der Einsatz von modernen Dispositionssystemen mit Flottenmanagementsystemen ist inzwischen unverzichtbar.

#### 4.2.2 Beton

Zement:

Die Zementindustrie ist weiterhin gefordert, die Herstellungsprozesse noch ressourceneffizienter und CO<sub>2</sub>-minimierter zu gestalten.

Zuschlag:

Als Zuschlag können Primärrohstoffe, wiedergewonnene Gesteinskörnungen und RC-Zuschlag verwendet werden. Als Primärrohstoff wird in der Rheinebene hauptsächlich Kies verwendet, während im Großraum Stuttgart in der Regel Kalksteinsplitt aufgrund der Frachtvorteile zum Einsatz kommen.

**Zusatzstoffe:**

Der am häufigsten eingesetzte Zusatzstoff stellt seit vielen Jahren die Steinkohleflugasche dar. Ein Paradebeispiel für perfekte Wiederverwertung und Ressourceneffizienz. Die positiven Eigenschaften des Abfallstoffes aus der Steinkohleverbrennung für den Beton wurden erkannt, die technologische und normative Verankerung in den Baustoffnormen wurde erreicht und durch die Verwendung von Flugasche im Austausch mit Zement konnte viel CO<sub>2</sub> vermieden werden.

An zweiter Stelle rangiert das Kalksteinmehl. Es kann die Flugasche allerdings nur bei räumlicher Nähe zum Transportbetonwerk ersetzen. Sobald alle Steinkohlekraftwerke in Deutschland vom Netz sind, muss der Zementgehalt wieder deutlich erhöht werden.

**Zusatzmittel:**

Inzwischen werden überwiegend synthetische Rohstoffe verwendet.

**Wasser:**

Durch geschlossene Wasserkreisläufe beim Reinigen der Fahrmischer, der Mischanlagen und Rückbeton- auswaschung, wird der Verbrauch von Frischwasser minimiert. Das Recyclingwasser wird zu 100 % der Betonproduktion zugeführt.

**4.2.3 Herstellungsprozess**

In der Transportbetonindustrie werden inzwischen hauptsächlich moderne Produktionsanlagen unter Berücksichtigung der aktuellen Immissions- und Emissionsvorschriften eingesetzt. Die Abläufe sind wirtschaftlich optimiert. Die Materiallieferungen erfolgen möglichst Just-in-time ohne Zwischenhalden und mit wenig Radladereinsatz. Energiemanagementsysteme wurden eingeführt und neueste Steuerungstechnik kommt zum Einsatz.

**4.2.4 Recycling**

Die Verwertung der Rückbetonmengen stellt für die Transportbetonindustrie eine große Herausforderung dar. Die Fahrmischer müssen insbesondere am Ende eines Arbeitstages bzw. je nach Betongüte auch zwischendurch vollständig entleert und gereinigt werden. Die Betonreste werden entweder ausgewaschen oder als erhärteter Beton gesammelt und anschließend zu einem Baustoffrecycling-Unternehmen transportiert und dort gebrochen und der Verwertung zugeführt.

Bereits 1973 meldete Rudolf Peter die Verwertung von Rückbeton für die Herstellung von GEMO-Steinen zum Patent an. Nach wie vor ist die wirtschaftlichste und ressourcenschonendste Art die Rück- und Restbetonverwertung.

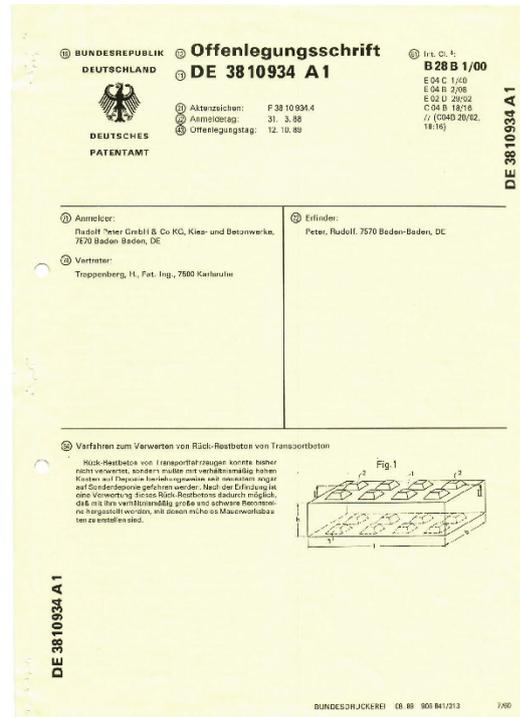


Abb. 3: Patent-Verlängerung 1988

Bei der Betrachtung einer modernen Auswaschanlage wird schnell klar, dass hier viel Strom, Wasser und Zeit gebraucht wird, um den Rück- und Restbeton auszuwaschen - vom Verschleiß ganz abgesehen.



Abb. 4: Recyclinganlage

## 5 Aufgabenstellung für das Transportbetonwerk

Ab sofort soll R-Beton hergestellt werden. Um eine Austauschrate von 25 % - 45 % zu erreichen, werden mindestens 2 Körnungen R-Zuschlag benötigt. Man unterscheidet den R-Zuschlag in Typ I und Typ II. Es sollen weiterhin alle Baustellen mit allen anfallenden Betonen beliefert werden. Und es können bzw. sollen keine Zwischenlager angelegt werden.

### 5.1 RC-Zuschlag

Aktuell gibt es im 100 km Umkreis von Karlsruhe zwei zertifizierte Produzenten/Lieferanten von RC-Zuschlag. Scherer & Kohl GmbH & Co. KG, Ludwigshafen, ~75 km zum Transportbetonwerk Karlsruhe-Rheinhafen und Feess - Heinrich Feeß GmbH & Co. KG, Kirchheim, ~105 km zum TB-Werk KA-Rheinhafen.

Unterschieden wird der RC-Zuschlag in Typ I - Betonsplitt Rb10 - und Typ II - Bauwerkssplitt Rb 30 - wesentlicher Unterschied Anteil Rb - Mauersteine, Ziegel, Kalksandstein, nicht schwimmender Porenbeton.

Bei einer Austauschrate für einen C25/30 XC 4, WF von 45 % RC-Anteil Typ I benötigt man für 1 m<sup>3</sup> Beton 810 kg RC-Zuschlag. Dies ergibt für eine Betonage von 250 m<sup>3</sup> für eine Bodenplatte oder ähnliches 200 to RC-Zuschlag. Dies entspricht 8 Sattelzügen, 6 davon müssen im Idealfall (ohne Zwischenlagerung und Radladereinsatz) innerhalb 4 Stunden just-in-time angeliefert werden.

### 5.2 Konfiguration einer TB-Anlage

Im Regelfall wurden bisher 4 unterschiedliche Kornfraktionen 0-2 / 2-8 / 8-16 / 16-32 verarbeitet - entsprechend benötigte man 4-5 Zuschlagboxen. Für die Produktion von R-Beton benötigt man 1-2 Zuschlagboxen für RC-Körnung - somit ist eine wei-



Abb. 5: Mobile Mischanlage

tere Produktion von „normalem“ Beton nur eingeschränkt möglich. Bei einer Umstellung auf 100 % R-Beton an diesem Produktionstag bräuchte man entsprechend mehr RC-Zuschlag, der allerdings nicht verfügbar ist.

Nach dem Abarbeiten des R-Beton-Tagesauftrages müssen die entsprechenden Zuschlagboxen leergefahren werden. Ein Entleeren der Zuschlagboxen ist im Regelfall nur über die Zuschlagswaage und den Produktionsmischer möglich. Dies bedeutet zusätzlichen Verschleiß, Zeitaufwand und Produktionsausfall von mindestens einer Stunde.

## 6 Lösungsansätze

### 6.1 R-Beton-Team

Die Herstellung und pünktliche Belieferung mit R-Beton erfordert einen wesentlich höheren Abstimmungsbedarf zwischen Baustelle, Transportbetonwerk und RC-Lieferanten. Kurzfristige Abrufe sind in der Regel nicht umsetzbar. Daher empfehlen wir ein R-Beton-Team, analog zum Sichtbeton-Team, in dem sich Bauherr, Bauunternehmen, RC-Lieferant und Transportbetonwerk schon vor der Vergabe der Bau- und Lieferverträge abstimmen und darüber austauschen, was machbar und tatsächlich möglich ist.

Dieses R-Beton-Team muss sich gemeinsam über die anschließenden Fragen verständigen.

### 6.2 Zu klärende Fragen bei R-Beton-Anfragen

1. Wie oft sind während der Bauzeit Betonagen mit R-Beton vorgesehen?
2. Welche Betonmengen und Stundenleistungen werden benötigt?
3. Sind im TB-Werk zusätzliche Dosier- und Lagermöglichkeiten vorhanden?
4. Ist RC-Zuschlag ausreichend verfügbar?
5. Wie weit ist die Transportentfernung zum nächsten leistungsfähigen RC-Zuschlag-Lieferanten?
6. Wie sieht das Logistikkonzept aus?
7. Kann der RC-Zuschlaglieferant die Belieferung über die gesamte Bauzeit mit entsprechendem Material gewährleisten?
8. Wie hoch sind die zusätzlichen Handlingkosten?
9. Wird ein zusätzlicher Radlader benötigt?
10. Ist das entsprechende Personal vorhanden?
11. Besteht die Möglichkeit die sonstige Produktion auf andere Werke umzudisponieren?
12. Wie sieht die sonstige Auftragssituation aus?

## 7 Fazit

Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit beschränken sich nicht nur auf den Zuschlag. Die Gesamtbetrachtung ist wichtig.

Wirtschaftlichkeit schließt Ressourceneffizienz und Ökologie nicht aus.

Für das TB-Werk ist es technisch schwierig, gleichzeitig Beton mit und ohne RC-Zuschlag herzustellen und gleichzeitig die maximale Austauschrate zu erreichen, weil die Anzahl der Zuschlagsboxen im Regelfall nicht ausreicht.

Die Anlagentechnik, die Zuschlagsboxen mit den entsprechenden Waagen und die Steuerung müssen erweitert werden – falls dies überhaupt möglich ist (hohe Investitionen).

RC-Zuschlag wird im Regelfall in Ballungszentren anfallen und sollte auch dort aufbereitet werden.

R-Beton sollte in der Nähe zum RC-Zuschlag hergestellt werden.

Es sollte, ähnlich wie in der Schweiz, generell möglich sein, dem Beton einen geringen Anteil RC-Zuschlag zuzugeben. Somit ist gewährleistet, dass der RC-Zuschlag verarbeitet wird, wenn er zur Verfügung steht. Ein vorgeschriebener Anteil von 25 % und mehr kann schnell dazu führen, dass ein Einsatz von RC-Zuschlag unwirtschaftlich und unökologisch wird.

Insbesondere die bei der Aufbereitung anfallenden Sande müssen auch der Betonproduktion zugeführt werden. Der durch das Brechen des Abbruchmaterials entstehende Brechsand ist ein Produkt, das nach einer Verwendung im Bausektor sucht.

Zentrales Hemmnis bei der Herstellung von Beton mit RC-Zuschlag ist die Rohstoffversorgung der Transportbetonwerke [Florian Knappe, ifeu 19.02.2019].

## Autor

### **Dipl.-Betriebsw. (FH) Wolfgang Hirth**

Peterbeton – Rudolf Peter GmbH & Co.KG,  
Kies- und Betonwerke  
Richard-Haniel-Straße 3  
76532 Baden-Baden

# Chancen und Möglichkeiten des ressourceneffizienten Bauens mit Infraleichtbeton

Alex Hückler

## Zusammenfassung

Die Bedeutung von Energie- und Ressourceneffizienz sowie die damit verbundene Nachhaltigkeit beim Bau und des Betriebs von Gebäuden stehen außer Frage. Eine Möglichkeit, um die Effizienz zu steigern, bieten High-Tech-Baustoffe wie zum Beispiel Infraleichtbeton (engl.: Infra-Lightweight Concrete (ILC)), der lastabtragende und gleichzeitig wärmedämmende Sichtbetonaußenbauteile aus nur einem Werkstoff ermöglicht. Seit 2006 arbeitet das Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Massivbau der TU Berlin gemeinsam mit konstruktiven Ingenieuren, Materialtechnologen, Bauphysikern und Partnern aus der Industrie und Planung daran, den Baustoff zu erforschen, weiterzuentwickeln und in der Praxis einzusetzen.

## 1 Einleitung

Die Trockenrohddichte von konstruktiven (gefügedichten) Leichtbetonen liegt gemäß DIN EN 1992-1-1: Eurocode 2 (EC2) [1] zwischen 800 und 2000 kg/m<sup>3</sup>. Während sehr leichte Poren- und Schaumbetone schon seit Jahrzehnten für Mauerwerk verwendet werden, das nach dem Fügen noch verputzt/geschützt werden muss, wird konstruktiver Leichtbeton mit einer Trockenrohddichte unter 800 kg/m<sup>3</sup> bisher praktisch nicht für großflächige, monolithische tragende Bauteile verwendet. In Anlehnung der Gewichtsgrenzen des EC2 [1] wurde der Begriff Infraleichtbeton [2] eingeführt, da seine Rohdichte unterhalb (lat. = infra) der normalen Rohdichte von Leichtbeton liegt (Abbildung 1). Infraleichtbeton erreicht mittlere Druckfestigkeiten von bis zu  $f_{cm} = 13$  MPa, was nach den Konformitätskriterien einem LC8/9 entspricht [3]. Gleichzeitig lassen sich je nach Festigkeit Werte der Wärmeleitfähigkeit zwischen  $\lambda_{tr} = 0,14$  und  $0,19$  W/(m·K) erreichen, womit sich die Energieeinsparverordnung (EnEV) [4] für ein Gebäude mit ca. 50 bis 60 cm Wandstärke über den „Gebäudenachweis“ einhalten lässt.

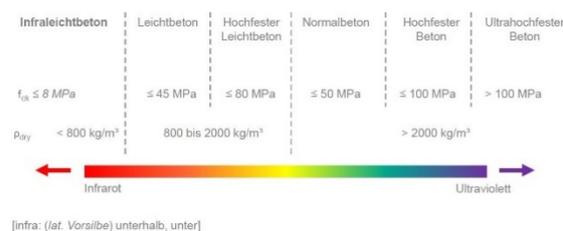


Abb. 1: Betonspektrum

Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit und die ausreichende Druckfestigkeit von Infraleichtbeton können mehrgeschossige Gebäude mit monolithischem Wandaufbau realisiert werden, die ohne Putz und zusätzliche Dämmschicht die aktuellen energetischen Anforderungen einhalten. Die einschalige Sichtbetonbauweise ermöglicht robuste, wenig komplexe und langlebige Konstruktionen, die gleichzeitig ein hohes gestalterisches Potenzial aufweisen und somit einen Beitrag zur Baukultur leisten können. Erste Ökobilanzen [5] zeigen das Potential von Infraleichtbeton, um sich als eine Alternative zur gängigen Bauweise etablieren zu können.

## 2 Stand der Forschung

Leichtbetone, die als tragende Wärmedämmung fungieren – auch Dämmbetone genannt – werden einzeln schon seit Jahren weltweit eingesetzt [6]. Die Namensgebung „Infraleichtbeton“ entstand 2007 im Zuge der beginnenden Forschung an der TU Berlin und der Fertigstellung des ersten Wohnhauses unter diesem Begriff. Für das Wohnhaus (damals beraten von Prof. Hillemeier, TU Berlin und Prof. Thienel UniBw München) kam Infraleichtbeton mit leichter Gesteinskörnung aus Blähton zum Einsatz. Die Weiterentwicklung zu einer ILC-Familie mit Trockenrohddichten zwischen 600 und 800 kg/m<sup>3</sup> führte zu einer umfassenden Untersuchung zum Verbund-, Riss- und Biegetragverhalten mit dem Ergebnis, ILC-Balken bemessen zu können [7].

An der TU Kaiserslautern wurde 2014 ein Experimentalgebäude aus Infraleichtbeton mit einer Trockenrohddichte  $< 700$  kg/m<sup>3</sup> mit Blähglas gebaut.

Die Rezeptur und die Ergebnisse des Bauwerks-Monitoring wurden 2016 von Schulze und Breit [8] veröffentlicht. Callsen und Thienel [9] entwickelten 2016 für die Außenwände eines Einfamilienhauses eine Zusammensetzung basierend auf einem Gemenge aus Blähton und Blähglas. Die Abbildung 2 zeigt die Leistungsfähigkeit verschiedener Infraleichtbetonzusammensetzungen.

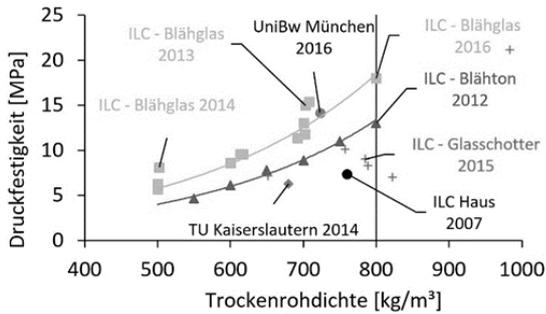


Abb. 2: Forschungsergebnisse verschiedener ILC Zusammensetzungen

An der TU Berlin wurde zusammen mit Prof. Regine Leibinger vom Fachgebiet Baukonstruktion und Entwerfen das Forschungsprojekt Infraleichtbeton im Geschosswohnungsbau (INBIG) bearbeitet [5]. Dabei wurden verschiedene Gebäudetypen, wie Baulückengebäude, Zeilenbau und Punkthaus untersucht und werkstoffgerechte Fenster-, Decken- und Balkontails entwickelt. Abbildung 3 zeigt beispielhaft eine Geschossdecke aus Normalbeton, die direkt an den ILC-Balkon angeschlossen wird, sodass ein thermisch trennendes Element nicht erforderlich ist.

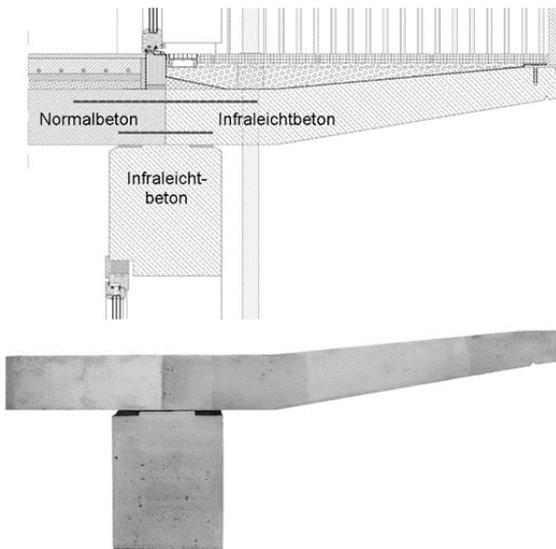


Abb. 3: Anschluss Decke-Wand-Balkon ohne thermische Trennung

Im Zuge des BMBF-Projekts „MultiLC - Multifunktionale Leichtbetonbauteile mit inhomogenen Eigenschaften“ wurden von der TU Berlin Außenbauteile, die wärmen, kühlen, diffusionsoffen sind und Schadstoffe zersetzen, in Kooperation mit verschiedenen Partnern aus der Industrie erforscht. Die entwickelten Fertigteile aus ILC mit einer Wandaktivierung werden von Wasser mit Vorlauftemperaturen zwischen 5 °C und 15 °C in oberflächennahe Kapillarrohrmatten durchströmt. Der „effektive“ U-Wert liegt dabei zwischen  $U_{eff,15^{\circ}C} = 0,12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  und  $U_{eff,5^{\circ}C} = 0,24 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  anstelle des „statischen“ U-Werts ohne Wandaktivierung von  $U_{bem} = 0,38 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Als Wärmequelle kann Grauwasser und/oder Grundwasser eingesetzt werden. In 20 m Tiefe beträgt auf dem Land die Grundwassertemperatur kaum unter 9 °C. Die Effizienz der Wärmedämmung kann so erheblich gesteigert werden und führt zu geringerem Energieverbrauch bzw. geringerem Materialaufwand.

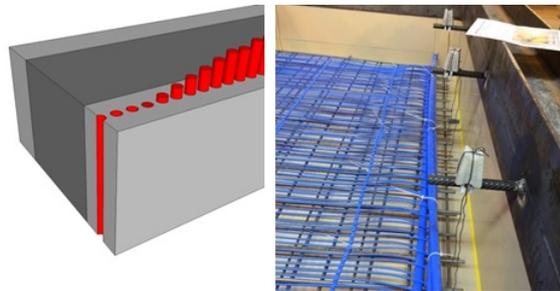


Abb. 4: Dreischichtige Bauteilkonfiguration mit Bauteilaktivierung in der äußeren Lage (links); Einbau der Kapillarrohrmatte auf der Bewehrungslage (rechts) (Quelle: Transsolar Energietechnik)

Gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) wird mit dem Forschungsprojekt ILVO die Anwendung von Fertigteilen aus Infraleichtbeton im Geschosswohnungsbau untersucht. Der besondere Vorzug von Infraleichtbeton ist hierbei, die Möglichkeit des monolithischen Bauens und dem Wegfall komplizierter Schnittstellen mit dem Resultat einer Einheit aus Raum, Konstruktion und Fassade. Dies ermöglicht anstelle einer geschlossenen Bauform eine „poröse“ oder „perforierte“ Bauweise wodurch eine Vielfalt an Wohn- und Nutzungsformen entstehen kann (Abbildung 5). Anhand von Varianten sollen die Vor- und Nachteile der einzelnen Elemente untersucht werden.

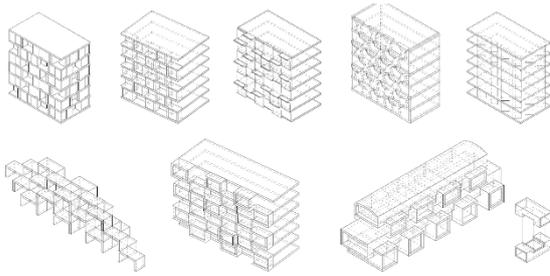


Abb. 5: Vorstudie zu Fertigteilgebäuden aus Infraleichtbeton

### 3 ILC in der Ökobilanz

Eine Sichtbetonwand aus Infraleichtbeton ist trotz höherer Materialkosten über den Lebenszyklus mit einer tragenden Betonwand im Wärmedämmverbundsystem (WDVS) durchaus vergleichbar. In Gegenüberstellung zu deutlich komplexeren doppelwandigen Sichtbetonaufbauten mit Kerndämmung oder Verkleidungen mit (Natur-)Stein ist die Infraleichtbetonwand kostengünstiger. Auch Untersuchungen zur Nachhaltigkeit ergaben, dass das CO<sub>2</sub>-Äquivalent einer Infraleichtbeton-Außenwand über den Lebenszyklus dem einer WDVS-Wand ähnelt. Bei einem Betrachtungszeitraum von 100 Jahren und länger schneiden ILC-Außenwände sogar besser ab. Ein positiver Effekt von ILC, der nicht in der Analyse erfasst wird, ist eine deutlich schnellere Carbonatisierung, weshalb ein Bauteil aus Infraleichtbeton während der Lebensdauer vollständig carbonatisiert und dabei etwa 55 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> der Umwelt entzieht (entspricht ca. 1/3 des entstehenden CO<sub>2</sub> aus der Entsäuerung) [10]. Zwar wird somit eine nichtkorrodierende Bewehrung erforderlich, dafür verringert sich der CO<sub>2</sub>-footprint. Jüngste Forschung beschäftigt sich mit der Recyclefähigkeit. Infraleichtbeton kann gebrochen wieder als leichte Gesteinskörnung eingesetzt werden und kann so in den Lebenskreislauf erneut eintreten.

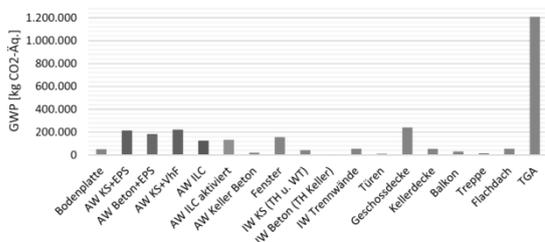


Abb. 6: Global Warming Potential (GWP) über 100 Jahre eines Referenzgebäudes mit verschiedenen Gebäudehüllen im Vergleich

An einem Referenzgebäude mit verschiedenen Gebäudehüllen mit einem U-Wert von  $U = 0,26$  zeigt exemplarisch das Global Warming Potential (GWP) einer Gebäudehülle aus Infraleichtbeton über einen Betrachtungszeitraum von 100 Jahren ein geringeres CO<sub>2</sub>-Äquivalent als gängige Wandaufbauten (Abbildung 6). Das Diagramm in Abbildung 6 zeigt auch, dass das CO<sub>2</sub>-Äquivalent aus dem Gebäudebetrieb (z. B. aus Heizung), dargestellt durch „TGA“, den größten Einfluss hat.

Die aktuell gängigen Ansätze zur Bewertung der Kosten und Nachhaltigkeit scheinen für Infraleichtbeton nicht immer konsequent anwendbar zu sein. Untersuchungen hierzu, wie auch auf anderen Gebieten, werden derzeit in laufenden Forschungsvorhaben durchgeführt.

### 4 Dauerhaftigkeit

Im Beton ist Stahlbewehrung vor Korrosion durch ein alkalisches Milieu (pH-Wert zwischen 12,5 und 13,5), der sog. Passivierung, geschützt. Wasser und Kohlenstoffdioxid bewirken im Beton eine Carbonatisierung, die den Passivierungseffekt ausschaltet und die je nach Betonart und Umwelteinflüssen (Expositions-kategorie) unterschiedlich schnell fortschreitet. Die Carbonatisierungstiefe berechnet sich über das Wurzelzeit-Gesetz [10]

$$y = k \cdot \sqrt{t} \quad (1)$$

mit:

- y Carbonatisierungstiefe [mm]
- k Carbonatisierungskoeffizient [mm/a<sup>0.5</sup>]
- t Betonalter [a]

Der Carbonatisierungskoeffizient k beschreibt den Carbonatisierungsfortschritt eines Betons und beträgt für Normalbeton  $k = 3 \text{ mm/a}^{0.5}$ . D. h. nach 100 Jahren ist die Carbonatisierung 30 mm fortgeschritten. Messungen an der TU Berlin ergaben für ILC  $20 < k < 30 \text{ mm/a}^{0.5}$ , was zu einer Carbonatisierungstiefe von 200 bis 300 mm bei gleichem Betonalter führt. Bei einer silanbasierten Hydrophobierung der Oberfläche reduzierte sich k auf etwa 15 bis 20 mm/a<sup>0.5</sup>. Die Gefahr einer Bewehrungskorrosion ist damit zwar nicht gebannt, aber die Oberfläche wird vor Verwitterung geschützt und netzartige Oberflächenschwindrisse werden verhindert. Beim EFH von 2007 (Abbildung 7) wurde eine solche Hydrophobierung auch eingesetzt. Seither ist die Betonoberfläche in unverändert gutem Zustand. Als Bewehrung wurde hier Stabbewehrung aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) in den ILC-Außenwänden verwendet. Kostengünstiger als GFK und näher an den mechanischen Eigenschaften einer „schwarzen“ (und auch biegbaren) Bewehrung ist verzinkte

Bewehrung. Diese wird bei einem aktuellen Bauvorhaben in Berlin-Lichtenberg, der „Betonoase“ (Abbildung 8), in der ILC-Gebäudehülle verwendet. Die etwas kostenintensivere Alternative wäre Edelstahlbewehrung. Bei nicht-korrodierender Bewehrung ist bei der Bestimmung der Betondeckung deshalb der Verbund maßgebend. Gemäß EC2 [1] ist für Leichtbeton die Mindestbetondeckung zur Sicherstellung des Verbundes, wegen reduzierter Betonzugfestigkeit, um 5 mm zu erhöhen. Dies gilt auch für ILC. Die Mindestwerte zum Schutz vor Korrosion gelten für Normal- und Leichtbeton gleichermaßen, obwohl gezeigt wurde, dass zumindest für einen Leichtbeton mit  $800 \text{ kg/m}^3$  die Carbonatisierungsgeschwindigkeit und somit die Korrosionsgefahr sehr hoch ist. Positiver Effekt der schnellen Carbonatisierung von ILC ist die zuvor beschriebene „Rückbindung“ von etwa  $55 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$  aus der Umwelt.

## 5 Anwendungen

Vor allem in der Schweiz werden schon seit längerem Sichtbetongebäude aus Leichtbeton ohne weitere Wärmedämmung gebaut. Filipaj [6] gibt einen Überblick weltweit realisierter Objekte. Standardwerke für Leichtbeton mit zahlreichen Anwendungsbeispielen, wie von Faust [11] oder das englischsprachige Pendant von Clarke [12], beschreiben vorrangig eher die Technologie, die Herstellung und das Tragverhalten. Mit gängigem Leichtbeton lassen sich allerdings die Anforderungen der EnEV für wirtschaftliche Wandstärken nicht einhalten. Die wenigen bisher gebauten Beispiele und zwei Gebäude, die in Planung bzw. im Bau sind, werden hier vorgestellt.



Abb. 7: Einfamilienhaus aus Infraleichtbeton in Berlin von 2007 (Architekten A. Schlaich und C. Bonnen)

In Berlin-Pankow entstand 2007 das erste Gebäude (Abbildung 7) aus Infraleichtbeton. Hierfür wurden konstruktive Details entwickelt, die den statischen und bauphysikalischen Anforderungen gerecht werden. Die Außenwände des Einfamilienhauses sind aus Infraleichtbeton, während der Kern - Decken und Innenwände - aus Normalbeton ist. Der verwendete



Abb. 8: Jugendfreizeiteinrichtung „Betonoase“ aus Infraleichtbeton von 2018 (Gruber und Popp Architekten)

Infraleichtbeton erreichte eine mittlere Druckfestigkeit von  $f_{ilcm} = 7,8 \text{ MPa}$  bei einer Trockenrohichte von  $\rho_{tr} = 760 \text{ kg/m}^3$ . Aus der gemessenen Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{10, tr} = 0,181 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  wurde bei 50 cm Wandstärke ein U-Wert von  $0,34 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$  ermittelt, mit dem die damalige EnEV 2006 [4] erfüllt werden konnte [2].

Die Jugendfreizeiteinrichtung (JFE) „Betonoase“ ist ein Bauvorhaben in Berlin-Lichtenberg mit Außenwänden aus Infraleichtbeton (Abbildung 8). Im Jahr 2016 setzte sich der Entwurf der Architekten Gruber+Popp BDA gegen fünf Konkurrenten durch. Im Zuge der bauaufsichtlichen Genehmigung wurde zur Erteilung einer ZiE ein Bemessungskonzept des nicht-genormten ILCs vorgelegt und entsprechende Bauteilversuche durchgeführt. Die biegebeanspruchten Bauteile (Fensterstürze und Vordächer) wurden auf Grundlage der Forschungsergebnisse aus 2016 [7] bemessen. Die durchgeführten Bauteilversuche an der TU Berlin bestätigten die Berechnungen und führten zur Erteilung der ZiE. Die Eröffnung der Betonoase erfolgte im Dezember 2018.

Die Berliner Wohnungsbaugesellschaft Mitte (wbm GmbH) plant den Bau eines Punkthochhauses an der Mollstraße/Ecke Barnimstraße in Berlin-Friedrichshain. Das Projekt ist aus dem Ideenwettbewerb „urban living“ zur Nachverdichtung innerstädtischer Wohnquartiere hervorgegangen. Der Beitrag von Barkow Leibinger Architekten mit schlaich bergemann partner und Transsolar wurde zur Weiterverfolgung und Prüfung der Realisierbarkeit empfohlen. Der Entwurf im Wettbewerb sah ein 16-geschossiges Wohnhochhaus mit Außenwänden aus Infraleichtbeton (Abbildung 9) auf dem Wettbewerbsgrundstück an der Karl-Marx-Allee vor. Im Zuge der Weiterverfolgung des Projekts entschied sich die wbm für die Umsetzung mit 12 Geschossen am Standort Mollstraße in Friedrichshain.



Abb. 9: Wettbewerbsentwurf von Barkow Leibinger Architekten mit schlaich bergemann partner und Transsolar

Ein Hochregallager der ehemaligen Reemtsma-Zigarettenfabrik in Berlin-Schmargendorf soll in ein modernes Co-Working-Gebäude umgebaut werden. Dabei finden wesentliche Eingriffe und Änderungen der bestehenden Stahlbetonstruktur statt. Die neuen auskragenden Boxen an der Nordfassade sollen aus Infrleichtbeton hergestellt werden.



Abb. 10: Atelierhaus Schmargendorf (Axthelm Rolvien Architekten)

Für das Studio Albert Oehlen am Standort Weidingen soll ein monolithisches Sichtbetongebäude aus Infrleichtbeton mit einer geneigten segmentierten Glasfassade mit Zugbändern aus carbonfaserverstärktem Kunststoff entstehen.



Abb. 11: Atelier Albert Oehlen (Paloma Lasso de la Vega)

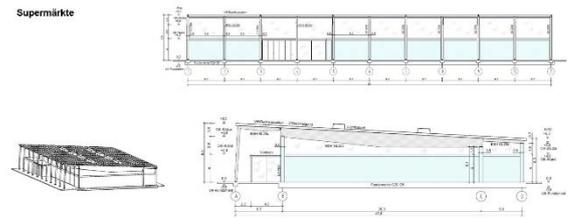


Abb. 12: Supermarkt-Halle mit Außenwänden aus Infrleichtbeton

Sowohl Infrleichtbeton als auch Zugglieder aus carbonfaserverstärktem Kunststoff bieten enormes Innovationspotential, sind jedoch bisher bauaufsichtlich nicht geregelt. Jede Innovation ist mit einem Risiko behaftet. Um dieses Risiko zu minimieren, wurde das Büro schlaich bergemann partner vom Bauherrn beauftragt, Machbarkeit, Genehmigungsfähigkeit und Kostenrahmen zu untersuchen.

Die Anwendungsgebiete für Infrleichtbeton sind weitreichend. Auch eine Umsetzung von Infrleichtbeton außerhalb des (Geschoss-)Wohnungsbaus ist möglich. Umfassende Untersuchungen haben eine Anwendbarkeit für Supermärkte gezeigt, sodass nun eine namenhafte Supermarktkette einen ersten Markt in Form eines Hallentragwerkes mit Außenwänden aus Infrleichtbeton eröffnen möchte.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die zahlreichen Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet von Hochleistungsleichtbetonen wie dem Infrleichtbeton sowie die große Nachfrage von Bauherrn und Architekten verdeutlichen das Potenzial dieser monolithischen Bauweise. Zu ILC liegen nach mehr als 10 Jahren der Forschung umfassende Kenntnisse vor, die das Material reif für die Praxis machen [3]. Um die praktische Umsetzung zu unterstützen wurde 2018 ein Handbuch veröffentlicht [13], das Bauherrn, Planern und Bauunternehmen als Leitfaden zum Umgang mit ILC dienen soll. Die Weiterentwicklung von Infrleichtbeton wird an der TU Berlin stetig vorangetrieben. Neben den genannten Aktivitäten im Bereich multifunktionaler, inhomogener Leichtbetonbauteile (MultiLC) wird es u. a. Aufgabe eines Ende 2018 gestarteten Forschungsprojekts sein, den Infrleichtbeton mit den Vorteilen der seriellen Vorfertigung zu verbinden. Das Projekt wird von der HOWOGE Wohnungsbaugesellschaft, der TU Berlin, der Tinglev Elementfabrik und Transsolar Energietechnik durchgeführt und von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert. Geplant ist die Entwicklung von ILC-Fertigteilen, die ähnlich einem Baukastensystem für die Erstellung verschiedener Wohnungsbautypen genutzt werden können. Nach Abschluss des Projekts ist die Umsetzung in einem konkreten Bauvorhaben der HOWOGE geplant.

## 7 Literatur

- [1] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010. Berlin: Beuth Verlag (31.01.2011).
- [2] Schlaich, M., Zareef, M. E.: Infraleichtbeton. Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008), S. 175-182.
- [3] Schlaich, M., Hückler, A.: Infraleichtbeton. Reif für die Praxis. Beton- und Stahlbetonbau 112 (2017), S. 772-783.
- [4] Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden. EnEV 2014 2014.
- [5] Leibinger, R., Schlaich, M., Lösch, C., Rieseberg, P., Ballestrem, M.: Infraleichtbeton im Geschosswohnungsbau (INBIG). Abschlussbericht. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2017.
- [6] Filipaj, P.: Architektonisches Potenzial von Dämmbeton. Zürich: vdf-Hochschulverl 2010.
- [7] Hückler, A.: Trag- und Verformungsverhalten von biegebeanspruchten Bauteilen aus Infraleichtbeton (ILC). Dissertation. Göttingen: Sierke Verlag 2016.
- [8] Schulze, J., Breit, W.: Experimentalgebäude aus Infraleichtbeton - monolithisch und hochwärmedämmend. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016), S. 377-384.
- [9] Callsen, B., Thienel, K.-C.: Leichter Wohnungsbau. Besondere Aspekte bei der Entwicklung und Ausführung eines hochwärmedämmenden Hochleistungs-Leichtbetons mit sehr niedriger Betonrohddichte. Beton (2017), S. 128-134.
- [10] Stark, J., Wicht, B.: Dauerhaftigkeit von Beton. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2013.
- [11] Faust, T.: Leichtbeton im konstruktiven Ingenieurbau. Berlin: Ernst 2003.
- [12] Clarke, J. L.: Structural lightweight aggregate concrete. London: Blackie Chapman & Hall 1993.
- [13] Lösch, C., Rieseberg, P.: Infraleichtbeton. Entwurf, Konstruktion, Bau. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2018.

## Autor

### **Dr.-Ing. Alex Hückler**

Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren -  
Massivbau, Technische Universität Berlin  
Gustav-Meyer-Allee 25  
13355 Berlin





# Programm des Symposiums

14. März 2019, Tulla Hörsaal, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

8:15 Uhr	<b>Anmeldung   Kaffee</b>	13:30 Uhr	<b>Konzepte zur Herstellung von ressourceneffizienten Betonen am Beispiel der Granulometrie</b> Dipl.-Ing. Jack Moffatt Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
8:45 Uhr	<b>Begrüßung   Moderation</b> Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  Dr.-Ing. Michael Aufrecht Verband Deutscher Betoningenieure e. V.  Dipl. Wirtsch.-Ing. Ulrich Nolting InformationsZentrum Beton GmbH	14:00 Uhr	<b>Ressourceneffizientes Bauen mit Beton unter besonderer Berücksichtigung der Methode der Lean Construction</b> Dominik Steuer M.Sc. Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
9:00 Uhr	<b>Aspekte des Landes Baden-Württemberg</b> Dr. Gerhard Scheuermann Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft	14:30 Uhr	<b>Kaffeepause</b>
09:30 Uhr	<b>Industrielle Ressourcenstrategien – Ideen aus dem THINKTANK am KIT</b> Prof. Dr. Thomas Hirth Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	15:00 Uhr	<b>Neue Dauerhaftigkeitskonzepte in der Betonnormung – Potenziale für Ressourceneffizienz?</b> Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher Ruhr-Universität Bochum
10:00 Uhr	<b>Kaffeepause</b>	15:30 Uhr	<b>RC-Beton aus der Sicht des Transportbetonproduzenten</b> Dipl.-Betriebsw. (FH) Wolfgang Hirth Peterbeton – Rudolf Peter GmbH & Co. KG, Kies- und Betonwerke
10:30 Uhr	<b>Bewertung der regionalen Rohstoffverfügbarkeit für die Herstellung von Beton</b> Dipl.-Ing. Lothar Benzel Industrieverband Steine und Erden Baden-Württemberg e.V.	16:00 Uhr	<b>Chancen und Möglichkeiten des ressourceneffizienten Bauens mit Infraleichtbeton</b> Dr.-Ing. Alex Hückler Technische Universität Berlin
11:00 Uhr	<b>Bewertung der überregionalen Rohstoffverfügbarkeit für die Herstellung von Beton</b> Prof. Dr. Christoph Hilgers Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	16:30 Uhr	<b>Zusammenfassung   Schlusswort</b>  Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  Dr.-Ing. Michael Aufrecht Verband Deutscher Betoningenieure e. V.  Dipl. Wirtsch.-Ing. Ulrich Nolting InformationsZentrum Beton GmbH
11:30 Uhr	<b>Konzepte zur Herstellung von ressourceneffizienten Betonen am Beispiel Zement</b> Dr.-Ing. Christoph Müller VDZ gGmbH	16:40 Uhr	<b>Umtrunk   Imbiss</b>
12:00 Uhr	<b>Mittagspause</b>		



## **Autorenverzeichnis**

### **15. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung**

„Ressourceneffizienter Beton Zukunftsstrategien für Baustoffe und Baupraxis“

#### **Dr. Ivy Becker**

Institut für Angewandte Geowissenschaften, Karlsruher Institut für Technologie (KIT),  
Adenauerring 20a, 76131 Karlsruhe, THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien Baden-Württemberg

#### **Dipl.-Ing. Lothar Benzel**

Industrieverband Steine und Erden Baden Württemberg e.V., Gerhard-Koch-Straße 2,  
73760 Ostfildern

#### **Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher**

Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstraße 150, 44801 Bochum

#### **Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Shervin Hagsheno**

Institut für Technologie und Management im Baubetrieb, Karlsruher Institut für Technologie (KIT),  
Gotthard-Franz-Str. 3, 76131 Karlsruhe

#### **Prof. Dr.-Ing. Michael Haist**

Institut für Baustoffe, Leibniz Universität Hannover, Appelstraße 9A, 30167 Hannover

#### **Prof. Dr. Christoph Hilgers**

Institut für Angewandte Geowissenschaften, Karlsruher Institut für Technologie (KIT),  
Adenauerring 20a, 76131 Karlsruhe, THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien Baden-Württemberg  
RohstoffWissen e. V. - Initiative zur Förderung der Rohstoffkultur, Lessenicher Straße 1, 53123 Bonn

#### **Prof. Dr. Thomas Hirth**

Präsidium des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe

#### **Dipl.-Betriebsw. (FH) Wolfgang Hirth**

Peterbeton - Rudolf Peter GmbH & Co. KG, Kies- und Betonwerke,  
Richard-Haniel-Straße 3, 76532 Baden-Baden

#### **Dr.-Ing. Alex Hückler**

Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren - Massivbau, Technische Universität Berlin,  
Gustav-Meyer-Allee 25, 13355 Berlin

#### **Dipl.-Ing. Jack Moffatt**

Institut für Baustoffe, Leibniz Universität Hannover, Appelstraße 9A, 30167 Hannover

#### **Dr.-Ing. Christoph Müller**

VDZ gGmbH, Tannenstr. 2, 40476 Düsseldorf

#### **Svenja Oprach, M.Sc.**

Institut für Technologie und Management im Baubetrieb, Karlsruher Institut für Technologie (KIT),  
Gotthard-Franz-Str. 3, 76131 Karlsruhe

#### **Dr. Gerhard Scheuermann**

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden Württemberg,  
Kernerplatz 9, 70182 Stuttgart

#### **Dominik Steuer, M.Sc.**

Institut für Technologie und Management im Baubetrieb, Karlsruher Institut für Technologie (KIT),  
Gotthard-Franz-Str. 3, 76131 Karlsruhe



# Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung

Themen vergangener Symposien (2004-2018)



1. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung  
**Instandsetzung bedeutsamer Betonbauten der Moderne in Deutschland**  
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Vogel, M. Haist  
ISBN 978-86644-098-2



2. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung  
**Sichtbeton – Planen, Herstellen, Beurteilen**  
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist  
ISBN 3-937300-43-0



3. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung  
**Innovationen in der Betonbautechnik**  
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist  
ISBN 3-86644-008-1



4. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung  
**Industrieböden aus Beton**  
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist  
ISBN 978-3-86644-120-0



5. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung  
**Betonbauwerke im Untergrund – Infrastruktur für die Zukunft**  
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist  
ISBN 978-3-86644-214-6



6. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung  
**Dauerhafter Beton – Grundlagen, Planung und Ausführung bei Frost- und Frost-Taumittel-Beanspruchung**  
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist  
ISBN 978-3-86644-341-9



7. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung  
**Beherrschung von Rissen in Beton**  
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist  
ISBN 978-3-86644-487-4

bitte wenden



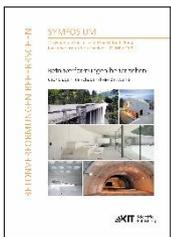
8. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung  
**Schutz und Widerstand durch Betonbauwerke bei chemischen Angriff**  
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist  
ISBN 978-3-86644-654-0



9. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung  
**Nachhaltiger Beton – Werkstoff, Konstruktion und Nutzung**  
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist, M. Kromer  
ISBN 978-3-86644-820-9



10. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung  
**Gestalteter Beton – Konstruieren in Einklang von Form und Funktion**  
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist, M. Kromer  
ISBN 978-3-73150-179-4



11. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung  
**Betonverformungen beherrschen – Grundlagen für schadensfreie Bauwerke**  
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist, M. Kromer  
ISBN 978-3-7315-0343-9



12. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung  
**Bauwerkserhaltung – Instandsetzung im Beton- und Stahlbetonbau**  
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist  
ISBN 978-3-7315-0474-0



13. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung  
**Sicherheit durch Beton – Schutz vor Explosion, Brand und Risikostoffen**  
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, J. Link  
ISBN 978-3-7315-0629-4



14. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung  
**Betone der Zukunft – Herausforderungen und Chancen**  
Hrsg. U. Nolting, F. Dehn, J. Link  
ISBN 978-3-7315-0767-3

Alle Bände sind kostenfrei als Download bei **KIT Scientific Publishing** (<http://www.ksp.kit.edu>) oder für einen Unkostenbeitrag im Buchhandel erhältlich.



Mit der wirtschaftlichen Lage der Bauindustrie geht auch der notwendige Bedarf an Baustoffen einher. Der steigenden Nachfrage bei Baustoffen, wie dem Beton, steht zurzeit eine Verknappung der regionalen Rohstoffverfügbarkeit gegenüber. Um dem steigenden Bedarf im Betonbau gerecht zu werden, sind Lösungen für einen ressourceneffizienteren Beton erforderlich. Mit dem effizienten Einsatz von Baurohstoffen kann die Nachhaltigkeit mit einer ökonomischen Effizienz kombiniert werden. Eine nachhaltige Nutzung von Bauwerken sollte bereits beim Einsatz der Baurohstoffe beginnen. Zielsetzung des 15. Symposiums Baustoffe und Bauwerks-erhaltung ist es, Ihnen einen Überblick über diese Entwicklungen zu geben und sie hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die zukünftige Betontechnologie sowie dem zukünftigen Bauen insgesamt zu bewerten.

Das Programm der Veranstaltung beginnt mit einer politischen Bewertung des ressourceneffizienten Betonbaus sowie zukünftigen politischen Strategien. Eine Beurteilung erfolgt sowohl auf regionaler als auch auf internationaler Basis. Hierbei wird mit dem THINKTANK „Industrielle Ressourcenstrategien“ eine Kombination aus wissenschaftlichen und industriellen Aspekten vorgestellt. Das Potential einer ökologischeren und ökonomischeren Betonbauweise wird im dritten Themenblock adressiert und zeigt Veränderungen der Zementzusammensetzung und der Beton-technologie für nachhaltige Lösungen auf. Die Umsetzung wird am Beispiel der Lean Construction Bauweise ausgeführt. Die baupraktische Umsetzung wird anhand von Anpassungen im Regelwerk sowie an Praxisbeispielen vorgestellt.