

Sand und Kies, Kalkstein und Gips

Geologische- und STEEPLE-Aspekte zur überregionalen Verfügbarkeit von Rohstoffen zur Herstellung von Beton

Christoph Hilgers, Ivy Becker und Frank Dehn, Karlsruhe

Die weitere Zunahme der Weltbevölkerung und des Wohlstands wird bis zum Jahr 2060 zu einer Verdoppelung der Rohstoffexploration auf mindestens 86 Gt führen. Recycling allein wird den globalen Bedarf nicht decken können. Nutzungskonflikte können jedoch auch zukünftig verhindert werden, weil Baurohstoffe geologisch in ausreichender Menge verfügbar sind. Allerdings wird die Verfügbarkeit von qualitativ hochwertigem Kalkstein, Sand und Kies sowie Gips und Anhydrit für die Betonherstellung durch den anthropogenen Druck, die regionale Verteilung, politische, ökonomische, sozial-ethische, technologische, Umwelt und gesetzliche Aspekte begrenzt. Der Rückgang der Schwerindustrie und der Kohleverstromung in Deutschland führt zu geringeren verfügbaren Mengen an Hüttensand, Flugasche und REA-Gips. Deren Import, Substitution und neue Lagerstätten sind zur Deckung des Bedarfs der Bauindustrie notwendig. Der Anteil an R- (recycling) und M- (manufactured) Baustoffen kann erhöht werden, wenn Innovationen eine qualitativ hochwertige Sortierung gewährleisten. Der Megatrend Digitalisierung ermöglicht hierbei Effizienzsteigerungen in der Rohstoffgewinnung, der Bauindustrie, dem Recycling und an den Schnittstellen zu den Behörden. Die heimische Industrie kann bei geeigneten Randbedingungen auch mittelfristig den Rohstoffbedarf decken, globalem Protektionismus entgegenwirken und die Versorgungssicherheit gewährleisten. Eine attraktive und gesellschaftlich akzeptierte Rohstoffindustrie bündelt technisches Wissen und Innovation einer vertikalen Wertschöpfungskette bei Exploration, Produktion und Recycling. Langfristige Genehmigungsprozesse, unterschiedliche Nutzungsinteressen und die öffentliche Wahrnehmung erschweren die unternehmerische Tätigkeit und Ausbildung in der Rohstoffexploration im Rohstoffland Deutschland. Damit gehen technisches Wissen und Innovationskraft sukzessive verloren.

1 Einleitung

Beton ist der weltweit vorwiegend verwendete Baustoff. Er wird aus Wasser, Gesteinskörnung, Zement und ggf. Zusatzstoffen (z.B. Flugasche) sowie Zusatzmitteln hergestellt. Für die Zementherstellung werden Kalkstein, Ton, Mergel, Sand sowie weitere Stoffe wie z.B. Gips, Hüttensande, natürliche Puzzolane und Flugaschen eingesetzt [1].

Die wachsende Weltbevölkerung und deren zunehmender ökonomischer Wohlstand haben einen weiterhin wachsenden Energie- und Rohstoffverbrauch zur Folge [2]. Von einem konstanten Rohstoffverbrauch oder einer Kreislaufwirtschaft ist die globale Ökonomie noch weit entfernt [3]. Vielmehr nimmt die globale Materialeffizienz seit dem Wirtschaftsaufstieg der Schwellenländer, insbesondere Chinas, und aufgrund der Produktionsverlagerung aus materialeffizienten Ländern wie Deutschland, Japan oder Südkorea in weniger materialeffiziente Ökonomien wie China, Indien und anderen asiatischen Ländern seit der Jahrtausendwende ab [4, 5]. Zudem führt

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

Die Autoren:

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Christoph Hilgers studierte Geologie und Gesteinsmechanik an der RWTH Aachen und am Imperial College London. Er ist Inhaber des Lehrstuhls für Strukturgeologie und geschäftsführender Direktor des Instituts für Angewandte Geowissenschaften (AGW) am KIT. Professor Hilgers ist Mitglied des ThinkTanks Innovative Ressourcenstrategien am KIT und weiterer nationaler und internationaler Gremien im Bereich mineralische und Energie-Rohstoffe.

Dr. Ivy Becker studierte Angewandte Geowissenschaften mit dem Schwerpunkt Energy and Mineral Resources an der RWTH Aachen. Ihre Promotion schloss sie 2018 am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) in Zusammenarbeit mit

Bei der Bewertung der Rohstoffverfügbarkeit müssen neben der geologischen Verfügbarkeit der Massenrohstoffe für die Betonherstellung auch andere Faktoren berücksichtigt werden. In diesem Beitrag

der Rohstoffindustrie ab. Nach ihrer Tätigkeit im ThinkTank Industrielle Ressourcenstrategien am KIT ist sie nun als Senior Geologin in der Energieindustrie tätig.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn studierte Bauingenieurwesen an der Universität Karlsruhe (TH) und promovierte an der Universität Leipzig. Er ist Inhaber des Lehrstuhls für Baustoffe und Betonbau am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IMB) sowie Direktor der Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (MPA) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Professor Dehn ist Mitglied in nationalen und internationalen technisch-wissenschaftlichen Gremien und Sachverständigenausschüssen des Betonbaus.

werden ausgewählte Aspekte des globalen und nationalen Bedarfs der Massenrohstoffe Sand und Kies, Kalkstein und Gips für die Betonherstellung zusammengetragen. Es wird an Beispielen aufgezeigt, wie sich die quantitative und qualitative Verfügbarkeit dieser Massenrohstoffe an der Schnittstelle Geologie, Technologie und Politik ändert. Hierzu werden unterschiedliche Einflussfaktoren anhand der so genannten STEEPLE-Analyse dargestellt [6]. Dazu werden neben den naturwissenschaftlichen Aspekten einige ausgewählte soziokulturelle (S = social), technologische (T=technological), ökonomische (E=economic), ethische (E=ethical), politische (P=political), rechtliche (L=legal) und ökologische (E=environmental) Aspekte adressiert, um weitere (Risiko-) Faktoren bei der Rohstoffverfügbarkeit einzubeziehen. Der Beitrag erhebt aufgrund der umfassenden Thematik keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern will einen integrativen Ein- und Überblick in das komplexe Themengebiet der Massenrohstoffe für die Betonherstellung geben.

2 Reserven, Ressourcen, Geopotenzial

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. Bei höheren Preisen und technischen Innovationen werden ungenutzte, bekannte Lagerstätten rentabel und somit die Reserven größer. Entsprechend ändern sich die Volumina der Ressourcen. Ressourcen bezeichnen die bekannten Lagerstätten, die zum Teil noch nicht geologisch voll erfasst sind und die nach heutiger Technik (noch) nicht wirtschaftlich abgebaut werden können.

Neben den Reserven und Ressourcen ist das Geopotenzial eine wichtige, aber schlecht bewertbare Kenngröße. Das Geopotenzial sind die Lagerstätten, die derzeit noch unbekannt sind, und durch neue Explorationsaktivitäten und neue Technologien entdeckt werden (z.B. [7]). Zahlrei-

che Gebiete der Erde sind noch nicht oder nicht nach neuesten Standards exploriert und daher das Lagerstättenpotenzial nicht vollständig bekannt. Dies beinhaltet sowohl kontinentale als auch marine Lagerstättenpotenziale. Durch die Exploration unbekannter Gebiete und die neue Bewertung bekannter Gebiete mit neuesten Technologien werden auch zukünftig neue Lagerstätten erkannt und als neue Ressourcen und Reserven erfasst. Das Rohstoffland Deutschland liegt bei der globalen Länderbewertung aller Rohstoffe im oberen Mittelfeld auf Rang 16 ([8], Stand 2010). 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 werden der Bedarf und die zugrundeliegenden Volumina der geologischen Verfügbarkeit dargestellt.

3 Bedarf

3.1 Per Capita Bedarf global

Der Rohstoffverbrauch steigt mit der seit 1970 etwa verdoppelten Weltbevölkerung von derzeit 7,7 Mrd. Menschen und mit einer jährlichen Zunahme von ca. 83 Mio. Menschen, was in etwa der Bevölkerung Deutschlands entspricht [9], kontinuierlich an (Bild 1). Die globale Bevölkerungszunahme verringerte sich von 2,1 % im Jahr 1969 auf 1,2 % in 2017; dennoch wird sich das nahezu lineare Wachstum zunächst weiter fortsetzen [9, 10, 11]. Die Abnahme der Fruchtbarkeitsrate seit 1970 auf global derzeit 2,5 Kindern pro Frau lässt auf eine sinkende Zunahme der Weltbevölkerung und auf eine Stabilisierung bei 10 Mrd. bis 11 Mrd. im Jahr 2100 schließen [9, 12, 13] (Bild 1).

Der durchschnittliche globale Wohlstand steigt mit derzeit 3,2 % (2017, [14], Bild 2a) stärker als die Weltbevölkerung (1,2 %) und geht mit einem globalen, steigenden Rohstoffverbrauch einher. Die Verteilung bleibt mit einem BIP-Anteil von 74 % in den OECD-Ländern, die aber nur einen Bevölkerungsanteil von 18 % zu verzeich-

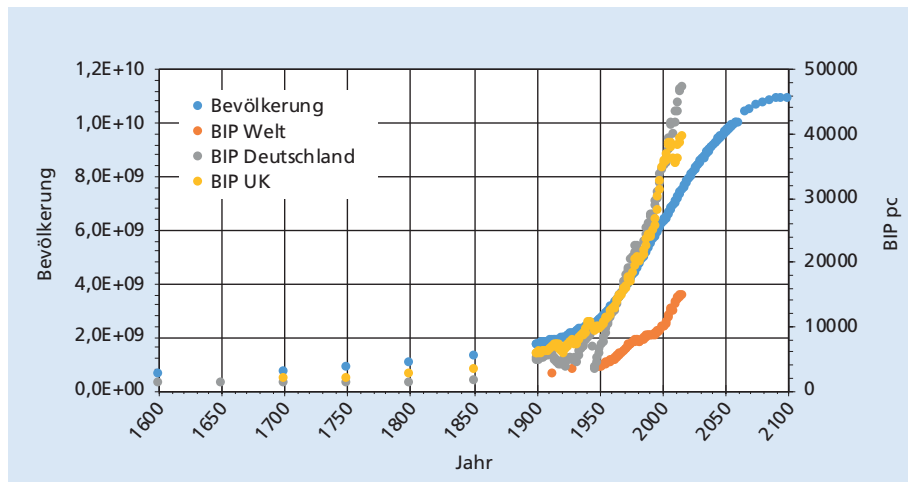


Bild 1: Entwicklung der Bevölkerung und des Bruttoinlandsprodukts (in US\$ pro Kopf) seit dem Mittelalter [10, 16, 17]. Erst ab 1650 kann die wirtschaftliche Entwicklung sich von der Bevölkerungszahl mit einem Wachstum von Bevölkerung und Wachstum entkoppeln [10]. Der Median der UN Prognosen sagt eine Stabilisierung der Weltbevölkerung bei 10 Mrd. bis 11 Mrd. Personen voraus.

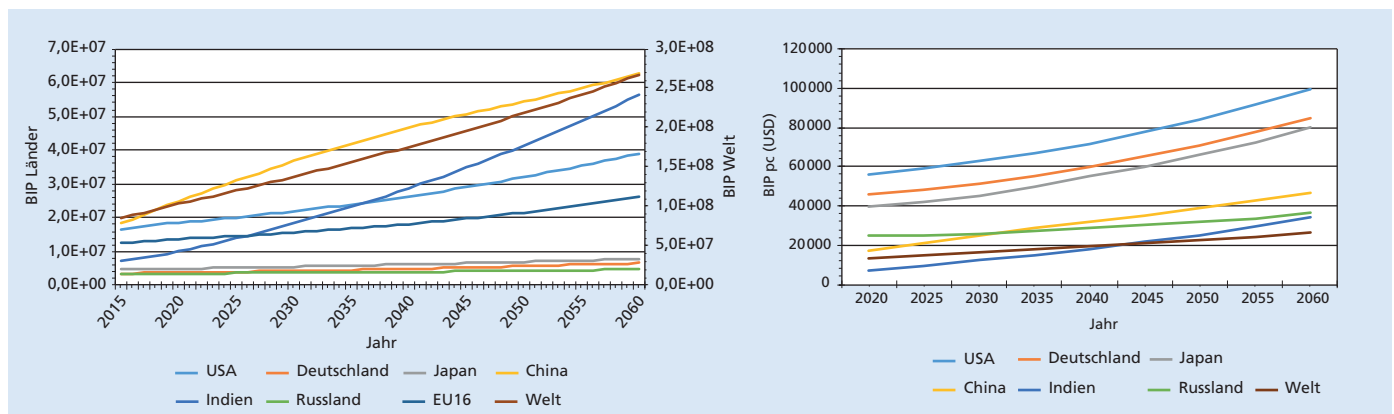


Bild 2: Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts bis 2060 ([16], in US\$ bei konstanten Preisen und PPP, Stand 2010). a) Nach BIP (Kaufkraft/PPP) hat China die USA als wirtschaftsstärkstes Land abgelöst, Indien wird in ca. 15 Jahren folgen. Die Steigerung des BIP in Deutschland/Europa, Japan und Russland bleibt gering. b) Das BIP pro Kopf (als Quotient von BIP s.o. und UN Weltbevölkerungsprognose (Median)) entwickelt sich in China und Indien stärker als der Weltdurchschnitt, die Industrieländer USA, Deutschland und Japan können ihren Vorteil in der Produktivität ausbauen

nen haben, ungleich (Stand 2010, [12]). Das globale per Capita-Wachstum der Länder mit unterem und mittlerem Einkommen ist höher (2,3 % und 3,5 %) als das der Länder mit hohem Einkommen (1,7 %) [14, 15] (Bild 2).

Krausmann et al. [19] differenzieren den Rohstoffverbrauch und zeigen für den Zeitraum 1973 bis 2002, dass der Pro-Kopf-Verbrauch von Biomasse sank (1,2 %), fossile Energien konstant blieben (1,4 %), aber die Erze und Industriemineralien (2,1 %) und vor allem Baurohstoffe mit 2,4 %/a (3,5 t/a pro Kopf) stärker als die Weltbevölkerung angestiegen sind. Vor allem durch das wirtschaftliche Wachstum Chinas und anderer Schwellenländer liegt seit 2002 der Rohstoffverbrauch 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 [20]. Während das globale BIP sich bis 2060 verdreifachen wird, wird der Materialverbrauch relativ entkoppelt und steigt im Bereich mineralischer Rohstoffe von 9,2 Gt (1970, [21]) auf 86 Gt im Jahr 2060 (73 Gt in 2050, Baseline-Szenario [15]).

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, [15]) auf 86 Mrd. t (2060) aus [15]. Die UNEP [21] berechnen einen Bedarf von 105 Gt (Szenario wie gegenwärtiger Trend) für 2050 [15]. Dabei hat China den global höchsten Verbrauch im Baustoffsektor mit mehr als 15 t pro Kopf [15]. Die Entkopplung des erwarteten globalen Wirtschaftswachstums (+224 %) vom Rohstoffverbrauch (+97 %) bleibt mit einem absoluten Anstieg des Rohstoffverbrauchs nur relativ.

Angaben zu Produktion, Reserven und Ressourcen von Rohstoffen im Baustoffsektor sind in vielen Ländern nicht richtig

erfasst und großen Unsicherheiten unterworfen (z.B. [19, 20]). So wird beispielsweise die Produktion von Gips in China, dem mit Abstand größten Massenrohstoffproduzenten, innerhalb eines Jahres mit 15,5 Mio. t ([22], Stand 2017) und 130 Mio. t ([23], Stand 2016) 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 [22]).

3.2 Gips

Die kontinuierlich steigende globale Produktion von Gips beträgt 260 Mio. t im Jahr, wovon etwa 50 % in China gewonnen werden ([23], Stand 2017) (Bild 3). An globalen bekannten Reserven werden mehr als 1,8 Mrd. t angenommen ([23], Stand 2017), die globalen Ressourcen sind groß und nicht detailliert erfasst. In Deutschland werden ca. 4 Mio. t an Gips und Anhydrit pro Jahr abgebaut [24], davon kommen über 1 Mio. t/a aus 17 Betrieben in Baden-Württemberg [25].

Neben natürlichen Lagerstätten wird ein großer Anteil von Gips aus Industrieabfällen, insbesondere durch die Rauchgasentschwefelung (REA-Gips) in Kohlekraftwerken gewonnen. Der Anteil synthetischen Gipses am Bedarf beträgt in den USA ca. 50 % [23], in Deutschland werden 6,7 Mio. t/a REA-Gips produziert [26]. In Deutschland werden bei der Zementherstellung etwa 1,7 Mio. t Gips und Anhydrit als Erstarrungsregler eingesetzt, wovon knapp 17 % (Stand 2017) durch den Sekundärrohstoff REA-Gips gedeckt werden [27]. Der REA-Gips wird fast vollständig für die Baustoffindustrie, insbesondere die Gipsbaustoffindustrie, verwendet [26]. Dazu wird der Gips $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ bei 160 °C zu Calciumsulfathemihydrat (Bassanit) $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ calciniert [28].

Das Ende der Kohleverstromung in Deutschland bedingt einen Ersatz der derzeitigen Gipsmassen (5,1 Mio. t aus Braun-

kohle-, 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 (Güterklassifikation HS92: 2520) stieg von 1995 (541 Mio. US\$) auf 1,29 Mrd. US\$ 2017 mit den Hauptexporteuren Thailand (26 %), Oman (13 %) und Deutschland (11 %) [29]. Deutschland ist Nettoexporteur mit einem Handelsvolumen von knapp 128 Mio. US\$ [29], Stand 2017).

3.3 Kalkstein

Die globale Produktion von Kalkstein nimmt kontinuierlich zu und betrug 2018 4,2 Mrd. t. Da die Produktion von Kalkstein nicht in allen Ländern akkurat erfasst wird, schlägt die Eurostat [30] 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 [31]. Deutschland importiert 2,1 Mio. t Kalkstein und exportiert 0,27 Mio. t ([32], Stand 2016). Durch die erhöhte Bauaktivität in Deutschland mit einem erhöhten Zementverbrauch von 4,8 % zwischen 2016 und 2017 stieg auch der Kalksteinverbrauch [27].

Das globale Handelsvolumen an Kalkstein (Güterklassifikation HS92: 2521, z.B. [33]) stieg von 1995 mit 174 Mio. US\$ auf 815 Mio. US\$ in 2017. Hauptexporteure sind die Vereinigten Arabischen Emirate (35 %), Malaysia (11 %), die Philippinen (5 %) und der Oman (4,6 %) [29]. Deutschland ist Nettoimporteur von Kalkstein mit einem Warenwert von ca. 15 Mio. US\$ ([29], Stand 2017). Ebenso stieg das Handelsvolumen von gebranntem Kalk (HS92:2522) global auf 949 Mio. US\$ im Jahr 2017, bei dem Deutschland als drittgrößter Exporteur einen Anteil von 8,6 % (82 Mio. US\$) mit einem Nettoexport von fast 30 Mio. US\$ einnimmt ([29], Stand 2017).

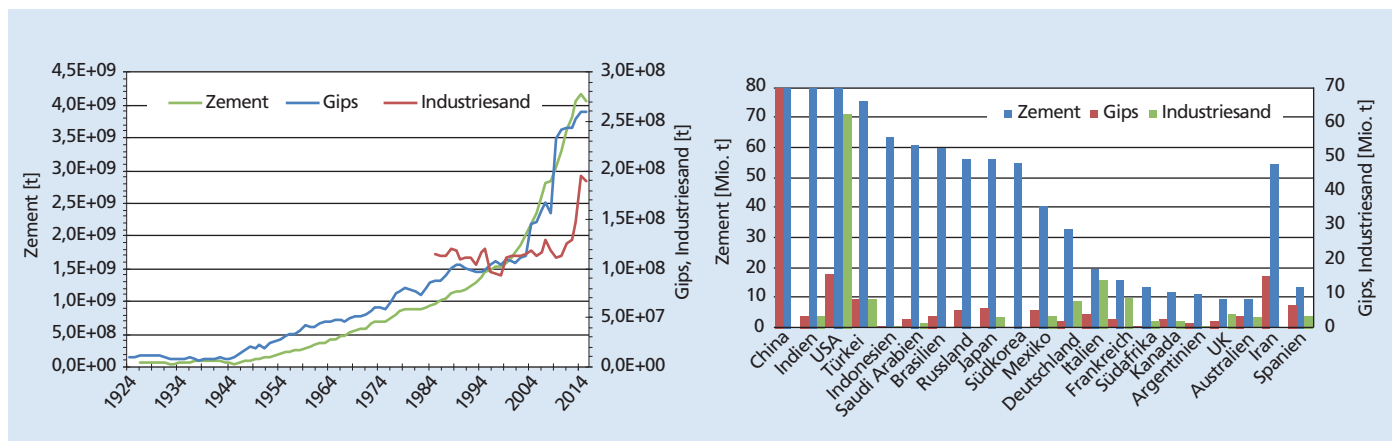


Bild 3: a) Zunahme der Weltproduktion der Massenrohstoffe Kalkstein/Zement, Gips und Industriesand von 1924 bis 2015. Vor allem die neue Technologie des Frackings, die zur Energieunabhängigkeit der USA führte, verursacht eine Zunahme der Produktion von Industriesand. b) Jahresproduktion ausgewählter Länder für Massenrohstoffe. Die Produktion Chinas mit 2,4 Mrd. t und Indiens (290 Mio. t, Stand 2013) beträgt mehr als 65 % der Weltproduktion (Zement Stand 2016, aus [36], Gips und Industriesand Stand 2013, aus [23])

3.4 Sand und Kies

Die globale Produktion von Sand und Kies allein für die Bauindustrie beträgt 30 Mrd. t/a bis 40 Mrd. t/a, insgesamt wird von einem Verbrauch von 40 Mrd. t/a bis 50 Mrd. t/a ausgegangen [13]. Da global der illegale Sand- und Kiesabbau signifikant ist, gibt die Eurostat [30] zur Ableitung von Bausand und -kiesfördermengen 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 ([31], Stand 2016). Davon werden in Baden-Württemberg 37,9 Mio. t Sand gewonnen, wovon knapp 1 % aus Sandstein generiert wird (Mürbsand) [25]. Der Nettoexport Deutschlands bleibt wie bei anderen Massenrohstoffen wegen der hohen Transportkosten mit 11,6 Mio. t gering ([31], Stand 2016). Durch die erhöhte Bauaktivität in Deutschland mit einem erhöhten Zementverbrauch von 4,8 % zwischen 2016 und 2017 [27] steigt auch der Verbrauch von Bausand und -kies.

Zusätzlich werden in Deutschland jährlich ca. 9,9 Mio. t Industriesand produziert, wobei es sich vor allem um Quarzsande handelt ([31], Stand 2016, [34]). Die globale Produktion von Industriesand beträgt ca. 300 Mio. t ([35], Stand 2018). 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 ([35], Stand 2018).

Das globale Handelsvolumen an Sand (Güterklassifikation HS92: 2505) stieg von 1995 (741 Mio. US\$) auf 1,23 Mrd. US\$ im Jahr 2017 [29]. Hauptexporteure sind Deutschland mit einem Anteil von 12 % (149 Mio. US\$), die Niederlande (11 %), Australien (11 %), Belgien/Luxemburg (11 %) und die USA (7,2 %). Hauptimporteure sind Belgien/Luxemburg (11 %), die Niederlande (9,3 %), Singapur (6,6 %) und Mexiko (6,4 %) ([29], Stand 2017). Von den 1,23 Mrd. US\$ hatten Natursande aller Art (HS92:250590) 2017 einen Anteil am globalen Handelsvolumen von 528 Mio. US\$ [29]. Deutschland ist Nettoexporteur mit einem Wert von 60,9 Mio. US\$ [29]. Der Anteil von Quarzsand (HS92:250510) am globalen Handelsvolumen beträgt 705 Mio. US\$ (2017). Des Weiteren ist Deutschland nach Australien (15 %), USA (12 %), Belgien/Luxemburg (11 %) mit 8,9 % der viertgrößte Exporteur von Quarzsand (62,9 Mio. US\$) und Nettoexporteur mit einem Wert von 32,5 Mio. US\$ [29].

3.5 Zement

Die globale Produktion von Zement beträgt 4,7 Mrd. t im Jahr 2016, davon produziert China 52 % [36] (Bild 3). Der USGS [22] 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 ist nicht absehbar [22]. In Deutschland wurden 2017 [27] ca. 34 Mio. t Zement mit einer Steigerung von 4 % zum Vorjahr produziert. Zur Herstellung von Zement werden neben gemahlenem Kalkstein kieselsäure- und tonerhaltige Bestandteile benötigt. Diese werden ebenfalls aus natürlichen Lagerstätten wie Ölschiefern, Ton(stein), vulkanischen Gesteinen wie Trass (feinkörniger Tuff), oder aus Industrieabfällen wie Flugaschen gewonnen. Als weiterer Hauptbestandteil wird dem Zement fein gemahlener Hütten sand zugegeben. Außerdem kommt Kalksteinmehl als Hauptbestandteil im Zement zu Einsatz.

Der zunehmende Bedarf an weiteren Zementhauptbestandteilen 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 müssen mittelfristig importiert oder substituiert werden [37]. Im Jahr 2013 fielen 3,2 Mio. t Steinkohlenflugaschen in Deutschland an [38], die mit einem Anteil von 88 % hauptsächlich in der Betonindustrie Verwendung fanden [38]. Im Jahr 2018 wurde bereits nahezu die gesamte Steinkohlenflugasche im Betonbau verwendet [37].

Das globale Handelsvolumen an Zement (Güterklassifikation HS92: 2523) stieg von 4,7 Mrd. US\$ (1995) auf 9,1 Mrd. US\$ im Jahr 2017 ([29], Stand 2017). Hauptexporteure sind China (7,3 %), Türkei (6,8 %), Spanien (5,7 %) und Deutschland (5,3 %) ([29], Stand 2017). Deutschlands Nettoexport betrug 2017 4,6 Mio. t ([27], Stand 2017) mit einem Exportwert von 480 Mio. US\$ und einem Importwert von 188 Mio. US\$ ([29], Stand 2017).

4 Geologische Verfügbarkeit & anthropogener Einfluss

4.1 Gips

Evaporite (Eindampfungsgesteine) wie Gips und Anhydrit werden in eintrocknenden, zeitweise abgeschlossenen und temporär mit Meerwasser überspülten Randbecken und in intrakontinentalen Senken ausgefällt. Dies geschieht vor allem in ariden Gebieten um den 30. Breitengrad. Sie finden sich aber auch bis zum Äquator und zur polaren Tundra (z.B. Anden, Himalaya). Gips wird für die Bauindustrie aus fossilen Lagerstätten als Festgestein abgebaut und als Abfallprodukt bei der Rauchgasentschwefelung weiterverwendet. In Australien wird Gips auch aus rezenten Seen gefördert [39]. Die in der gegenwärtigen Kaltzeit des Erdzeitalters Quartär über die letzten 10000 Jahre gebildeten Salzablagerungen bedecken eine Fläche von etwa 132626 km² (50327 km² auf dem Kontinent, 5074 km² am Meeresrand und 76625 km² an Aralsee und Karabugas-Golf am Kaspischen Meer) [39]. Bei einer Ausfällung von ca. 4 Mio. t Gips aus 35000 km² ([40], Annahme basierend auf Aralsee Eindampfung mit 67 mm Gipslage über 15 Jahre) läge die Gipsausfällung

pro Jahr unter dem globalen jährlichen Verbrauch.

4.2 Kalkstein

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 Carbonat [41] 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 Carbonat-Budget wird durch die globale Temperaturänderung des Meeresswassers beeinflusst. Perry & Morgan [42] zeigen, wie Korallen und damit große Riffkörper durch Bleichung, verursacht durch natürliche Temperaturschwankungen des Meerwassers infolge des El Niño, absterben. Diese können sich aber innerhalb von ca. zehn Jahren vollständig erholen, sofern nicht Massenvermehrungen von Seeigeln und anthropogene Einflüsse wie erhöhter Sedimenteintrag und Gewässer-Eutrophierung durch den Ausbau von Resorts, anderen anthropogenen Schadstoffeintrag oder durch Überfischung stattfinden [42]. Durch den erhöhten Ausstoß von Kohlendioxid bei der Verbrennung organischer Rohstoffe wird ein Drittel des CO₂ in den Weltmeeren gelöst, sodass der pH-Wert der marinen Oberflächenwässer seit Beginn der industriellen Revolution um 26 % reduziert wurde [43]. Während das Wachstum von Algen und Seegras durch den erhöhten CO₂-Gehalt steigen sollte, werden Kalkschaler und Riffbildner durch das sauer werdende Meerwasser reduziert und der Kaskadeneffekt bleibt unklar [44].

Die in küstennahen Lagunen, Riffen, Vorriffen und Atollen gebildeten Carbonate zeigen, wie auch die Sande (s. Abschnitt 4.3), abhängig vom Ablagerungsraum unterschiedliche Gesteinsqualitäten. Zwar wird die Kalksteinqualität durch unterschiedliche geologische Dolomitierungsprozesse mit dem Einbau von Magnesium (Mg) zu Dolomit (CaMg(CO₃)₂) verschlechtert, dennoch sind die geologischen Reserven Deutschlands und global auf lange Zeit in ausreichender Menge verfügbar.

4.3 Sand

Sand wird durch natürliche Erosion gebildet. Global werden mindestens 12 Mrd. t/a Sedimentfracht als natürliche Erosion in die Weltmeere verbracht [45–47]. Durch den anthropogenen Druck mit Waldrodungen, durch Flussbegradigungen oder durch die Anlage großer landwirtschaftlicher Flächen u.a. nimmt die Erosion signifikant zu. Bereits 63 % aller Flüsse mit einer Länge > 1000 km sind durch Dämme in ihrem freien Lauf eingeschränkt, um den Bedarf an Energie durch Wasserkraft (Zuwachs in Asien in 2016 ca. 15 GW), Wasserversorgung und das Hochwassermanagement sicherzustellen [48]. Walling [47] nimmt an, dass bis zu 24 Mrd. t/a Sediment von Dämmen zurückgehalten werden. Wilkinson &

McElroy [49] schließen auf einen 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 Kieseln deutlich unterhalb des globalen Verbrauchs von 30 Mrd. t/a bis 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 Feinsands in Wüsten verhindert ein Verzahnen der Quarzkörner bei seiner technischen Verwendung. Die Verwendung von Wüstensand kann bisher nur durch ein mechanisches Aufbrechen unter erhöhten Kosten, oder durch alternative Bindemittel für Wüstensand wie Zement, Bentonit, Flugasche [50] oder Kunststoffe wie Polymerbeton erfolgen [51].

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 Sands 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.

5 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 Nutzungsdauer 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 [52].

Grundsätzlich wird durch das erweiterte Portfolio an Zementen auch der Anspruch an die Reinheit der Komponenten höher, was sich in den Normen wie DIN EN197-1 niederschlägt (z.B. [53]). Der erhöhte Anspruch an die Baustoffe hat einen erhöhten Anspruch an die Rohstoffqualität zur Folge. Die Zunahme komplexer Verbundbaustoffe erhöht zudem den Anspruch an geeignete Sortierverfahren von Abbruchabfällen zur Gewinnung sortenreiner R-Baustoffe.

6 Regionale Verfügbarkeit und nationale Politik

Obwohl die globale, geologische Verfügbarkeit von Massenrohstoffen auf lange Sicht

gegeben ist, zeigen sich Probleme beim Zugang zu Baurohstoffen. Wirtschaftsstarke Kleinstaaten 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 und Indonesien im Jahr 2007, veranlasste, den Export von Bausand nach Singapur einzuschränken bzw. zu beenden [54]. In den Medien wird der Begriff „Sandkrieg“ verwendet. Aber bisher kann der Export von Bausand z.B. aus Australien in die Emirate den Ausfall der Importe aus anderen asiatischen Ländern ersetzen.

Auch in Schwellenländern wie z.B. Indien ist die Versorgung mit Sand nicht überall gegeben. So wird für manche Regionen der Sand durch Schlacke, Formsand aus den Gießereien, Bettasche aus der Kohleverbrennung u.a. industrielle Abfallstoffe substituiert, um den Bedarf an Sand und Beton zu decken (z.B. [55]). Obwohl sich Indiens Sandverbrauch seit 2000 mehr als verdreifachte [56], ist der Verbrauch Indiens mit 0,7 t/a pro Kopf noch wesentlich geringer als der Chinas (3,4 t/a pro Kopf) [57]. Wenn der Ausbau der Infrastruktur und des Hochbaus sich in Indien weiter auf den Stand entwickelter Länder von ca. 3 t/a pro Kopf entwickelt, ist bei einer Bevölkerung von fast 1,4 Mrd. Einwohnern der weiter zunehmende, globale Bedarf an Baurohstoffen absehbar.

Chinas Ausbau der Infrastruktur und seiner Urbanisierung benötigt mehr als die Hälfte der globalen Sand- und Kies-Produktion [34]. Insgesamt führt Chinas Bauboom zu einem Verbrauch an Baustoffen von 15,8 t/a pro Kopf, der sich ab 2025 stabilisieren wird ([15], Stand 2017). Auch für die territoriale Ausdehnung Chinas mit dem Bau künstlicher Inseln zur Sicherung von Rohstoffen und Nahrungsmitteln werden große Volumina Baumaterialien verwendet. Mindestens sieben künstliche Inseln von insgesamt 13 km² wurden von China auf Riffen im Südchinesischen Meer aufgeschüttet, die zu militärischen Basen ausgebaut worden sind [58]. Damit soll der Zugang zu den reichen Fischbeständen, der Einfluss auf die globalen Handelsrouten [58], sowie auf die regionalen Kohlenwasserstoffvorkommen gesichert werden [59].

Solange die Politik den freien Welthandel der Rohstoffe gewährleistet [7] und das Innovationspotenzial fördert [7], ist weder von einer absoluten noch von einer relativen Knappheit der mineralischen und metallischen Rohstoffe auszugehen [7]. Da insbesondere im Rohstoffsektor global Protektionismus und kontinuierlich steigende Handelsbarrieren aufgebaut werden [60], sind alternative nationale und internationale Rohstoffsicherungsstrategien in Erwägung zu ziehen.

Deutschland verfügt mit der Norddeutschen Tiefebene, der Niederrheinischen

Bucht, dem Rheingraben und dem Molassebecken des Alpenvorlands über große Sedimentbecken, in denen ausreichende Mengen von Sand und Kies im Verlauf der jüngeren Erdgeschichte abgelagert wurden und die den Bedarf langfristig decken würden (Bild 4). 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 rd. 85 % aller bekannter Lagerstätten von Sand und Kies wegen Bebauung und Schutzgebieten für den Abbau nicht verfügbar [35]. Ähnliche Probleme bestehen für Kalkstein und Gips, die Über- und Untertage gewonnen werden. In den Regionen Karlsruhe-Mannheim, Stuttgart, Ruhrgebiet und Berlin führt das bereits zu temporärem Mangel an Baurohstoffen (z.B. [35]). Somit sind zahlreiche Lagerstätten in Deutschland geologisch vorhanden, aber nicht verfügbar. Entsprechend ist eine Rohstoffstrategie für die heimische Rohstoffversorgung im Bereich der Massenrohstoffe notwendig.

7 5 – Soziale Aspekte und Verfügbarkeit

Die weiterhin steigende Weltbevölkerung auf in der Spitze voraussichtlich ca. 10 Mrd. Menschen im Jahr 2060 [15] und der globale steigende Wohlstand mit einer Verdreifachung per Capita [15], wird zu weiter zunehmenden Nutzungskonflikten hinsichtlich Zugang und Verteilung von natürlichen Ressourcen führen. Zwar wird in einigen Industrieländern die Entkopplung von Wohlstand und Ressourcennutzung vorangetrieben, was aber global nur zu einer relativen Entkopplung führt [15].

Bergbau verursacht erhöhte Energie-, Wasser- und Landverbräuche, die bei geringen Umweltstandards mit möglichen Auswirkungen auf die Umwelt wie Wasserverschmutzung, Staub, Lärm und assoziierten sozialen Spannungen einhergehen. Weitere soziale Spannungen sind auf den Zuzug von Bergleuten und assoziierten Arbeitskräften, im Wesentlichen männlich, und deren ggfs. unterschiedlichen kulturellen Hintergrund zurückzuführen [62]. Gleichzeitig führt Bergbau unter ausgewogener Führung zu lokalem Wohlstand, und liefert die Rohstoffe für nahezu jegliches Produkt des täglichen Lebens.

Neben lokalen Konflikten (NIMBY – not in my backyard), Konflikten hinsichtlich Landnutzung und Rechten an Rohstoffen und Beteiligung an den Gewinnen, wird auch eine ideologische Opposition aufgebaut (BANANA – build absolutely nothing anywhere near anybody), die auf ökonomische, politische und kulturelle Nutzungskonflikte zurückgeführt werden kann [63].

Rohstoffunternehmen entwickeln aufgrund der zunehmenden, kritischen Diskussionen, der Etablierung von NGOs wie Mining Watch (gegr. 1999 in Kanada), der Digitalisierung und globalen Verfügbarkeit von Daten und Medien eine offeneren

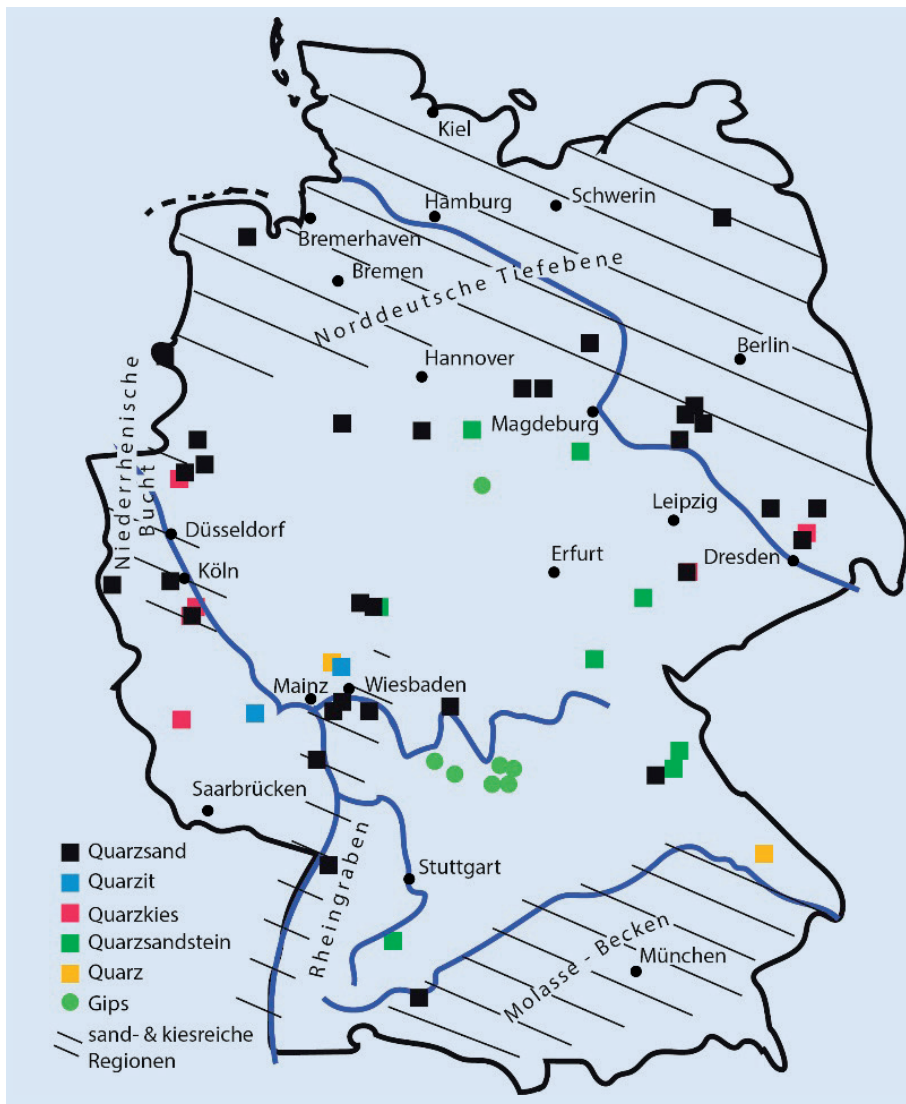


Bild 4: Regionale Verteilung von Industriesand- und Gipslagerstätten in Deutschland (nach [35, 61]). Die geologische Verfügbarkeit von Bausand- und Kieslagerstätten ist groß, und umfasst neben dem Molassebecken, der Norddeutschen Tiefebene und den Regionen entlang des Rheins weitere Regionen in Deutschland

Firmenpolitik. Die Social license to operate SLO (credibility, fairness, dialogue) während der Lebenszeit einer Lagerstätte von der Planung über die Exploration bis zur Renaturierung hält vermehrt Einzug in die internationale Rohstoffexploration, um Nutzungskonflikte zu überbrücken und die ingenieur- und ökonomisch getriebene Kultur der Wirtschaftsunternehmen mit den Bedürfnissen der Bevölkerung übereinzubringen [63].

Der Anspruch von Kunden und Bürgern auf eine intakte Umwelt und eine ressourcenschonende Nutzung und soziale Beschäftigung von Arbeitnehmern bringt Konzerne und Staaten dazu, internationale Standards einzuführen (z.B. BMW Group Supplier Sustainability Standard, Vollmitgliedschaft des Bundes seit 2019 bei der EITI The Extractive Industries Transparency Initiative). Die ISO 26000 beschreibt gesellschaftlich verantwortliches Handeln für Rohstoffunternehmen, ist aber eine freiwillige, nicht-zertifizierbare Norm.

Obwohl der Bergbau in Deutschland eine lange Tradition hat und in zahlreichen Ländern als integraler Bestandteil der Volkswirtschaft und Grundlage zur Entwicklung industrieller Entwicklung gesehen wird, sinkt dessen Akzeptanz in Deutschland [64]. Dies führt zu reduziertem Interesse an Ausbildung und Studium in den entsprechenden Disziplinen, und mittelfristig zu einem Mangel an Fachpersonal in Genehmigungsbehörden und Firmen, und damit zu einem Verlust an Wissen und Innovation.

8 T – Technologische Aspekte und Verfügbarkeit

Die Produktion von Massenrohstoffen wird im Rahmen des wirtschaftlichen Wettbewerbs und gesetzlicher Rahmenbedingungen automatisiert und die Weiterverarbeitung zu Zement weiter optimiert. Neue Technologien bieten neue Einsatzgebiete für Massenrohstoffe, wie die o.g. Nutzung von Sand bei der Anwendung der Fracking

Technologie in den USA, die mit einer Importunabhängigkeit der USA von Energierohstoffen einhergeht. Neben kontinuierlichen, neuen technischen Innovationen beim Lagerstättenabbau, der Produktion und CO₂-Reduktion im Zementwerk liegen weitere Herausforderung im Recycling der Baustoffe (z.B. [65]). Für einen sortenreinen R-Beton ist die Sortierung und Trennung der Multikomponentenbaustoffe, wie der Abtrennung von Gips und Schwermetallen in der Feinfraktion oder dem Aussortieren der Materialien zur Wärme- und Schalldämmung, für eine Kreislaufwirtschaft essentiell [66]. R-Baustoffe können mangels fehlender Sortenreinheit nicht alle Ansprüche an Bauwerke erfüllen, sodass Primärlagerstätten weiterhin notwendig sind. Neue Technologien zur Gewinnung von Nebenprodukten aus primären Massenrohstoffen ermöglichen aufgrund der großen Produktionsvolumina durch die Abtrennung von Edelmetallen (z.B. Rheingold) oder Seltenen Erden aus Schwermineralen zusätzliche Einnahmen [67].

9 E – Ökonomische Aspekte und Verfügbarkeit

Die Welt wird wohlhabender und hat 2060 einen höheren Lebensstandard mit fast allen Ländern der Welt auf heutigem EU4 (Frankreich, Deutschland, Italien, Großbritannien) Standard [15]. Der Wohlstand geht mit einer globalen Zunahme von Baurohstoffen in den OECD-Ländern bis 2060 um den Faktor 1,5, in den BRICS-Ländern um den Faktor 2,4, und im Rest der Welt um den Faktor 3,4 einher [15]. Auch in der EU wird der Bedarf an Massenrohstoffen durch geänderte Lebensformen zu Einpersonenhaushalten, den Erhalt und die Erneuerung von Infrastrukturen und die bis 2042 um 2,3 % auf 525 Mio. Einwohner wachsende EU-Bevölkerung steigen. Das Wachstum wird sich in Deutschland nach Erreichen der maximalen Bevölkerung von 83,8 Mio. Einwohnern im Jahr 2028 (plus 1 %) früher abschwächen [68].

Bisher unbekannte Länder zeigen den Transfer von (im freien Markt) unbekanntem Geopotenzial zu Reserven auf, und treten mit der Produktion und dem Export von Massenrohstoffen international in Erscheinung. Dies zeigt die Bedeutung der Aufsuchung und Gewinnung von Rohstoffen auf, um neue Märkte zu erschließen. So entwickelte das Sultanat Oman zur Diversifizierung seiner Wirtschaft seit Anfang 2000 die Kalkstein- und Zementindustrie, und tritt seit etwa 2012 auch beim Export von Gips und Kalkstein als global dritt- und siebtgrößter globaler Exporteur in Erscheinung (Bild 5).

Neben der geringen Verfügbarkeit von potenziellen Abbauflächen in Deutschland aufgrund von Nutzungskonflikten hat der Wille der Eigentümer, landwirtschaftliche Fläche für den Rohstoffabbau zu veräußern, wegen steigender Grundstückspreise und zunehmendem Mangel an Ackerland stark abgenommen. Der gemittelte Verkaufspreis

Ackerland stieg in Baden-Württemberg mit 10 % zum Vorjahr auf 26800 €/ha ([69], Stand 2017).

In Deutschland führt der fehlende Ausbau von Sand- und Kieslagerstätten temporär zur Knappheit von Sand und Kies. Dennoch bleibt die Gewinnung heimischer Rohstoffe notwendig, da die Transportkosten per Lkw den Sand nach ca. 50 km Wegstrecke unwirtschaftlich machen [70]. Durch eine Verschiffung würden die Transportkosten reduziert, allerdings bleibt der Ausbau von Lagerstätten an schiffbaren Flüssen aus [71]. Zwischen 1992 und 2014 hat sich die Anzahl an Sand- und Kieswerken in Baden-Württemberg etwa halbiert, neue Abbaugelände wurden seither nicht genehmigt [71]. Das Fördervolumen hat sich zwischen 2005 von 86,2 Mio. t mit 33,1 Mio. t Produktionsmenge Sand und Kies (Gesamtfördermenge 36,1 Mio. t, [72] auf 100 Mio. t mit 38,3 Mio. t Sand und Kies ([73], Stand 2015) erhöht. Entsprechend führen Skaleneffekte (economy of scale) zu effizienterem Abbau.

Der Megatrend Digitalisierung hält nur sukzessive Eingang in die Rohstoff- und Bauindustrie [74]. Die Gesamtkosten eines Bauwerks können um bis zu 16 %, und die Bauzeit um bis zu 30 % reduziert werden [75, 76]. Weitere Effizienzsteigerungen werden von der Digitalisierung der Schnittstellen zum Rohstoffproduzenten und zu den Behörden erwartet.

10 E – Ethische Aspekte und Verfügbarkeit

Ein positives Einwirken auf Korruption, die Unabhängigkeit der Behörden, gute Arbeitsbedingungen u.a. kann durch den Ausbau der Rolle der NGOs bei Monitoring erhöht werden, wie es im Bergbau forciert wird [77]. Zudem werden freiwillige und politische Standards entwickelt, um soziale und ethische Aspekte beim Rohstoffabbau sicherzustellen (zum Vergleich von Nachhaltigkeitsstandards siehe z.B. [78]). Weil Baurohstoffe wegen der hohen Transportkosten in der Regel nur für den nationalen Markt verwendet werden, sind ethische Aspekte bei der Gewinnung von Massenrohstoffen vor allem im internationalen Umfeld wichtig.

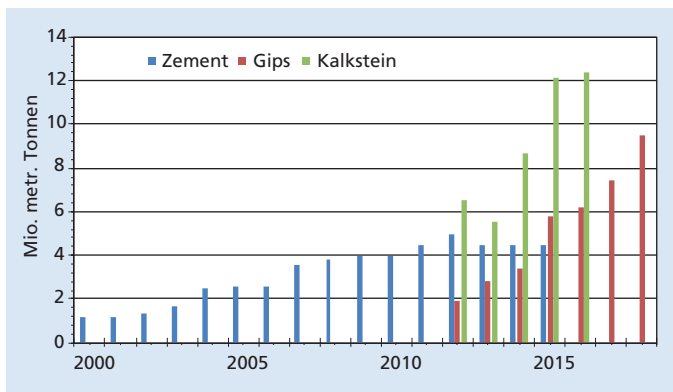


Bild 5: Entwicklung von neuen Lagerstätten im Sultanat Oman, um den lokalen Bedarf zu decken und den Export auszubauen [23]

11 P – Politische Aspekte und Verfügbarkeit

Politische Rohstoffstrategien des Bundes und der Länder versuchen internationale Vereinbarungen abzuschließen und die heimischen Rohstoffe zu fördern. Die Entwicklung neuer innovativer Technologien und die zirkuläre Ökonomie mit einem erhöhten Produktlebenszyklus, Refabrikation und Recycling wird durch Forschungsprogramme gefördert.

Hohe Richtlinien, Auflagen und Kosten können zu Schließung oder Abwanderung der Explorations- und Raffinade-Industrie in die Schwellen- und Entwicklungsländer führen. Damit sinkt die Materialproduktivität der rohstoffintensiven Industrie bei deren Umsiedlung von den entwickelten Ländern in die Schwellen- und Entwicklungsländer. Der Verlust der Industrie geht mit dem Verlust der vertikalen Integration von Wertschöpfungsketten und den Möglichkeiten des Recyclings (z.B. [79]) sowie dem Verlust von assoziiertem technischen Wissen einher.

Der Verlust technischen Wissens wird durch mangelnde Aufklärung zum Rohstoffwissen und die zunehmende Ablehnung der explorierenden Wirtschaft als attraktiver Arbeitsmarkt weiter forciert, was im Freihandel über den globalisierten Markt abgefangen wird. In einem zunehmend protektionistischen Umfeld wird der Verlust von Wissen, Patenten und Innovationskraft aber mittelfristig zu Problemen der Rohstoffbeschaffung führen.

12 L – Gesetzliche Aspekte und Verfügbarkeit

Den illegalen Sandabbau versucht man in zahlreichen Ländern mit nationalen, gesetzlichen Maßnahmen einzuschränken. Allein in Indien wird der illegale Sandabbau mit 150 Mio. US\$ beziffert ([56], Stand 2011). In Marokko sind mit 10 Mio. t etwa die Hälfte des Bausands des Lands durch illegale Entnahme an den Küsten abgebaut worden [34]. Gesetze und Anordnungen sind in zahlreichen Ländern verankert, während es oft an einer kompetenten rechtskonformen Umsetzung durch eine verantwortungsbewusste

Regierungsführung mangelt [77]. Bei der Einführung einer Besteuerung und der Eindämmung von Korruption könnten NGOs eine wichtige Rolle spielen.

In Baden-Württemberg sind 85 % der möglichen Rohstoffgebiete wegen unterschiedlicher Nutzungsinteressen anhand von behördlichen Richtlinien für den Abbau nicht verfügbar. Die Zuständigkeit verschiedener Behörden mit

konkurrierender Raumnutzung, vorgegebene Schutzabstände zu vorhandener Infrastruktur, Natur- und Wasserschutzgebiete und das Fehlen von Ersatzflächen zu vorgeschriebenen Ausgleichsmaßnahmen führen zu langfristigen und aufwändigeren Genehmigungsprozessen, die mehr als zehn Jahre dauern können.

13 E – Umweltaspekte und Verfügbarkeit

Umwelteinwirkungen sind im internationalen Umfeld durch den illegalen Abbau von Sand in vielen Ländern zu beklagen. Kalksteine und Gips verzeichnen wegen des technischen Aufwands beim Abbau einen geringen Anteil bei der unerlaubten Gewinnung von Baurohstoffen. 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 bei stehenden Gewässern [80].

Die europäischen und nordamerikanischen Richtlinien zeigen nachhaltige Rohstoffproduktion auf. Der Umwelteinfluss von Baurohstoffen per Kilogramm ist geringer als der von Metallrohstoffen [15]. 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 manchen Arten temporär zerstört, und gleichzeitig den Lebensraum anderer Arten vergrößert. So wird von einer Besiedlung 90 % der Uhus und 94 % der Uferschwalben in Felswänden und Sandböschungen in aktiven Steinbrüchen der Wallonie Belgiens berichtet [34]. Auch die Rekultivierung erfolgt in Deutschland nach strengen Richtlinien.

Der Umweltaspekt von nicht dauerhaften Sandvorspülungen zum Küstenschutz wird selten diskutiert. Durch die Bevölkerungszunahme wurden zunehmend risikobehaftete, strandnahe Gebiete besiedelt und durch effizienten Deichbau große Gebiete urbar gemacht. Für den Küstenschutz werden seit den 1960er Jahren in Deutschland marine Sande vorgespült. Allein in Sylt wurden seit 1972 rund 50 Mio. m³ Sand für ca. 228 Mio. € vorgespült, weitere 1,2 Mio. m³ für 6,5 Mio. € kommen 2019 hinzu [81]. Insgesamt werden in Deutschland etwa 2,5 Mio. t/a vorgespült ([35], Stand 2016). Neben einem Eingriff in Flora und Fauna werden die Sanddepos auf dem Meeresgrund geringer, weil die vorgespülten Sande, die bis zu zehnmal schneller erodiert werden als die natürlichen Strandsande, auch weiter ins Meer hinaustreiben [82]. Dies kann zu Suspensionen von Sedimentfracht im Meerwasser führen, die sich küstenferner ablagern und eine wiederholte Vorspülung verhindern. Die Erosion vorgespülter Sande führt z.B. in Florida zu einer Ablagerung auf Korallen und dadurch zu deren Absterben [83].

14 Schlussfolgerung

Die Baurohstoffe sind in Deutschland zwar geologisch ausreichend vorhanden, ihre Verfügbarkeit ist jedoch durch regionale Verteilung, politische, ökonomische, sozial-ethische, technologische, umwelt- und gesetzliche Aspekte begrenzt und endlich.

Der globale Bedarf an Baurohstoffen wird bis 2060 signifikant steigen, allein der Bedarf an Sand wird 2030 um mehr als 20 % auf 60 Mrd. t gestiegen sein. Eine alleinige Fokussierung auf Recycling wird den Bedarf nicht decken können. Entsprechend sind Innovationen bei Primär- und Sekundärrohstoffen notwendig.

Durch den anthropogenen Druck können viele Lagerstätten nicht abgebaut werden, sodass die geologische Herausforderung in der Aufsuchung und Gewinnung abbauwürdiger und qualitativ geeigneter Rohstoffe, sowie der Charakterisierung und Sortierung von R- und M-Baustoffen liegt.

Durch das Ende der Kohleverstromung fehlt nicht nur Flugasche als Zusatzstoff, sondern auch ein signifikanter Anteil Gips für die Bauindustrie, der durch die bereits vorhandenen Steinbrüche nicht gedeckt werden kann.

Große Effizienzsteigerungen sind durch die Digitalisierung möglich. Insbesondere bei der Rohstoff- und Bauindustrie besteht noch umfangreiches Entwicklungspotenzial, welches digitale Schnittstellen zu behördlichen Prozessen integrieren sollte. Ebenso könnten neue Sensor- und Sortiertechniken im Abbau sowie beim Recycling von Multikomponentenbaustoffe die Sortenreinheit und die Recyclingrate erhöhen.

Aufgrund hoher Transportkosten wird der Bedarf an Baurohstoffen regional durch die heimische Rohstoffgewinnung gedeckt. Exploration und Gewinnung erfolgen unter höchsten Umweltauflagen, soziale und ethische Missstände sind auf dem deutschen Markt unbekannt.

Langfristige Genehmigungsprozesse und unterschiedliche Nutzungsinteressen erschweren die Rohstoffexploration in Deutschland. Die Attraktivität der explorierenden und produzierenden Industrie in der Bevölkerung und bei zukünftigen Arbeitnehmern in Deutschland schwindet, technisches Wissen und Innovationskraft gehen sukzessive verloren. Allein internationaler Rohstoffeinkauf und -import und fehlende vertikale Integration von Wertschöpfungsketten kann bei zunehmendem globalen Protektionismus die Versorgungssicherheit des Lands gefährden.

Literatur

- [1] Zementrohstoffe in Deutschland: Geologie, Massenbilanz, Fallbeispiele. Verein Deutscher Zementwerke (Hrsg.), Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf 2002
- [2] Steffen, W.; Sanderson, R.A.; Tyson, P.D.; Jäger, J.; Matson, P.A.; Moore III, B.; Oldfield, F.; Richardson, K.; Schellnhuber, H.-J.; Turner, B.L.; Wasson, R.J.: *Global Change and the Earth System: A Planet Under Pressure*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 2004
- [3] Krausmann, F.; Wiedenhofer, D.; Lauk, C.; Haas, W.; Tanikawa, H.; Fishman, T.; Miatto, A.; Schandl, H.; Haberl, H.: *Global socioeconomic material stocks*

- rise 23-fold over the 20th century and require half of annual resource use. *PNAS Proceedings of the National Academy of Sciences Early Edition* 114 (2017) No. 8, pp. 1880–1885
- [4] *Global material flows and resource productivity*. UN Environmental Program 2016
 - [5] *Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want*. Report of the International Resource Panel, United Nations Environment Program, Nairobi 2019
 - [6] More, E.; Probert, D.; Phaal, R.: *Improving Long-Term Strategic Planning: An Analysis of STEEPLE Factors Identified in Environmental Scanning Brainstorms*. Proceedings of PICMET 2015 "Management of the Technology Age", Portland 2015, pp. 381–394
 - [7] *Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen*. Endbericht Forschungsprojekt 09/05 BMWi, Fraunhofer-ISI 2005
 - [8] *Vorkommen und Produktion mineralischer Rohstoffe – ein Ländervergleich*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover 2014
 - [9] *World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables*. UN Department of Economic and Social Affairs, Population Division 2017, Working Paper No. ESA/P/WP/248
 - [10] Roser, M.; Ritchie, H.; Ortiz-Ospina, E.: *World population growth*. Stand 2020, <https://ourworldindata.org/world-population-growth>
 - [11] Lutz, W.; Samir, K. C.: *Dimensions of global population projections: what do we know about future population trends and structures?* *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 365 (2010), pp. 2779–2791
 - [12] Steffen, W.; Broadgate, W.; Deutsch, L.; Gaffney, O.; Ludwig, C.: *The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration*. *The Anthropocene Review* 2 (2015) No. 1, pp. 81–98
 - [13] *Revision of world population prospects*. UN Department of Economic and Social Affairs 2019, http://esa.un.org/wpp/unpp/panel_population.htm
 - [14] *GDP growth annually*. <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.KD.ZG?end=2017&start=1967&view=chart>, accessed 5/2019
 - [15] *Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental*. <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>
 - [16] *Real GDP long-term forecast*. OECD Economic Outlook: Statistics and Projections: Long Term Baseline Projections No. 103. <https://data.oecd.org/gdp/real-gdp-long-term-forecast.htm#indicator-chart>
 - [17] *World population prospects 2019*. UN Department of Economic and Social Affairs 2020, <https://population.un.org/wpp/Download/Standard/Population/>
 - [18] Krausmann, F.; Gingrich, S.; Eisenmenger, N.; Erb, K.-H.; Haberl, H.; Fischer-Kowalski, M.: *Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century*. *Ecological Economics* 68 (2009) No. 10, pp. 2696–2705
 - [19] Krausmann, F.; Lauk, C.; Haas, W.; Wiedenhofer, D.: *From resource extraction to outflow of wastes and emissions: The socioeconomic metabolism of the global economy, 1900–2015*. *Global Environmental Change* 52 (2018) No. 9, pp. 131–140
 - [20] Miatto, A.; Schandl, H.; Fishman, T.; Tanikawa, H.: *Global patterns and trends for non-metallic minerals used for construction*. *Journal of Industrial Ecology* 21 (2016) No. 4, pp. 924–937
 - [21] *Assessing global resource use. A systems approach to resource efficiency and pollution reduction*. UN Environmental Program 2017.
 - [22] *Mineral commodity summaries*. U.S. Geological Survey 2019
 - [23] *Minerals commodity summaries*. U.S. Geological Survey, <https://doi.org/10.3133/70194932>
 - [24] *Deutschland – Rohstoffsituation 2016*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover 2017
 - [25] *Antwort des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft auf die Anfrage des Abg. Fabian Gramling zu Mineralische Rohstoffe in Baden-Württemberg*. Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, Drucksache 16/4174
 - [26] *Produktinformation REA-Gips*. Wirtschaftsverband mineralische Nebenprodukte e.V. (WIN), Düsseldorf 2018
 - [27] *Zementindustrie im Überblick 2018/2019*. Verein Deutscher Zementwerke (VDZ), Düsseldorf 2018
 - [28] Warren, J. K.: *Evaporites: Sediments, resources and hydrocarbons*. Springer, Berlin 2006

- [29] Simoes, A. J. G.; Hidalgo, C. A.: *The Economic Complexity Observatory: An Analytical Tool for Understanding the Dynamics of Economic Development*. Workshops at the Twenty-Fifth AAAI Conference on Artificial Intelligence, [https://atlas.media.mit.edu/en/ \(abgerufen 2019\)](https://atlas.media.mit.edu/en/ (abgerufen 2019))
- [30] *Economy-wide Material Flow Accounting. A Compilation Guide*. European Statistical Office (Eurostat), Luxembourg 2007
- [31] *Heimische mineralische Rohstoffe – unverzichtbar für Deutschland! Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover 2017*
- [32] *Deutschland – Rohstoffsituation 2016*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover 2017
- [33] *Vorschlag für eine Verordnung des Rates betreffend Güterklassifikation in Verbindung mit den Wirtschaftszweigen in der Europäischen Wirtschaftsgemeinschaft*, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:51992PC0325&from=EN>
- [34] *Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources*. GRID-Geneva, United Nations Environment Program, Geneva 2019
- [35] *Elsner, H.: Sand – auch in Deutschland bald knapp?* Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, *Commodity Top News* 56 (2018)
- [36] *Cembureau Activity report 2017*. Brussels, 2017
- [37] *Heinz, D.; Heisig, A.: Flugasche und Hüttensand – Zusatzstoffe mit Zukunft? 14. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Karlsruhe 2018*
- [38] *Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2035 in Deutschland*. Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden (BBS), Berlin 2016
- [39] *Warren, J.K. Evaporites – A Geological Compendium*. Springer, Berlin 2016
- [40] *Letolle, R.; Aladin, N.; Filipov, I.; Boroffka, N.: The future chemical evolution of the Aral Sea from 2000 to the years 2500. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 10 (2005) No. 1, pp. 51–70
- [41] *Schneider, R. R.; Schulz, H. D.; Hensen, C.: Marine carbonates: Their formation and destruction*, Chapter 9: *Marine Geochemistry*, Springer, Berlin 2000, pp. 283–307
- [42] *Perry, C.T.; Morgan, K. M.: Bleaching drives collapse in reef carbonate budgets and reef growth potential on southern Maldives reefs*. *Nature Scientific Reports* 7 (2017), Article number: 40581
- [43] *Ocean Acidification Summary for Policymakers – Third Symposium on the Ocean in a High-CO₂ World*. International Geosphere-Biosphere Programme, Stockholm 2013
- [44] *What is oceanic acidification? NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration 2019*, [https://www.pmel.noaa.gov/co2/story/What+is+Ocean+Acidification+%3F \(assessed 3.6.2019\)](https://www.pmel.noaa.gov/co2/story/What+is+Ocean+Acidification+%3F (assessed 3.6.2019))
- [45] *Wallin, D. E.; Webb, B. W.: Erosion and sediment yield: a global overview*. Proceedings of the Exeter Symposium 1996, IAHS Publ. No. 236 (1996), pp. 3–19
- [46] *Syvitski, J. P.; Vörösmarty, C. J.; Kettner, A. J.; Green, P.: Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean*. *Science* 308 (2005), pp. 376–380
- [47] *Walling, D. E.: 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, Aachen 2015
- [48] *Grill, G. et. al.: Mapping the world's free-flowing rivers*. *Nature* 569 (2019), pp. 215–221
- [49] *Wilkinson, B. H.; McElroy, B.: The impacts of humans on continental erosion and sedimentation*. *GSA Bulletin* 119 (2017), pp. 140–156
- [50] *Al Aghbari, M.; Taha, R.; Mohamedzin, Y.E.-A.: Stabilization of desert sands using Portland cement and cement-by-pass dust*. *Ground improvements* 162 (2009), pp. 145–151
- [51] *Zimmermann, M.: Legosteine aus Wüstensand könnten die Zukunft des Bauens sein*. *Augsburger Allgemeine Zeitung*, [https://www.augsburger-allgemeine.de/kultur/Journal/Legosteine-aus-Wuestensand-koennten-die-Zukunft-des-Bauens-sein-id53423601.html \(abgerufen am 13.2.2019\)](https://www.augsburger-allgemeine.de/kultur/Journal/Legosteine-aus-Wuestensand-koennten-die-Zukunft-des-Bauens-sein-id53423601.html (abgerufen am 13.2.2019))
- [52] *Lusty, A.: Manufactured sand for tomorrow*. NZ Concrete Industry Conference, Queenstown 2013

- [53] Tennis, P.; Weiss, W. J.: State-of-the-art report on the use of limestone in cements at levels up to 15 %. Portland Cement Association, Skokie 2011
- [54] Cambodia bans sand exports permanently. <https://www.bbc.com/news/business-40590695> (assessed 19.5.2019)
- [55] Sankh, A. C.; Biradar, P. M.; Naghathan, S. J.; Ishwargol, M. B.: Recent trends in replacement of natural sand with different alternatives. International Conference on Advances in Engineering and Technology 2014, Singapore 2014, pp. 59–66
- [56] Material consumption patterns in India. A baseline study of the automotive and construction sectors. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH (GIZ), Bonn/Eschborn 2016
- [57] Chilamkurthy, K.; Marckson, A. V.; Chopperla, S. T.; Santhanam, M.: A statistical overview of sand demand in Asia and Europe. CTMC Conference 2016
- [58] Tweed, D.: 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)
- [59] Daiss, T.: South China Sea Energy Politics Heat Upoilprice.com, <https://oilprice.com/Geopolitics/Asia/South-China-Sea-Energy-Politics-Heat-Up.html> (assessed 19.5.2019)
- [60] Distortions of trade and competition in the raw materials sector. Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (BDI), Berlin 2015
- [61] Lahner, L.; Wellmer, F. W.: Geowissenschaftliche Karte der Bundesrepublik Deutschland: Wichtige Lagerstätten. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover 2004.
- [62] Mancini, L.; Sala, S.: Social impact assessment in the mining sector: Review and comparison of indicators frameworks. Resources Policy 57 (2018) No. 8, pp. 98–111
- [63] Jebrak, M.; Cristmann, P.: From economic to social geology. SEG Newsletter 111 (2017), pp. 1 and 10–14
- [64] Goedecke, M.: Rohstoffbewusstsein und gesellschaftliche Akzeptanz sind unverzichtbare Grundlage des modernen Bergbaus. Konferenz „Mine Life – Leben mit dem Bergbau“, Görlitz 2017
- [65] The role of cement in the 2050 low carbon economy. https://cembureau.eu/media/1500/cembureau_2050roadmap_lowcarboneyconomy_2013-09-01.pdf
- [66] Schonung natürlicher Ressourcen durch Materialkreisläufe in der Bauwirtschaft. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau 2019
- [67] Forschung zur Bereitstellung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe – Zwischenergebnisse. Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum der TU Clausthal (CUTE), Clausthal-Zellerfeld 2018
- [68] Population projections. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/population-demography-migration-projections/visualisations>
- [69] Kaufpreise für landwirtschaftliche Flächen 2017 wieder gestiegen – Leichter Rückgang in 2016 mehr als ausgeglichen. Pressemitteilung 188/2018, Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Stuttgart 2018
- [70] In Deutschland wird der Sand knapp. Tageszeitung „Die Welt“, erschienen am 13.02.2019, abgerufen am 26.5.2019
- [71] Benzel, L.: Bewertung der regionalen Verfügbarkeit für Beton. 15. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Karlsruhe 2019
- [72] Rohstoffbericht Baden-Württemberg 2005. Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB), Freiburg 2006
- [73] Jahresbericht 2017–2018. Industrieverband Steine und Erden Baden-Württemberg e.V. (ISTE), Ostfildern 2018
- [74] Digitization in the construction industry. Think Act, Roland Berger, Munich 2016
- Digitization in the construction industry. ThinkAct, Roland Berger 2016
- [75] The transformative power of building information modeling. <https://www.bcg.com/publications/2016/engineered-products-infrastructure-digital-transformative-power-building-information-modeling.aspx> (assessed October 2019)
- [76] Shaping the future of construction A Breakthrough in mindset and technology. World Economic Forum, Cologny/Geneva 2016
- [77] Responsible mining? Challenges, perspectives and approaches. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau 2017
- [78] Sustainability schemes for mineral resources: A comparative overview. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover 2017
- [79] Blanpain, B.; Reuter, M.; Malfliet, M. Lead metallurgy is fundamental to the circular economy. Socrates Policy Brief 2019
- [80] Torres, A.; Brandt, J.; Lear, K.; Liu, J.: A looming tragedy of the sand commons. Increasing sand extraction, trade, and consumption pose global sustainability challenges. Science 357 (2017), pp. 970–971
- [81] Küstenschutz: Albrecht begutachtet Strand auf Sylt. <https://www.ndr.de/nachrichten/schleswig-holstein/Kuestenschutz-Albrecht-begutachtet-Strand-auf-Sylt,sylt1146.html> (abgerufen am 19.05.2019)
- [82] Blasberg, M.; Henk, M.: Wie Gold am Meer. Die Zeit (2014) Nr. 34, <https://www.zeit.de/2014/34/strand-sand-verschwinden> (abgerufen am 20.05.2019)
- [83] Wanless, H.R., Maier, K.L.: An evaluation of beach renourishment sands adjacent to reefal settings, Southeast Florida. Southeastern Geology 45 (2014), pp. 25–42

Repository KITopen

Dies ist ein Postprint/begutachtetes Manuskript.

Empfohlene Zitierung:

Hilgers, C.; Becker, I.; Dehn, F.

[Geologische und STEEPLE-Aspekte zur überregionalen Verfügbarkeit von Rohstoffen zur Herstellung von Beton.](#)

2020. Beton, 70

[doi: 10.5445/IR/1000123102](#)

Zitierung der Originalveröffentlichung:

Hilgers, C.; Becker, I.; Dehn, F.

[Geologische und STEEPLE-Aspekte zur überregionalen Verfügbarkeit von Rohstoffen zur Herstellung von Beton.](#)

2020. Beton, 70 (9), 232–240

Lizenzinformationen: [KITopen-Lizenz](#)