

Entwurf zum Kapitel „Stoffkreisläufe“

Fragen, Anmerkungen und Ergänzungen an [anette.mueller@abw-recycling.de](mailto:anette.mueller@abw-recycling.de) oder [anette-m.mueller@uni-weimar.de](mailto:anette-m.mueller@uni-weimar.de)

- 1 Stoffkreisläufe
  - 1.1 Vorbilder aus der natürlichen Umwelt
  - 1.2 Entwicklung des Recyclings
  - 1.3 Typisierung von Stoffkreisläufen in der Baubranche
  - 1.4 Stoffbilanz und anthropogenes Baustofflager

## 1 Stoffkreisläufe

### 1.1 Vorbilder aus der natürlichen Umwelt

Stoffkreisläufe sind das Stabilitätsprinzip der Natur. So zirkulieren die chemischen Elemente in unterschiedlichen Bindungsformen und Aggregatzuständen zwischen den verschiedenen Reservoirs der Biosphäre, Hydrosphäre, Lithosphäre, Pedosphäre und Atmosphäre, wodurch Stabilität gewährleistet wird und Veränderungen über längere Zeiträume ausgeglichen werden können. Stoffkreisläufe mit fundamentaler Bedeutung für das Leben auf der Erde sind die Kreisläufe der Elemente Kohlenstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Phosphor und Schwefel sowie der Wasserkreislauf. Gegenwärtig wird zunehmend versucht, neben der Vertiefung der Kenntnisse über die ablaufenden Prozesse die zirkulierenden Stoffströme quantitativ zu erfassen und die Wechselwirkungen darzustellen. Ziel ist es dabei, Modellvorstellungen zu schaffen und Einflussgrößen zu erkennen, um eine Prognose zukünftiger Entwicklungen vornehmen zu können und Steuermechanismen abzuleiten.

In die Kategorie der natürlichen Kreisläufe gehört der Kreislauf der Gesteine (Bild 1-1), in welchem durch physikalische und chemische Vorgänge bewirkte Neubildungen, Umwandlungen oder Auflösungen von Gesteinen stattfinden. Obwohl dieser Kreislauf sich in völlig anderen zeitlichen und räumlichen Dimensionen bewegt, können daraus bestimmte Schlüsse für Kreisläufe von mineralischen Massenabfällen gezogen werden. Die Abtragung und Verwitterung kann als Beanspruchung während der Nutzung, aber auch als Abbruch und mechanische Aufbereitung am Nutzungsende angesehen werden. Die Sedimentation stellt die Verwertung als unverfestigter oder verfestigter Mineralstoff dar. Bis zu dieser Stufe wird Recycling von Bauabfällen in Form von Tragschichten aus Recycling-Baustoffen oder Betonen aus rezyklierten Gesteinskörnungen heute betrieben. Erst wenn - ausgelöst durch erhöhte Temperaturen und Drücke - die Struktur der Gesteine zunehmend aufgelöst wird bis hin zum völligen Aufschmelzen, können sich neue Gesteine mit völlig verändertem Mineralbestand und physikalischen Eigenschaften bilden. Diese Stufe der Rückführung in den Stoffkreislauf wird bisher nur für bestimmte mineralische Abfälle wie Altglas erreicht.

In jüngerer Zeit ist ein zunehmender Einfluss des Menschen auf die natürlichen Stoffkreisläufe zu verzeichnen als Folge der Zunahme und der Intensivierung der industriellen ebenso wie der landwirtschaftlichen Tätigkeit und des Wachstums der Weltbevölkerung. Bekanntestes Beispiel ist der anthropogene Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf, bei welchem der Gleichgewichtszustand durch die Verbrennung

fossiler Energieträger, die Waldrodung und die Landnutzung zunehmend außer Kraft gesetzt wird. Ein zusätzlicher Eintrag von CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre ist die Folge.

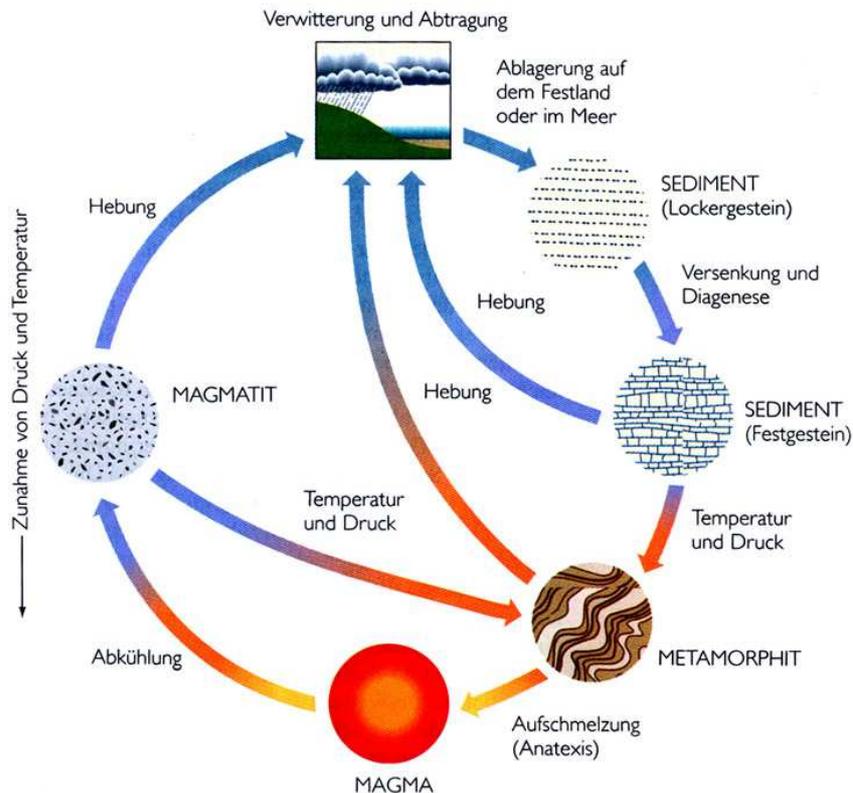


Bild 1-1: Stoffkreislauf in der Lithosphäre (entnommen aus [1])

Um die Eingriffe in die natürlichen Stoffkreisläufe zu vermindern, sind zum einen „Sparstrategien“ durch tatsächlichen Konsumverzicht oder Dematerialisierung geeignet. Ein anderer Weg ist der Aufbau geschlossener Stoffkreisläufe in der Technosphäre. Die Schaffung von solchen geschlossenen Stoffkreisläufen steht allerdings erst am Anfang, auch wenn der Begriff „Recycling“ ein häufig gebrauchtes Schlagwort ist. Beispielsweise standen sich im Jahr 2010 in Deutschland auf dem Bausektor eine Rohstoffentnahme an Sand, Kies und Naturstein von 447 Mio. t und eine Verwertung von zu RC-Baustoffen aufbereiteten Bauabfällen von 65,2 Mio. t gegenüber [2]. Die substituierte Menge an natürlichen Rohstoffen betrug also etwa 15 %. Primärrohstoffe sind also nach wie vor in erheblicher Menge erforderlich. Höhere Einsatzquoten werden für Stoffe wie Glas, Papier und für Metalle erreicht. Das ist zum einen technisch begründet, weil die Recyclingtechnologien für diese Stoffe unter völliger Auflösung der ursprünglichen Struktur in einem Schmelzprozess oder durch das Herstellen einer Suspension ablaufen, so dass das Sekundärprodukt in seinen Eigenschaften kaum noch von dem gebrauchten Primärprodukt beeinflusst wird. Zum anderen sind zumindest für Metalle der hohe Preis und die Energieeinsparung, die bei der Metallerzeugung aus Schrott erreicht wird, der ausschlaggebende Faktor für die Rückführung des Materials.

## 1.2 Entwicklung und Triebkräfte des Recyclings

Recycling als die Rückführung genutzter Produkte und Materialien in den Stoffkreislauf ist kein Phänomen unserer Zeit. Für Materialien wie Altmetalle, Lumpen, Klei-

dung, Papier, Knochen und Asche war das Sammeln und Verwerten seit dem späten Mittelalter üblich. Von Reith [3] wird beispielsweise über die Verwertung von Lumpen, die bei der Papierherstellung benötigt wurden, berichtet: „In der frühen Neuzeit bildeten sich bereits Lumpensammelbezirke aufgrund obrigkeitlicher Privilegien heraus, auch das Instrument des Exportverbotes wurde angewandt, und der ‚Lumpenschmuggel‘ signalisiert ein knappes Gut“. Aufgrund technologischer Entwicklungen wurden ab dem Ende des 19. Jahrhunderts Lumpen bei der Papierproduktion nicht mehr benötigt, so dass dieser Materialkreislauf verschwand. Neben solchen technischen Gründen sind auch der wirtschaftliche Entwicklungsstand und das gesellschaftliche Umfeld bestimmend für die Ausbildung bzw. das Verschwinden von Stoffkreisläufen. In Bezug auf die wirtschaftliche Entwicklung können Stoffkreisläufe in gewisser Weise als „Mangelindikator“ angesehen werden. So konnten nach Reith in Westdeutschland bis in die 1960er Jahre mit Altmetall, Lumpen und Papier beim Altstoffhandel Erlöse erzielt werden. Später war das nicht mehr möglich, wodurch das Sammeln zum Erliegen kam. In der DDR wurden gesammelte Altstoffe ebenfalls vergütet. In Entwicklungs- und Schwellenländern leben noch heute ganze Familien davon, Müll nach verwertbaren Bestandteilen zu durchsuchen. Gegenwärtig ist eine Renaissance der Sammlung der jetzt als Wertstoffe bezeichneten Abfälle wie Kunststoffe, Metalle und Verbundstoffe zu beobachten. Altpapier ist ein wichtiger Rohstoff, für den wieder Erlöse erzielt werden können.

In Bezug auf das Baustoffrecycling kann bei den meisten erhaltenen Bauwerken von der Antike bis zum Mittelalter der Rückgriff auf das Material älterer Bauwerke nachgewiesen werden. Erst nachdem die industrielle Revolution die Massenproduktion von Baustoffen ermöglichte, verlor das Baustoffrecycling seine Bedeutung und war immer nur dann wieder notwendig, wenn in Krisensituationen der Baustoffbedarf nicht anders gedeckt werden konnte. Das meistgenannte Beispiel hierfür ist das Recycling in deutschen Großstädten nach dem 2. Weltkrieg. Große Mengen an Trümmerschutt, der überwiegend aus Ziegeln bestand, mussten aufgearbeitet werden. Zwei Verwertungswege wurden bevorzugt:

- Von den Trümmerfrauen wurden die unbeschädigten Ziegel aussortiert und gereinigt, um sie wieder als Wandbaustoff einzusetzen. Die Reinigung erfolgte händisch oder auch maschinell, wofür beispielsweise eine Art von Dickenholbelmaschine verwendet wurde (Bild 1-2).
- Beschädigte Ziegel wurden zu Ziegelsplitt verarbeitet und als Gesteinskörnung in Ziegelsplittbeton eingesetzt. In einer Norm [4] waren die Herstellung und Verwendung beschrieben. Zur Gebrauchstüchtigkeit solcher Betone liegen konträre Aussagen vor. So wird in [5] über Schadensfälle an Ziegelsplitt-Schüttbetonen bis hin zum Einsturz eines achtgeschossigen Gebäudes berichtet, die durch Fehler in der Verarbeitung verursacht wurden. Dagegen werden in [6] Gebäude aus der Nachkriegszeit vorgestellt, die heute noch ohne Einschränkung genutzt werden.

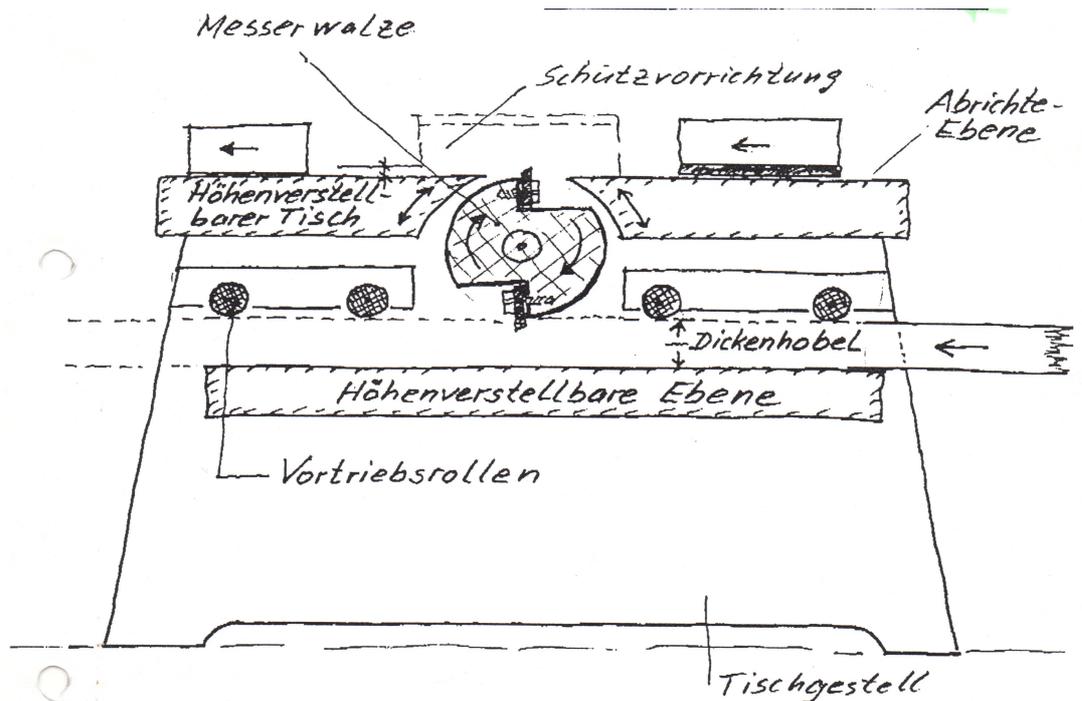


Bild 1-2: Nach den 2. Weltkrieg eingesetzte Vorrichtung zum mechanischen Säubern von Ziegeln **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**

Daneben wurde Trümmerschutt auch für Aufschüttungen, Verfüllungen etc. eingesetzt. In Städten mit eher ebenem Geländeprofil wie Köln oder Berlin wurden so Hügel geschaffen, die als Teil von Parkanlagen heute noch vorhanden sind.

Den Zeitpunkt des Beginns des „modernen“ Baustoffrecycling angeben zu wollen, ist sicher schwierig. Hervorgehend oftmals aus Fuhrunternehmen oder Steinbruchbetrieben begann Anfang der achtziger Jahre des vorigen Jahrhunderts der Aufbau von stationären Recyclinganlagen. So wird bereits 1984 in der Fachpresse über den Einsatz eines Aquamators in einer neu errichteten Recyclinganlage berichtet [8]. Eine Wende vollzieht sich – vom Abbruch zum Rückbau und von der Deponierung von Bauabfällen zur Verwertung. Bauwerke, welche nicht mehr benötigt werden, oder solche, die nicht mehr den Ansprüchen der Nutzer oder den technischen Anforderungen genügen, werden zurückgebaut, um Neuem Platz zu machen oder einfach der Natur ihr Terrain zurückzugeben.

Heute können Stoffkreisläufe als ein Indikator für den Stand der Umweltgesetzgebung betrachtet werden. So haben sich die gegenwärtigen Sammel- und Rückführsysteme aufgrund von Forderungen des Gesetzgebers etabliert. Sinnfällig wird das durch den Übergang von der reinen Abfallgesetzgebung zu einer Gesetzgebung, welche die Kreislaufwirtschaft fördern soll. Zunehmend werden auch die Hersteller von Bauprodukten durch gesetzliche Regelungen, wie die Bauproduktenverordnung, in die Pflicht genommen, auch den Rückbau und die Verwertung als die sich an die Nutzung anschließenden Lebensphasen eines Bauwerks stärker zu berücksichtigen und Kreislaufsyste me zu entwickeln.

Die Triebkräfte für das Recycling von Bauabfällen hängen ab von dem Verhältnis zwischen dem Bedarf an bestimmten, mit dem Bauen in Zusammenhang stehenden Materialien und Dienstleistungen sowie dem Aufkommen. Übersteigt der Bedarf das Aufkommen, wird Recycling zur Notwendigkeit. Als wichtige Faktoren stehen sich gegenüber:

- der Bedarf an Deponieraum für die Ablagerung von Bauschutt und das Aufkommen an ausgewiesenen Deponieflächen sowie
- die benötigten Mengen an Mineralstoffen und die regional vorhandenen Mengen
- die benötigten und die vorhandenen Transportkapazitäten.

Die Verknappung der für die Abfalldeponierung zur Verfügung stehenden Flächen ist in dicht besiedelten Regionen oder in Regionen, in welchen die Landwirtschaft oder der Tourismus wirtschaftliche Faktoren sind, eine wichtige Triebkraft. Praktische Konsequenz von knappem Deponieraum kann das Verbot der Deponierung von Bauschutt sein, welches beispielsweise in den Niederlanden bereits seit 1997 gilt [9]. Verwertbarer Bauschutt darf nicht deponiert werden. Nur für kontaminiertes, auch von zertifizierten Recyclinganlagen nicht verwertbares Material ist die Deponierung zulässig. Eine andere Variante besteht darin, die Deponiegebühren drastisch zu erhöhen, um die Wiederverwertung wirtschaftlich interessant zu machen.

Der Mangel an mineralischen Rohstoffen ist als Triebkraft für das Recycling bisher weniger entscheidend. So wird in einer von Weil [10] zitierten Zustandsanalyse von 1997 ein Vorrat an Sand und Kies in Deutschland von mehr als 220 Mrd. t angegeben. Wenn angenommen wird, dass davon nur 50 % für den Abbau zur Verfügung steht und dass der zukünftige Verbrauch bei 400 Mio. t/a liegt, ergibt sich daraus eine Reichweite von 275 Jahren. Die bestehenden Sand- und Kiesvorkommen decken den zukünftigen Bedarf also noch für 275 Jahre. Trotzdem kann es bei insgesamt ausreichenden Vorräten zu regionalen Verknappungen kommen, weil andere Interessen wie zum Beispiel die Walderhaltung, die Erhaltung oder Ausweitung von Bauzonen und Verkehrsflächen der Gewinnung von Sand und Kies entgegenstehen. Besonders ausgeprägt ist der Interessenkonflikt zwischen dem Grundwasserschutz und dem Sand- und Kiesabbau, da die Lagerstätten gleichzeitig Rohstoffquellen und Trinkwasserspeicher sind. Gerade in Ballungszentren kann die Deckung des Trinkwasserbedarfs Priorität vor der Deckung des Bedarfs an Sand und Kies haben.

Der Transport von Bauabfällen und der daraus hergestellten RC-Baustoffe kann für die Wirtschaftlichkeit des Recyclings entscheidend sein. Bei einem Abbruchvorhaben, bei welchem das gesamte Material vor Ort aufbereitet und verwertet werden kann, stehen sich die Kosten für das Neumaterial, das gewonnen, aufbereitet und transportiert werden muss, und die Kosten für den Abbruch und die Aufbereitung des Recyclingmaterials, das nicht transportiert werden muss, gegenüber. Wenn vereinfachend angenommen wird, dass die Kosten für Gewinnung und Aufbereitung sich nicht von denen für Rückbau und Aufbereitung unterscheiden, hat der RC-Baustoff klare wirtschaftliche Vorteile. Voraussetzung ist allerdings, dass er die Qualitätsanforderungen erfüllt.

Der beschriebene Zusammenhang wird stark vereinfacht mit den im Bild 1-3 dargestellten Szenarien nach Lauritzen [11] wiedergegeben. Der obere Teil zeigt das Szenario, bei welchem der gesamte Baustoffbedarf für einen Neubau durch Primärmaterial abgedeckt wird. Parallel dazu erfolgt ein traditioneller Abbruch eines bestehenden Gebäudes. Das Abbruchmaterial wird anschließend beseitigt. Im unteren Teil wird zumindest ein Teil des Abbruchmaterials für den Neubau eingesetzt. Das Ergebnis einer stark vereinfachten Modellrechnung für die beiden Szenarien ist im Bild 1-4 dargestellt. Wenn angenommen wird, dass die spezifischen Kosten für alle drei Prozesse – die Gewinnung und Aufbereitung des Primärmaterials, den Abbruch und

die Aufbereitung des Sekundärmaterials sowie den Abbruch und die Beseitigung des nicht aufbereiteten Abfalls - in der gleichen Größenordnung liegen, führt der verknüpfte Neu- und Rückbau zu sichtbaren Kostenvorteilen.



Bild 1-3: Gegenüberstellung der Bauwerkerrichtung ohne und mit Verwertung von RC-Baustoffen (entnommen aus [11])

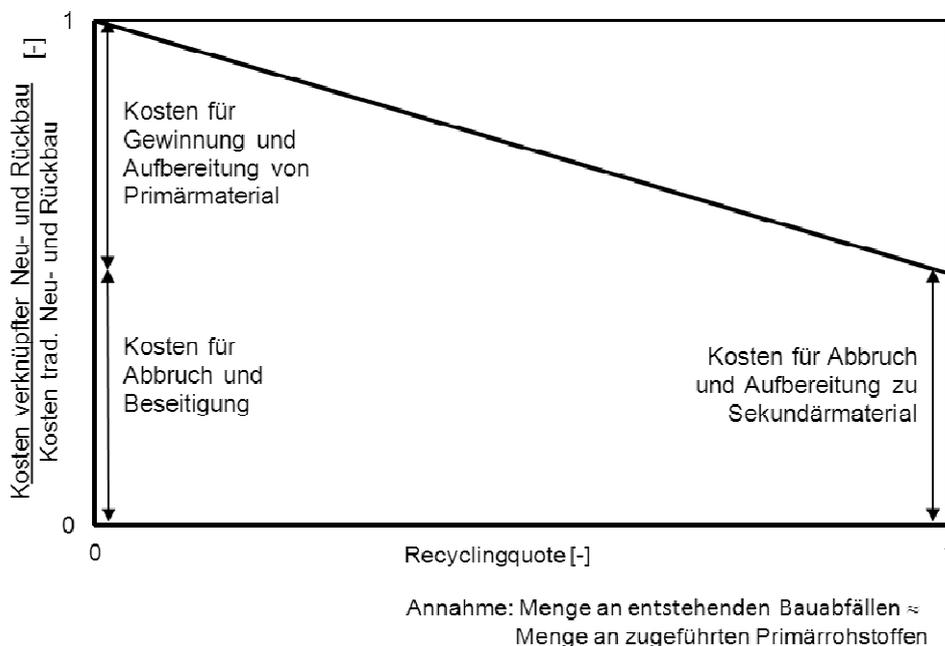


Bild 1-4: Vereinfachte Kostengegenüberstellung zwischen verknüpftem Abbruch, Aufbereiten und Errichten eines Gebäudes und traditionellem Abbruch und Errichten eines Gebäudes

Den gravierenden Einfluss der Transporte zeigt das Beispiel der Erneuerung einer Stadtautobahn in Chicago im Jahre 1978. Ohne die Vor-Ort-Verwertung des entstehenden Betonbruchs hätten Gesteinskörnungen in einer Menge von 350.000 t aus einer Entfernung von 29 km antransportiert werden müssen. Gleichzeitig hätte der

Betonbruch zu einer 24 km entfernten Deponie gebracht werden müssen. Bei einer Aufbereitung vor Ort konnten 85 % des Betonbruchs wieder eingesetzt werden. Die zu transportierenden Mengen reduzierten sich also auf jeweils 52.500 t. Die Einsparung an Dieselkraftstoff wird mit 200.000 Gallonen angegeben.

In Tabelle 1-1 ist der Energieaufwand für die Aufbereitung und den Transport für die Varianten ohne und mit Recycling gegenübergestellt. Der Energieaufwand für den Abbruch der alten Fahrbahn wurde nicht berücksichtigt, weil dieser in jedem Fall erfolgen muss. Es zeigt sich, dass der Transportenergieaufwand bei der Variante ohne Recycling dominant ist. Die Energieeinsparungen durch die Verwertung des Recyclingmaterials fallen sehr deutlich aus, selbst wenn angenommen wird, dass die Aufbereitung des Betonbruchs zu RC-Baustoff energieintensiver als die Aufbereitung von Primärmaterial ist.

Tabelle 1-1: Gegenüberstellung des Energieaufwands für die Erneuerung einer Stadtautobahn auf 24 km Länge nach [12]

	Ohne Recycling		Mit Recycling			
Materialaufkommen [t]						
	Primärmaterial	Abfall zur Beseitigung	Primärmaterial (15 %)	Abfall zur Beseitigung (15 %)	RC-Baustoff (85 %)	
	350.000	350.000	52.500	52.500	297.500	
Aufbereitung						
spez. Energieaufwand [MJ/t]	45	0	45	0	min Mittel max	43 62 84
Energieaufwand [MJ]	15.750.000	0	2.362.500	0	min Mittel max	12.792.500 18.445.000 24.990.000
Transport						
spez. Energieaufwand Lastfahrt [MJ/t*km]	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	
spez. Energieaufwand Leerfahrt [MJ/t*km]	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	
Entfernung [km]	29	24	29	24	0	
Transportenergie [MJ]	21.315.000	17.640.000	3.197.250	2.646.000	0	
Gesamtenergieaufwand [MJ]						
	54.705.000		min 20.998.250	Mittel 26.650.750	max 33.195.750	
spez. Energieaufwand für die Aufbereitung nach [10],[13]						
spez. Energieaufwand für den Transport nach [14]						

In Ballungsgebieten hat der Einsatz von RC-Baustoffen also den Vorteil, dass der Transportaufwand gesenkt werden kann. Die Rohstoffquelle rückt in die Nähe der Baustelle. Selbst wenn das Abbruchmaterial nicht vor Ort verwertet werden kann und deshalb in einer stationären Recyclinganlage verarbeitet wird, sind die Transportkosten und die Annahmegebühren die entscheidenden Kriterien. Wenn die Kosten für Neumaterial als Summe aus Gewinnungs- und Aufbereitungskosten plus Transportkosten die Kosten für das qualitätsgerechte Recyclingmaterial als Summe aus Aufbereitungskosten und Transportkosten übersteigen, ist der Einsatz von Recyclingmaterial die wirtschaftlichere Variante. Die Entscheidung zwischen Recycling oder Deponierung folgt einem ähnlichen Schema. Das Abbruchmaterial wird dorthin gebracht, wo die Summe aus den Kosten für den Transport und die Annahme des Materials gering ist. Es kann also günstiger sein, das Material zu einer weiter entfernten, stati-

onären Recyclinganlage zu transportieren, weil dort die Annahmgebühren niedriger sind als auf einer Deponie in geringerer Entfernung.

### 1.3 Typisierung von Stoffkreisläufen in der Baubranche

In der Baubranche können drei Typen von Stoffkreisläufen unterschieden werden:

- Interne Kreisläufe
- Zwischenbetriebliches Recycling, d.h. die Nutzung von Nebenprodukten anderer Industriezweige
- Kreisläufe für gebrauchte Produkte

#### *Interne Kreisläufe*

Bei internen Kreisläufen werden Produktionsabfälle nach einer entsprechenden Aufbereitung wieder in den Produktionsprozess zurückgeführt. Dieser Kreislauftyp etabliert sich zunehmend. Es ist nur ein Akteur daran beteiligt. Die Abfallzusammensetzung bewegt sich in engen, bekannten Grenzen. Einige Beispiele für interne Kreisläufe sind:

- Die Rückführung von Transportbetonresten, die aus Reinigungsvorgängen stammen oder die als Rückgut von der Baustelle zurückkommen, in die Produktion.
- Die Verwertung von Verschnittabfällen aus der Konfektionierung von Gipskartonplatten als Rohstoff für die Gipsherstellung.

Die internen Kreisläufe verlangen in der Regel eine spezielle Materialaufbereitung. Außerdem sind Qualitätsparameter für das rückgeführte Material festzulegen, um Auswirkungen auf die Qualität des Endprodukts zu verhindern. Zusätzlich erfolgt oftmals eine Begrenzung der Rückführmenge. Die in diesem Fall vergleichsweise guten Kenntnisse über das rückgeführte Material und die Schwankungsbreiten, die aus der Produktpalette ableitbar sind, machen die internen Kreisläufe kalkulierbar und praktikabel.

#### *Zwischenbetriebliches Recycling*

Beim zwischenbetrieblichen Recycling werden die bei bestimmten Produktionsprozessen anfallenden Reststoffe für die Herstellung anderer Produkte genutzt. Bei der Baustoffherstellung wird das bereits in großem Umfang praktiziert. So kann die Herstellung von Hüttenzementen aus Zementklinker und Hütten sand, der bei der Roheisenherstellung anfällt, auf eine über hundertjährige Tradition zurückblicken. Jüngere Beispiele sind die Verwertung von Kraftwerksnebenprodukten zur Herstellung von Zementen und Baugipsen oder die stoffliche Verwertung von Abfällen der Papierindustrie bei der Ziegelherstellung. Auch bei diesen Kreisläufen ist die Anzahl der beteiligten Akteure überschaubar und die Zusammensetzung der verwerteten Nebenprodukte definiert.

#### *Kreisläufe für gebrauchte Produkte*

Die Kreisläufe für gebrauchte Produkte als dritte Kategorie stellen eine besondere Herausforderung dar. Obwohl das Bauwesen auch hier auf Beispiele aus den verschiedensten Epochen verweisen kann, ist die Aufgabenstellung für das moderne

Recycling von Bauabfällen eine völlig andere. So war Recycling von Baumaterialien im antiken Rom eine Frage der begrenzten Transportmöglichkeiten. Das Recycling von Trümmerschutt nach dem 2. Weltkrieg war durch den enormen Rohstoffbedarf ebenso wie durch einen Mangel an Transportkapazität begründet. Das moderne Recycling zielt auf die Materialverwertung in geschlossenen Kreisläufen ab, indem Produkte nach Ablauf ihrer Nutzungsdauer in den Stoffkreislauf der Wirtschaft zurückgeführt werden. Dabei kann die Rückführung die nochmalige Nutzung für den ursprünglichen Zweck bedeuten, wobei entweder lediglich eine Aufarbeitung des gebrauchten Produktes erfolgt, oder eine Aufbereitung, bei der eine vollständige Aufhebung der ursprünglichen Produktgestalt vorgenommen wird. Ebenso kann das Recycling auch die Überführung in einen Rohstoff zum Ziel haben. Folgende Varianten der Rückführung können unterschieden werden:

- Die gebrauchten Produkte werden in ihrer ursprünglichen Gestalt und für den ursprünglichen Zweck verwendet.
- Die gebrauchten Produkte werden aufbereitet, um das ursprüngliche Produkt bzw. ein Produkt, das dem ursprünglichen Produkt vergleichbare Funktionen aufweist, zu erzeugen.
- Es erfolgt eine Verwertung in anderen, meist deutlich geringwertigeren Einsatzgebieten.
- Die gebrauchten Produkte werden zu Rohstoffen verarbeitet. Diese Variante ist allerdings nur für bestimmte Werkstoffe oder Produkte technologisch möglich.

In der VDI-Richtlinie 2243, Fassung von 1993 [15], sind Definitionen für das Recycling von Bauteilen des Maschinenbaus angegeben. Folgt man diesen Definitionen und Begriffen und überträgt sie sinngemäß auf das Bauwesen (Tabelle 1-2), so ist zwischen Produkt- und Materialrecycling zu unterscheiden. Produktrecycling bedeutet die Wieder- und Weiterverwendung von Baustoffen und Bauteilen in ihrer ursprünglichen Gestalt und in der Regel für den ursprünglichen Verwendungszweck. Materialrecycling ist die Verwertung nach einer Behandlung, bei welcher die ursprüngliche Gestalt des Baustoffs durch eine Zerkleinerung oder andere technologische Schritte aufgelöst wird. Die Verwertung kann anschließend im ursprünglichen Produkt oder in einem anderen Einsatzfeld erfolgen.

Im Bauwesen sind für das Produktrecycling der selektive Rückbau und/oder spezielle Rückgabesysteme erforderlich, um unvermischte und unbeschädigte Produkte oder Bauteile zu erhalten. Eine Zwischenlagerung, Säuberung und Reparatur muss sich anschließen. Beim Materialrecycling ist die Rückgewinnung von möglichst sortenreinem Abbruchmaterial der Stoffgruppen Beton, Mauerwerk, Holz und Metall anzustreben. Unbedingt notwendig ist die Separation von Schadstoffen, worunter umweltunverträgliche Substanzen verstanden werden, und von Störstoffen, die die bautechnischen Eigenschaften negativ beeinflussen. Die Aufbereitung erfolgt unter Berücksichtigung der Spezifika der Stoffgruppen. Die erzeugten Produkte können entweder separat oder zusammen mit Primärprodukten verarbeitet werden.

Tabelle 1-2: Bezeichnungen und Beispiele zum Baustoffrecycling in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2243

	Primärverwendung	Behandlungsprozeß	Behandlungsschritte	Sekundärverwendung
Produktrecycling: Gestalt bleibt erhalten				
Wiederverwendung	Natursteinpflaster	keine	keine	Natursteinpflaster
	Dachziegel	Aufarbeitung	selektive Rückgewinnung Reinigen Prüfen	Dachziegel
	Türen	Aufarbeitung	Demontage Reinigen Instandsetzen	Türen
Weiterverwendung	Balken	Umarbeitung	Demontage Reinigen Bearbeiten	Hirnholzplaster
Materialrecycling: Gestalt wird aufgelöst				
Wiederverwertung	Betondachsteine	Aufbereitung	selektiver Rückbau Zerkleinern Rückführen	Gesteinskörnung für Betondachsteine
Weiterverwertung	Altbeton	Aufbereitung	Vorsortieren Zerkleinern Klassieren	Tragschichtmaterial

Zusätzlich zu den oben genannten Möglichkeiten kann auch bei mineralischen Baustoffen ein rohstoffliches Recycling erfolgen, welches auf die chemischen Bestandteile der Bauabfälle zurückgreift. CaO-reiche Bauabfälle wie Betone mit Kalksteingesteinskörnungen oder besonders Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-reicher Ziegelbauschutt können als Rohstoffkomponenten für die Zementherstellung genutzt werden. Eine andere Möglichkeit stellt die Herstellung von leichten Gesteinskörnungen aus Mauerwerkbruch dar [16]. Das rohstoffliche Recycling stellt die „radikalste“ Methode des Recyclings dar. Alle ursprünglichen physikalischen Eigenschaften werden aufgehoben. Ein Produkt mit neuen Eigenschaften entsteht. Die Heterogenität wird beherrschbar.

Das Verwertungs-niveau beim Recycling kann sehr unterschiedlich sein (Tabelle 1-3:). Upcycling bedeutet, dass aus dem Abfall ein hochwertiges, neues Produkt hergestellt wird. Downcycling bedeutet, dass das aus dem Abfall hergestellte Produkt die ursprünglichen Qualitätsanforderungen nicht mehr erfüllt und in untergeordneten Einsatzgebieten verwertet wird. Der Niveaugewinn beim Upcycling ist immer mit einem zusätzlichen Energieaufwand im Vergleich zu Verwertung auf sehr niedrigem Niveau verbunden, weil aufwändigere Herstellungstechnologien durchlaufen werden müssen. Dieser zusätzliche Energieaufwand ist ökologisch und ökonomisch vertretbar, wenn er unter dem Aufwand für die Herstellung eines vergleichbaren Primärproduktes bleibt und/oder wenn erreicht werden kann, dass das Sekundärprodukt in seinen Eigenschaften dem Primärprodukt überlegen ist.

Tabelle 1-3: Beispiele und Anforderungen für das Recycling auf unterschiedlichen Verwertungsniveaus

Verwertungsniveau		
Upcycling	Recycling	Downcycling
hoher verfahrenstechnischer Aufwand	mittlerer verfahrenstechnischer Aufwand	geringer verfahrenstechnischer Aufwand
Beispiel		
Mauerwerk → leichte Gesteinskörnungen	Beton → rezyklierte Gesteinskörnung für Beton	Mauerwerk → Verfüllungen, Bodenverbesserung
Voraussetzungen		
Zerkleinerung, Mahlung, Zugabe eines Blähmittels, Granulation, Brennen im Drehrohrofen	selektive Gewinnung durch Rückbau Separation von Stör- und Schadstoffen, Zerkleinerung, Klassierung	Separation von Schadstoffen Verarbeitung mit traditionellen Technologien

Die Spezifika des Recyclings im Bauwesen bestehen u.a. darin, dass das Produkt „Bauwerk“ besonders langlebig ist und sich aus einer großen Anzahl unterschiedlichster Stoffe zusammensetzt. Außerdem sind an der Errichtung eines Bauwerks sehr viele Akteure beteiligt. Ein Labelling des Produktes „Bauwerk“ als Ganzes ist bisher nicht üblich. Im Unterschied zu kurzlebigeren Konsumgütern kann der Hersteller kaum eindeutig ausgemacht werden. Das erschwert die eindeutige Zuordnung der Produktverantwortung und bietet kaum Anreiz zur Entwicklung recyclinggerechter Produkte als Voraussetzung für ein zukünftiges, effektiveres Recycling. Vielmehr ist eine ständig zunehmende Produktvielfalt zu verzeichnen. Die Entwicklung und Anwendung von Verbundbaustoffen steigt an, ohne dass parallel dazu neue Technologien für ihre Verwertung entwickelt werden.

#### 1.4 Stoffbilanz und anthropogenes Baustofflager

Stoffkreisläufe lassen sich in abgegrenzten Systemen darstellen, indem die in das System ein- und austretenden Stoffströme, die im System ablaufenden Prozesse und die zwischen den Prozessen zirkulierenden Stoffströme erfasst werden. Unter den Prozessen werden beispielsweise die Herstellung eines Ausgangsstoffes, die Weiterverarbeitung zu einem Produkt oder der Konsum verstanden. Die Stoffströme können aus Rohstoffen, Produkten oder Abfällen bestehen. Sowohl für das Gesamtsystem als auch für die einzelnen Prozesse können Bilanzen aufgestellt werden, die auf dem Grundprinzip der Erhaltung der Masse basieren. Es kann zwischen einem stationären und einem quasistationären Fall unterschieden werden:

- Im stationären Fall ist die Summe der eintretenden Stoffströme gleich der Summe der austretenden Stoffströme. Dieser Fall gilt für den Prozess der Produktherstellung. Hier ist die im Prozess verarbeitete Rohstoffmenge gleich der Produktmenge zuzüglich eventuell entstehender Produktionsrückstände und Emissionen. Bei der Nutzung bzw. dem Konsum des erzeugten Produktes stimmen der Input und der Output nur dann überein, wenn keine Lagerbildung erfolgt. Das ist bei kurzlebigen Produkten wie beispielsweise Verpackungen oder kurzlebigen Konsumgütern näherungsweise der Fall.
- Im quasistationären Fall unterscheidet sich die Summe der eintretenden Stoffströme von der der austretenden Stoffströme. Diese Ungleichheit führt zu einem Aufbau oder Abbau eines Stofflagers. Im Bauwesen überwiegt bisher der

Aufbau von Stofflagern, die aus den unterschiedlichsten Bauwerken gebildet werden. Hier ist der Input wesentlich größer als der Output.

Die Aufstellung von Stoffbilanzen beginnt mit der Auswahl des Systems, der Festlegung der Systemgrenzen und der Ermittlung der in dem System ablaufenden Prozesse. Im zweiten Schritt müssen die Stoffströme innerhalb des Systems identifiziert und durch Messungen oder Recherchen zahlenmäßig erfasst werden. Anschließend können die Bilanz schematisch dargestellt und die Resultate interpretiert werden.

Für den Baustoffkreislauf ist die Bildung umfangreicher Stofflager symptomatisch. Sie bestehen aus Gebäuden, Straßen, Brücken, Tunneln, Versorgungs- und Entsorgungseinrichtungen etc. Für eine vollständige Beschreibung des Baustoffkreislaufes wären deshalb zusätzlich zu den Stoffströmen auch die vorhandenen Stofflager zu beziffern. Diese sind allerdings nur mit großen Unsicherheiten abzuschätzen. In Tabelle 1-4 sind die für die Baubranche relevanten Stoffströme unter Verwendung von Daten der Deutsche Rohstoffagentur DERA und der Bau- und Recyclingwirtschaft [17],[18] zusammengefasst. Anpassungen der Daten untereinander waren erforderlich. Sie wurden in Anlehnung an Weil [10] vorgenommen.

Tabelle 1-4: Angaben zum jährlichen Rohstoffverbrauch, zur Abfallentstehung und -verwertung in der Baubranche

Input 2010			
Hochbau	Mio. t/a	Tiefbau	Mio. t/a
Gesteinskörnungen für die Mörtel- und Betonherstellung	171,8	Gesteinskörnungen für ungebundene Anwendungen	160,8
Kies/Sand für sonstige Anwendungen	13,4	Gesteinskörnungen für die Betonherstellung	76,9
Rezyklierte Gesteinskörnungen	0,8	Kies/Sand für sonstige Anwendungen	24,1
		Industrielle Nebenprodukte	31,5
		RC-Baustoffe	64,4
Summe Gesteinskörnungen	186,0	Summe Gesteinskörnungen	357,7
Rohstoffe für die Baustoffherstellung		Rohstoffe für die Baustoffherstellung	
Kalkstein für Zement	26,0	Kalkstein für Zement	19,3
Sand u.a. für Kalksandsteine	5,9		
Sand u.a. für Porenbeton	0,8		
Ton für Ziegel	8,8		
Gips	8,3		
Gesamtsumme	235,8	Gesamtsumme	377,0
Output 2010		Verwertungssektoren	
	Mio. t/a		Mio. t/a
<i>Bauschutt</i>		Straßenbau	35,1
Aufbereitung	41,6	Erdbau	14,6
Sonstige Verwertung	9,3	Beton und Asphalt	11,0
Beseitigung	2,2	Sonstiges	4,5
Summe	53,1	Summe	65,2
<i>Straßenaufbruch</i>			
Aufbereitung	13,5		
Sonstige Verwertung	0,4		
Beseitigung	0,2		
Summe	14,1		
<i>Baustellenabfälle</i>			
Aufbereitung	0,3		
Sonstige Verwertung	12,3		
Beseitigung	0,4		
Summe	13,0		

<i>Boden, Steine und Baggergut</i>	
Aufbereitung	9,8
Verfüllung von Abgrabungen	74,2
Sonstige Verwertung	9,2
Beseitigung	12,5
Summe	105,7

Die Gesamtmenge an Rohstoffen als Summe aus Primärrohstoffen einschließlich der für die Baustoffherstellung benötigten Rohstoffe, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten betrug im Jahr 2010 613 Mio. t. Davon wurden ca. 40 % im Hochbau verbraucht, 60 % flossen in den Straßen- und Tiefbau. Die Materialmengen aus dem Abbruch von Bauwerken einschließlich der gemischten Bau- und Abbruchabfälle beliefen sich im Jahr 2010 auf insgesamt 80,2 Mio. t. Daraus wurden 55,4 Mio. t RC-Baustoffe hergestellt, die zusammen mit den 9,8 Mio. t Gesteinskörnungen, die aus den anfallenden Böden, Steinen und Baggergut erzeugt wurden, wieder eingesetzt wurden. Somit wurden insgesamt 65,2 Mio. t RC-Baustoffe erzeugt, die hauptsächlich im Straßen- und Erdbau verwertet wurden. Die Differenz zwischen dem Materialinput an Primär- und Sekundärrohstoffen und dem Output beläuft sich auf über 500 Mio. t. Sie stellt den Zuwachs des Materiallagers im Bauwerksbestand in dem betrachteten Jahr dar.

Anhand der Angaben zu den Stoffflüssen kann der Baustoffkreislauf schematisch dargestellt werden (Bild 1-5). Dabei treten Prozesse ohne Lagerbildung wie die Aufbereitung der Bauabfälle auf. Parallel dazu kommt es zur Lagerbildung im Hochbau, im Tiefbau und auf Deponien.

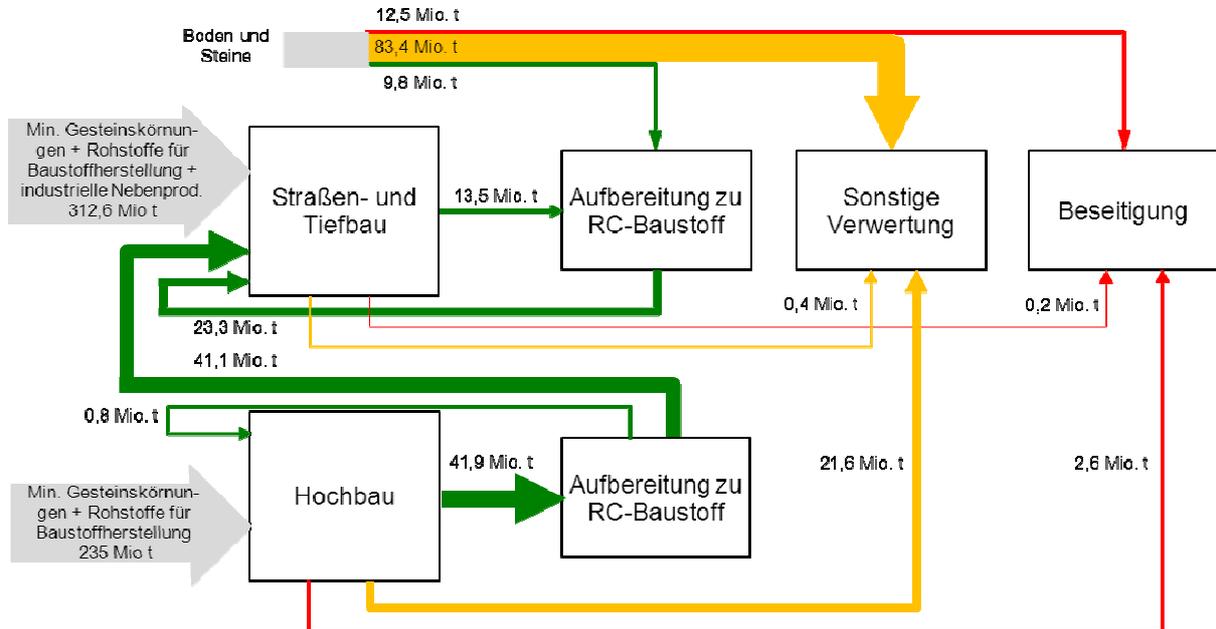


Bild 1-5: Vereinfachte Stoffbilanz für den Baustoffkreislauf

Als Kennwerte für die Bewertung von Stoffkreisläufen mit Lagerbildung eignen sich die Recyclingquote sowie die Substitutionsquote, für welche folgende Definitionen gelten:

$$Recyclingquote = \frac{M_{RC}}{M_{R+A}}$$

$$\text{Substitutionsquote bezogen auf min. Gesteinskörnungen} = \frac{M_{RC}}{M_{R+A}}$$

mit  $M_{RC}$ : Produzierte Menge an RC-Baustoffen  
 $M_{R+A}$ : Menge an Bauabfällen durch Rückbau und Abbruch  
 $M_{\text{min.GK}}$ : Verbrauch der Bauindustrie an mineralischen Gesteinskörnungen

Die Recyclingquote beschreibt den Grad der Kreislaufführung, der für die Abfälle der Baubranche erreicht ist. Im Jahr 2010 betrug diese 69,1 % ohne Einbeziehung der aus Bodenaushub gewonnenen RC-Baustoffe. Für Straßenaufbruch wurden die höchsten Recyclingquoten von 95,7 % erzielt. Für Bauschutt aus dem Hochbau betrug die Quote 78,3 %. Baustellenabfälle als sehr heterogenes Material wurden zu 2,3 % recycelt.

Die Substitutionsquote gibt an, wie viel der in der Baubranche verbrauchten Rohstoffe durch RC-Baustoffe ersetzt werden können. Sie betrug für das Jahr 2010 14,6 %, wobei als Bezugsbasis der Bedarf der Bauindustrie an natürlichen Gesteinskörnungen eingesetzt wurde und die RC-Baustoffe aus Bodenaushub Berücksichtigung fanden. Aus der hypothetischen Überlegung, dass die gesamte Menge an Abbruchmaterial ohne Verluste zu RC-Baustoffen verarbeitet wird, kann ein theoretischer Grenzwert für die Substitutionsquote berechnet werden, der bei etwa 20 % liegt. Dieser relativ geringe Wert ergibt sich in erster Linie aus der Tatsache, dass infolge der Lagerbildung nur ein geringer Teil der verbrauchten Rohstoffe als Ressource zur Verfügung steht.

Das insgesamt in Bauwerken aufgehäufte Lager an Baustoffen ist kaum genau zu beziffern. Eine von Weil [10] zitierte Abschätzung für 1991 ergab eine Gesamtmasse des Stofflagers im Hochbau von 10.100 Mio. t. Nach neueren, 2010 veröffentlichten Berechnungen [19] beträgt allein das Baustofflager „Wohnen“ 10.128 Mio.t. Dazu kommt das Baustofflager, das in Gewerbebauten, im Straßen- und Schienennetz, in sonstigen Verkehrs- und Versorgungsbauten sowie in Industriebauten enthalten ist. Davon ist nur der Bestand im Straßen- und Schienennetz annäherungsweise anzugeben, wenn bestimmte Annahmen zum spezifischen Baustoffinhalt gemacht werden [20]. Die Summation der Baustoffmengen in Wohnbauten sowie in Straßen- und Eisenbahnverkehrsnetzen ergibt einen Wert von 21.000 Mio.t.

Die summarischen Angaben zum Baustofflager sind wenig anschaulich. Eine Alternative stellen einwohnerspezifische Materialmengen dar, die sich auf Länder, Regionen oder Städte beziehen. Nach in [21] zitierten Angaben betragen diese Materialmengen 350 t/Einwohner für Wien im Jahr 1996 bzw. 400 t/Einwohner für die Schweiz. Für die Steiermark belief sich der Lagerbestand im Jahr 1994 auf 540 Mio. t mit einer jährlichen Wachstumsrate von 1 – 2 % [22], woraus sich eine spezifische Materialmenge von 450 t/Einwohner ergibt. Bei einfacher Übertragung der spezifischen Werte auf Deutschland ergibt sich ein Baustofflager zwischen 28.000 und 36.000 Mio. t.

Gefolgert werden kann, dass das anthropogene Baustofflager einen erheblichen Umfang erreicht hat. Auch wenn es noch deutlich unter den vorhandenen Vorräten an Kies und Sand, die für Deutschland auf 220.000 Mio. t geschätzt werden bleibt, wird es zukünftig stärker als Rohstofflager zu berücksichtigen sein.

## Literaturverzeichnis

- [1] Press, F.; Siever, R.: Allgemeine Geologie. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, Berlin, 3. Auflage 2003.
- [2] Mineralische Bauabfälle: Monitoring 2010. Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. Berlin 2013.
- [3] Reith, R.: Recycling – Stoffströme in der Geschichte. Querschnitte 8: Umweltgeschichte. Herausgegeben von Sylvia Hahn, Reinhold Reith. Wien: Verl. für Geschichte und Politik; München: Oldenbourg, 2001.
- [4] DIN 4136: Ziegelsplittbeton, Bestimmungen für die Herstellung und Verwendung, 1951 (zurückgezogen).
- [5] Plank, A.; Weber, D.: Ziegelsplitt-Schüttbeton – Untersuchung eines Schadenfalles. Bautechnik 5/1986. S. 156 – 163.
- [6] Kropp, J.; Wöhl, U.: 50 Years of Service Records for Recycling Aggregates Concretes, Germany. European Thematic Network on the Use of Recycled Aggregates in the Construction Industry. Issue 3 & 4, March/September 2000.
- [7] Kilian, A: Persönliche Mitteilung, Ziegelbauberatung 1994
- [8] Krüger, W.: Neue Recyclinganlage zur Herstellung von Baustoffen aus Bauschutt in Düsseldorf. Aufbereitungs-Technik (1984), Nr.10, S. 613-614.
- [9] Construction and demolition waste management practices and their economic impacts. Final Report to DGXI, European Commission, February 1999. Report by Symonds, in association with ARGUS, COWI and PRC Bouwcentrum.
- [10] Weil, M.: Ressourcenschonung und Umweltentlastung bei der Betonherstellung durch Nutzung von Bau- und Abbruchabfällen. Dissertation. Schriftenreihe WAR der Technischen Universität Darmstadt. Heft 160. Darmstadt 2004.
- [11] Lauritzen, E.K.: The global challenge of recycled concrete. Sustainable Construction. Use of Recycled Concrete Aggregate. S. 505-519. Thomas Telford Publishing, London 1998.
- [12] Yrjanson, W.A.: Recycling of Portland Cement Concrete Pavements. National Cooperative Highway Research Program 154. Transportation Research Board, Washington, D.C. 1989.
- [13] Kümmel, J.: Ökobilanzierung von Baustoffen am Beispiel des Recyclings von Konstruktionsleichtbeton. Dissertation. Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart. Stuttgart 2000.
- [14] Spyra, W; Mettke, A; Heyn, S.: Ökologische Prozessbetrachtungen - RC-Beton. Projektbericht, Cottbus 2010.
- [15] VDI-Richtlinie 2243: Konstruieren technischer Produkte. Grundlagen und Gestaltungsregeln. Fassung Oktober 1993.
- [16] Müller, A.; Schnell, A.; Rübner, K.: Aufbaukörnungen aus Mauerwerkbruch. Chemie Ingenieur Technik 84 (2012), No. 10, 1–13.
- [17] Mineralische Bauabfälle. Monitoring 2010. Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V., Berlin 2013.
- [18] Dera Deutsche Rohstoffagentur DERA: Deutschland Rohstoffsituation 2010: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover, Dezember 2011.
- [19] Schiller, G.; Deilmann, C.: Ermittlung von Ressourcenschonungspotenzialen bei der Verwertung von Bauabfällen und Erarbeitung von Empfehlungen zu deren Nutzung. Umweltbundesamt, Texte, 56, Dessau 2010.
- [20] Baccini, P.; Bader, H.-P.: Regionaler Stoffhaushalt. Erfassung, Bewertung und Steuerung. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, Berlin, Oxford 1996.

- [21] Rechenberger, H.: Urban Mining – städtebauliche Rohstoff-Potenziale. 1. Internationaler BBB-Kongress Dresden 15.09.2011. <http://www.bbb-kongress.de/Programm.html>
- [22] Glenck, E. et al.: Bauwesen – Abfallstrategien in der Steiermark. Band 3: Lageraufbau im Bauwesen. Technische Universität Wien 2000.