

Autorinnen und Autoren

Dr. Clemens Mostert
Dr. Husam Sameer
Dilan Glanz
Prof. Dr. Stefan Bringezu
Prof. Dr. Anja Rosen

BBSR-
Online-Publikation
15/2021

Neubau aus Rückbau



Neubau aus Rückbau

Wissenschaftliche Begleitung der Planung und Durchführung des selektiven Rückbaus eines Rathausanbaus aus den 1970er-Jahren und der Errichtung eines Neubaus unter Einsatz von Urban Mining (RückRat)

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Auftrag des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-18.20

Projektlaufzeit: 12.2018–11.2020

Impressum

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuer

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat WB 3 „Forschung im Bauwesen“
Daniel Wöffen
daniel.woeffen@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

Universität Kassel, Center for Environmental Systems Research (CESR), Kassel

Dr.-Ing. Clemens Mostert (Projektleitung)
mostert@uni-kassel.de

Dr.-Ing. Husam Sameer
husam.sameer@uni-kassel.de

Dilan Glanz, M.Sc.
glanz@cesr.de

Prof. Dr. Stefan Bringezu (wissenschaftliche Leitung)
bringezu@uni-kassel.de

energum GmbH, Ibbenbüren
Prof. Dr.-Ing. Architektin Anja Rosen
a.rosen@energum.de

Redaktion

Dr.-Ing. Clemens Mostert

Gestaltung

Dilan Glanz

Stand

März 2021

Bildnachweis

Titelbild: ARGE agn-heimspielarchitekten
ARGE agn-heimspielarchitekten: S. 21
Google Earth: S. 22
Fotografin Dilan Glanz: S. 34, 35, 36
INTEGRA Windsichter GmbH: S. 36

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Mostert, C., Sameer, H.; Glanz, D.; Bringezu, S.; Rosen, A.: Neubau aus Rückbau – Wissenschaftliche Begleitung der Planung und Durchführung des selektiven Rückbaus eines Rathausanbaus aus den 1970er-Jahren und der Errichtung eines Neubaus unter Einsatz von Urban Mining (RückRat). BBSR-Online-Publikation 15/2021, Bonn, August 2021.

Mit freundlicher Unterstützung der

Stadt Korbach – Stadtbauamt

Dipl.-Ing. Architekt Stefan Bublak
im Rathaus Korbach
Prof.-Kümmell-Straße 9
34497 Korbach

ARGE agn-heimspiel architekten

Groner Allee 100
49479 Ibbenbüren

energum GmbH

Groner Allee 100
49479 Ibbenbüren

Bimolab gGmbH

Dipl.-Ing. Dipl. Wirt.-Ing. (FH) Harald Kurkowski
Am Kuhfuß 21
59494 Soest

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	7
Abstract	8
1 Problemstellung	9
2 Ausgangsbasis	10
2.1 R-Beton Pilotprojekte	10
2.2 Regelwerke	11
2.2.1 Anforderungen an RC-Gesteinskörnung	11
2.2.2 Umweltverträglichkeit	12
2.2.3 Herstellung von R-Beton	12
2.2.4 Erweiterte Erstprüfung	14
2.2.5 Produktionskontrolle	15
2.2.6 Kennzeichnung und Lieferschein	15
2.3 Rückbauprozess und Aufbereitungstechnologien	15
2.3.1 Selektiver Rückbau	15
2.3.2 Schadstoffentfrachtung	16
2.3.3 Bauschutttaufbereitung	18
3 Forschungsteam	19
4 Forschungsmethode	21
4.1 Baumaßnahme	21
4.2 Forschungsprojekt	22
5 Ergebnisse	26
5.1 Begleitung und Dokumentation des Rückbaus	26
5.1.1 Grundlagenermittlung und Vorplanung	26
5.1.2 Ermittlung von Bestandsmassen und Recyclingpotentialen	26
5.1.3 Verwertbarkeit der mineralischen Bau- und Abbruchabfälle	28
5.1.4 Planung zum Einsatz der RC-Gesteinskörnung im Neubau	30
5.1.5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	30
5.1.6 Ausschreibung der Rückbauleistungen	31
5.1.7 Umsetzung des selektiven Rückbaus	33
5.1.8 Dokumentation der Massen und Verwertungswege und Prüfung der Mineralischen Abbruchabfälle nach DIN 4226-101	35
5.2 Aufbereitung und Herstellung R-Beton	36
5.2.1 Aufbereitung des mineralischen Bauschutts	36
5.2.2 Herstellung von R-Beton	37
5.2.3 PLAN - IST Vergleich	37
5.3 Ökologische Bewertung	38
5.3.1 Systemgrenzen und Szenarien	39
5.3.2 Funktionelle Einheit	41
5.4 Indikatoren	42
5.4.1 Produkt-Materialfußabdruck	42

5.4.2	Produkt-Wasserfußabdruck	42
5.4.3	Produkt-Klimafußabdruck	43
5.4.4	Produkt-Energiefußabdruck	43
5.4.5	Software, Datenbank und Modellierung	43
5.5	Material- und Energieflussbilanz der Entsorgungsphase	43
5.5.1	Bauschuttzubereitung in einer mobilen Anlage	45
5.5.2	Bauschuttzubereitung in einer stationären Anlage	46
5.6	Material- und Energieflussbilanz der Betonherstellung	47
5.6.1	Betrachtung auf Gebäudeebene	48
5.7	Ergebnisse der Fußabdruckanalyse	49
5.7.1	Entsorgungsphase (C1-C3)	49
5.7.2	Herstellung von RC-	51
5.7.3	Gesteinskörnung Betonherstellung	52
5.8	Erweiterte Szenarioanalyse	54
6	Fazit	57
7	Verzeichnisse	60
7.1	Literatur	60
7.2	Abbildungsverzeichnis	65
7.3	Tabellenverzeichnis	67
7.4	Publikationsliste	68
8	Anhang	69
8.1	Anhang A	69
8.2	Anhang B	72
8.3	Anhang C	74
8.4	Anhang D	75
8.5	Anhang E	78
8.6	Anhang F	81
8.7	Anhang G	83

Kurzfassung

Der Bausektor in Deutschland benötigt derzeit etwa ein Drittel der Energie sowie die Hälfte der Rohstoffe (BMUB, 2016; Sobek, 2011). In Deutschland werden jedes Jahr über 500 Mio. Tonnen Bauminerale, insbesondere Kies, Sand und Kalkstein gewonnen (Lutter et al., 2018). Gleichzeitig fallen bundesweit jährlich etwa 60 Mio. Tonnen Bauschutt an (DESTATIS, 2018). Im Hochbau sind der Abbruch und die Aufbereitung von Beton zu Gesteinskörnung bereits gängige Praxis, wobei das Rezyklat jedoch bisher fast ausschließlich als Schüttmaterial im Tiefbau eingesetzt wird. Die Verwendung für die Herstellung von R-Beton zum Einsatz im Hochbau findet bisher nur in wenigen Pilotprojekten statt. Bei der Herstellung von R-Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung können natürliche Primärrohstoffe wie Sand und Kies eingespart werden. Die Aufbereitung von Betonbruch ist jedoch energieaufwendig, kann je nach Verfahren den zusätzlichen Einsatz von Wasser erfordern und durch einen gegebenenfalls erhöhten Bedarf an Zement kann sich die Treibhausgasbilanz insgesamt verschlechtern. Daher ist in jedem Fall eine vergleichende, ökologische Bewertung erforderlich, wie beispielsweise eine Fußabdruck-Analyse, um Problemverlagerungen zu erkennen und zu vermeiden. Mit dem vorliegenden Projekt wurden beispielhaft die Bedingungen eruiert, unter denen Urban Mining zur klimaschonenden Nettoeinsparung von stofflichen Ressourcen im Hochbau beitragen kann. Dabei wurde praxisnah geklärt, welche Informationen benötigt werden, um Ressourceneinsparungen einerseits und mögliche gegenläufige Umweltbelastungen andererseits ex-ante und ex-post zu quantifizieren und zu bewerten. Es wurde die Frage beantwortet, unter welchen Bedingungen der Einsatz von R-Beton im Baubereich zu einer erhöhten Ressourceneffizienz, Klimaverträglichkeit und Nachhaltigkeit insgesamt beitragen kann. Die hierfür benötigten Informationen konnten im Zuge eines realen Urban Mining-Projekts in Zusammenarbeit mit den beteiligten Akteuren erhoben, in ein softwarebasiertes Modell integriert und die Funktionalität verfügbarer Ökobilanz-Software-Lösungen getestet werden.

Die Erfahrung aus dem Projekt hat gezeigt, dass sich in der Literatur verfügbare Daten häufig nicht auf eine konkrete Baumaßnahme übertragen lassen. Nur mit einer fallspezifischen Betrachtung können die Ressourceneinsparungen und Umweltbelastungen adäquat abgebildet werden. Die Ergebnisse der vergleichenden Analyse aus dem vorliegenden Projekt zeigen, dass sich durch den Einsatz von 35 bis 43 % RC-Gesteinskörnung der Materialfußabdruck des R-Betons um bis 31 bis 37 % im Vergleich zu konventionellem Beton senken lässt. Während sich der Wasserfußabdruck mit der Verwendung eines Trockenaufbereitungsverfahrens um etwa 9 bis 14 % reduziert, kann der Einsatz eines Nassverfahrens zu einem erheblichen Mehrverbrauch an Wasser führen. Der Klimafußabdruck von R-Beton ließ sich um etwa 1 bis 7 % im Vergleich zu konventionellem Beton senken, da sowohl der Transportaufwand als auch der Energiebedarf für die Herstellung der RC-Gesteinskörnung geringer ausfiel als für die Bereitstellung natürlicher Gesteinskörnung. Für zukünftige Urban Mining-Projekte können mit den gewählten Fußabdruck-Indikatoren richtungssicher Ressourceneffizienzpotentiale aufgezeigt und Maßnahmen zur Verminderung von Umweltbelastungen identifiziert werden. Abschließend lässt sich festhalten, dass zur Reduzierung des Klimafußabdrucks im Baubereich Bestandsgebäude mit einem hohen Stahlbetonanteil bevorzugt erhalten und energetisch saniert werden sollten, um die Energieaufwendungen und Klimawirkungen des Rückbaus und der Zementherstellung zu vermeiden. Bei der Planung neuer Gebäude sollte der Anteil von Stahlbeton auf ein möglichst geringes Maß reduziert werden und die eingesetzten Betonbauteile so konstruiert sein, dass sie als Bauelemente komplett wiederverwendet werden könnten, um beim Rückbau nicht energieintensiv zu RC-Material aufbereitet werden zu müssen. Hinsichtlich der Entwicklung und des Einsatzes demontagefähiger Betonkonstruktionen besteht jedoch noch vielfältiger Forschungsbedarf. Die für die Baupraxis relevanten Erfahrungen aus diesem Projekt werden in einem Leitfaden dokumentiert, der gesondert veröffentlicht wird.

Abstract

The German construction sector currently uses about one-third of the energy and half of the raw materials consumed in Germany annually (BMUB, 2016; Sobek, 2011). More than 500 million tonnes of construction minerals, especially gravel, sand and limestone are extracted each year in Germany (Lutter et al., 2018). At the same time, around 60 million tonnes of construction waste are generated annually (DESTATIS, 2018). The processing of demolished concrete into recycled (RC)-aggregates is common practice in the construction sector, but the aggregates are almost exclusively used as filling material especially in road construction. The use of RC-aggregates to produce recycled (RC)-concrete for construction purposes has mostly been limited to pilot projects. By producing concrete with RC-aggregates, natural aggregates such as gravel and sand can be saved. However, the deconstruction and processing of concrete waste is energy-intensive and may require the additional use of water depending on the waste treatment process. As RC-concrete may require additional cement use, the overall greenhouse gas emissions may increase compared to conventional concrete. Therefore, a comparative, ecological assessment, such as a footprint analysis, is necessary in order to identify and avoid trade-offs and problem shifting.

The aim of this project was to determine the conditions under which urban mining can contribute to net savings of material resources in building construction. The scientific monitoring of the project has assessed what information is needed to quantify and evaluate resource savings on the one hand and possible environmental trade-offs on the other hand. The question was answered, under what conditions would the use of RC-aggregates from an urban mining approach lead to increased resource efficiency, decreased climate emissions and improved sustainability. The data required for this was collected in the course of an actual urban mining project in close cooperation with the involved actors. Findings were used to set up a software based model and to test the functionality of available life cycle assessment software solutions.

The results shown that data based on literature cannot always be transferred to real urban mining projects. The resource savings and environmental impacts can only be adequately assessed on a case-specific basis. The comparative footprint analysis shows that the material footprint of RC-concrete can be reduced by about 31 to 37 % compared to conventional concrete by using 35 to 45 % RC-aggregates. The water footprint can be reduced by about 9 to 14 % using a dry waste treatment process, but the use of a wet treatment process can lead to a considerable increase in water consumption. The climate footprint could be decreased by about 1 to 7 %, mainly due to the reduced energy demand for production and the transportation of RC-aggregates. The selected footprint indicators have been proven to be suitable for identifying resource efficiency potentials and environmental protection measures in future urban mining projects.

In order to reduce the climate footprint of the construction sector, existing buildings with a high proportion of reinforced concrete could be preserved and energetically refurbished in order to avoid the energy consumption and climate impacts of deconstruction and cement production. When planning new buildings, the proportion of reinforced concrete should be reduced to the lowest possible level and the components used should be designed in such a way that they can be completely reused as structural elements so that they do not have to be processed into RC-material in an energy-intensive manner during deconstruction. However, more research on the development and use of concrete structures that can easily be dismantled is needed.

The experiences from the pilot project that are relevant for construction practice were compiled in a guideline, which will be published separately.

1 Problemstellung

Urban Mining ist ein Konzept, welches von Menschen genutzte Güter und Immobilien als Rohstoffquellen betrachtet. Ziel des Urban Mining ist der langfristige Schutz der Umwelt durch Nutzung der vom Menschen geschaffenen Rohstofflager (UBA, 2017). Es wird zwischen kurzfristigen und langfristigen urbanen Minen unterschieden. Kurzfristige urbane Minen umfassen Abfälle kurzfristiger Konsum- und Produktionsgüter wie Abfälle aus Haushalten und Gewerbe. Die langfristigen urbanen Minen umfassen Abfälle langlebiger Konsum- und Produktionsgüter wie Abfälle aus Gebäuden, Straßenbau etc. (Flamme und Krämer, 2010).

Nach aktuellen Informationen des Umweltbundesamtes sind allein in Deutschland in den fünf langlebigen Gütergruppen Gebäude, leitungsgebundene Infrastrukturen, Haustechnik sowie Kapital- und Konsumgüter etwa 28,2 Milliarden Tonnen Material gebunden, was 341 Tonnen Material pro Kopf entspricht. Die mineralischen Materialien wie Gesteine, Sande, Beton und Mauersteine machen mit 318 Tonnen dabei den größten Teil aus. Weitere Materialien sind Metalle (vorrangig Stahl) mit 14,3 Tonnen, Holz mit 4,3 Tonnen, Kunststoffe mit 3 Tonnen sowie sonstige Materialien, die sich nicht eindeutig zuordnen lassen mit 2,3 Tonnen (UBA, 2016).

Nach den Abfällen aus Boden und Steinen stellen die Baumaterialien mit ca. 60 Mio. Tonnen jährlich den zweitgrößten Abfallstrom dar. Von den im Jahr 2016 angefallenen 59,2 Mio. Tonnen Bauschutt (Beton, Ziegel, Fliesen und Keramik) wurden 55,1 Mio. Tonnen (93,1 %) recycelt und 4,1 Mio. Tonnen (6,9 %) für die Verfüllung von Abgrabungen und Deponien verwendet (DESTATIS, 2018). Allerdings werden die verfügbaren Deponie- und Ablagerungskapazitäten zukünftig weiter abnehmen. Die überwiegend aus dem Hochbau stammenden und dann in Recycling-Anlagen aufbereiteten Bau- und Abbruchabfälle werden derzeit noch zu einem Großteil im Straßen-, Wege- und Erdbau eingesetzt, d.h. ein bedeutender Mengenanteil wird nicht adäquat der ursprünglichen Materialanforderungen verwendet (UBA, 2017). Entsprechend der europäischen Abfallrahmenrichtlinie ist die Wiederverwendung von Bauteilen in jedem Fall höher zu bewerten als das stoffliche Recycling (EU, 2008). Die Wiederverwendung oder das hochwertige Recycling von Abbruchmaterialien ist aber nur dann möglich, wenn durch einen selektiven Rückbau die unterschiedlichen Abfallstoffe getrennt gesammelt und den entsprechenden RC-Stoffströmen zugeführt werden. Von zentraler Bedeutung für eine Nachhaltigkeit im Baubereich sind die weitere Optimierung und konsequente Umsetzung selektiver Rückbaukonzepte (VDI ZRE, 2014).

Die Aufgabe des Urban Mining wird es sein, steigende Bauabfallströme einer gezielten Wiederverwendung oder Verwertung zuzuführen, wobei die Aufbereitung von Betonbruch zur RC-Gesteinskörnung zur Herstellung von R-Beton die höchsten Potentiale zur Steigerung der Materialeffizienz bietet. Damit R-Beton in hoher Qualität hergestellt werden kann, muss das Ausgangsmaterial in jedem Fall frei von Schad- und Störstoffen sein. Um eine möglichst schad- und störstofffreie RC-Gesteinskörnung zu erhalten, ist daher neben einem gut geplanten kontrollierten Rückbau auch die Auswahl der geeigneten Recyclingtechnologie maßgeblich.

In der Literatur wird häufig von einer erhöhten Menge an Zement in der R-Beton Mischung im Vergleich zu konventionellen Betonmischungen ausgegangen. Neuere Studien belegen, dass auf eine zusätzliche Zementbeigabe verzichtet werden kann, wenn qualitativ hochwertige RC-Gesteinskörnung eingesetzt und der Anteil im Beton begrenzt wird (López-Gayarre et al., 2009). Für eine bessere Verarbeitbarkeit des R-Beton wird beispielsweise der Gehalt an Fließmitteln bzw. Betonverflüssigern in der Betonrezeptur erhöht. Die ökologische Vorteilhaftigkeit von R-Beton bei gleichem Zementgehalt hängt insbesondere von den Aufwendungen für die Aufbereitungs- und Transportprozesse ab. Mit einer ökobilanziellen Betrachtung auf Grundlage der Ressourcen- und Klimafußabdrücke kann die ökologische Vorteilhaftigkeit der Verwendung von RC-Materialien in Urban Mining-Projekten abgeschätzt werden.

2 Ausgangsbasis

Im Jahr 1994 wurden erstmals in den „Specifications for Concrete with Recycled Aggregates“ (Pour et al., 1994) internationale Empfehlungen für den Einsatz von RC-Gesteinskörnung in Beton ausgesprochen (Pacheco-Torgal et al., 2013). In der Veröffentlichung wird empfohlen, RC-Gesteinskörnung bevorzugt aus aufbereitetem Betonschutt (Betonsplitt) zu gewinnen, da diese eine höhere Qualität aufweist als RC-Gesteinskörnung aus Mauerwerksschutt (Mauerwerkssplitt). Als Resultat wurden zahlreiche Studien durchgeführt, welche die mechanischen Eigenschaften und Dauerhaftigkeit von Beton in Abhängigkeit von dem Anteil an Betonrecykat untersuchten. Spätere Studien fokussieren sich auf den Einsatz von Rezyklaten aus gemischtem Beton- und Mauerwerkbruch (Bauwerkssplitt). Die Studien zeigen, dass Beton aus reinem Betonsplitt bessere Eigenschaften aufweist als Bauwerkssplitt. Von dem Einsatz feiner Gesteinskörnung (unter 4 mm) wird allgemein abgeraten, da diese einerseits zu einer schlechteren Verarbeitbarkeit des Betons führt und sich andererseits Schadstoffe im sogenannten „Brechsand“ akkumulieren (Pacheco-Torgal et al., 2013).

Die Verwendung von Rezyklaten wurde im europäischen Raum in die Betonnormen EN 206-1 „Beton, Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität“ (DIN EN 206, 2017) und EN 12620 „Gesteinskörnung für Beton“ (DIN EN 12620, 2008) aufgenommen. In den Normen werden Vorgaben und Empfehlungen zum Einsatz rezyklierter Gesteinskörnung in Beton gemacht, die in nationalen Regelwerken konkretisiert werden. Die wesentlichen Inhalte der in Deutschland geltenden Regelungen bezüglich des Betons mit rezyklierter Gesteinskörnung sind im Abschnitt 2.2 dargestellt.

Damit R-Beton in hoher Qualität hergestellt werden kann, muss die RC-Gesteinskörnung möglichst frei von Störstoffen sein. Störstoffe wie Zementreste im Rezykat führen zu einer höheren Porosität im Vergleich zu natürlicher Gesteinskörnung und somit zu einer niedrigeren Rohdichte und einer höheren Wasseraufnahme. Reste von Gipsbaustoffen erhöhen den Sulfatgehalt des Betons und beeinträchtigen damit die Frischbetoneigenschaften und/oder die Dauerhaftigkeit (Springenschmid, 2018; Weimann et al., 2013). Um eine möglichst schad- und störstofffreie RC-Gesteinskörnung zu erhalten, ist, neben einem gut geplanten kontrollierten Rückbau, auch die Auswahl geeigneter Recyclingtechnologien maßgeblich. Ein Überblick über die aktuelle Praxis und mögliche Trends bei den Rückbauprozessen und Aufbereitungstechnologien ist in Abschnitt 2.3 gegeben.

2.1 R-Beton Pilotprojekte

In Deutschland wurden in den letzten Jahren bereits erste Pilotprojekte zum Einsatz von R-Beton durchgeführt. Anhand der Ergebnisse dieser Pilotprojekte wurde der aktuelle Stand der Technik erarbeitet. Hierfür wurden Informationen zu der jeweiligen Art der Bauschutttaufbereitung, der eingesetzten RC-Gesteinskörnung und des hergestellten R-Betons gesammelt. Außerdem wurde erfasst, wie die Qualität der RC-Gesteinskörnung und des R-Betons geprüft wurde. Eine Übersicht über elf R-Beton-Pilotprojekte im Bundesgebiet ist in Anhang A dargestellt. Eine ausführliche Tabelle mit Informationen zu diesen Pilotprojekten in Deutschland steht außerdem in dem Untersuchungsbericht der DBU zum Einsatz von Mauerwerksabbruch in Betonen für den ressourcenschonenden Hochbau zur Verfügung (Stürmer und Kulle, 2017)

2.2 Regelwerke

Grundsätzlich gelten für den Einsatz von Beton in Deutschland die DIN EN 206-1 und die DIN 1045-2. Die Normen behandeln jeweils die Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität von Beton (DIN EN 206, 2017) und Tragwerken aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton (DIN 1045-2, 2008). Die Gesteinskörnungen, die als Betonzuschlag verwendet werden, sind Gegenstand der DIN EN 12620 (DIN EN 12620, 2015). In der Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) "Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620" (R-Beton Richtlinie) sind Anwendungsregeln für die Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung in Beton konkretisiert (DAfStb, 2010).

Die Umweltverträglichkeit der rezyklierten Gesteinskörnung ist in der Norm DIN 4226-101 „Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen“ (DIN 4226-101, 2017) und die Qualitätskontrolle rezyklierter Gesteinskörnung ist in der DIN 4226-102 „Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 102: Typprüfung und Werkseigene Produktionskontrolle“ (DIN 4226-102, 2017) beschrieben. In Deutschland gefertigte RC-Gesteinskörnung ist nach Bauproduktenverordnung (BauPVO) mit einem CE-Kennzeichen zu versehen. Der Hersteller hat neben dem CE-Zeichen eine Leistungserklärung abzugeben, die bestätigt, dass das Produkt nach den Vorgaben der EN 12620 hergestellt wurde. Im Folgenden werden insbesondere die Vorgaben der DAfStb-Richtlinie genauer aufgeführt.

2.2.1 Anforderungen an RC-Gesteinskörnung

Für die Herstellung von Beton nach R-Beton Richtlinie ist die sortenreine Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung aus Betonsplitt (Typ 1) und Bauwerkssplitt (Typ 2) mit einer Mindestkorngroße von 2 mm zulässig. Typ 1 der RC-Gesteinskörnung muss mindestens 90 % Beton oder ungebundene Gesteinskörnung enthalten, während Typ 2 zu mindestens 70 % aus Beton und ungebundener Gesteinskörnung besteht (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1. Bestandteile der RC-Gesteinskörnung Typ 1 und 2 (DIN 4226-101)

Bestandteil	Beschreibung	Abfallschlüssel	Anteile in Massen-%	
			Typ 1	Typ 2
Rc	Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauersteine aus Beton	17 01 01	Rc + Ru	Rc + Ru
Ru	Ungebundene Gesteinskörnung, Naturstein, hydraulisch gebundene Gesteinskörner	17 05 04	> 90%	> 70%
Rb	Mauer- und Dachziegel aus gebranntem Ton Kalksandsteine Gasbetonsteine (nicht schwimmend)	17 01 02 17 01 03	< 10 %	< 30 %

		17 01 07		
Ra	Bitumenhaltiges Material	17 03 02	< 1 %	< 1 %
Rg	Glas	-	X + Rg	X + Rg
X	Sonstige Materialien: Bindige Materialien (d. h. Ton, Erde), verschiedene sonstige Materialien: Metalle, nicht schwimmendes Holz, Kunststoff, Gummi, Gips	-	< 1 %	< 2 %
FL	Schwimmendes Material (in Volumen)	-	< 2 %	< 2 %

Weiterhin wird auf die Regelanforderungen nach DIN 12620 verwiesen. Die Regelanforderungen der DIN EN 12620 gelten grundsätzlich sowohl für natürliche als auch für RC-Gesteinskörnungen (Schiller et al., 2010) und werden in der DAfStb-Richtlinie für RC-Gesteinskörnung konkretisiert (siehe Anhang B).

2.2.2 Umweltverträglichkeit

Es darf nur eine RC-Gesteinskörnung nach DIN EN 12620 verwendet werden, die keine umweltschädlichen Auswirkungen, insbesondere auf Boden und Grundwasser, hat. Die Grenzwerte für den Nachweis der Umweltverträglichkeit sind seit August 2017 in DIN 4226-101 geregelt. Die Anforderungen der DIN 4226-101 hinsichtlich der Grenzwerte von Schadstoffen orientieren sich dabei an der Mitteilung 20 der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall LAGA (2003) und entsprechen den Grenzwerten der LAGA Zuordnungsklasse Z2 (siehe Anhang B).

Neben Schadstoffen sind auch Störstoffe wie Sulfate und Chloride aufgeführt, die zwar nicht gesundheitsschädlich sind, sich jedoch negativ auf die Eigenschaften des Betons auswirken. Ebenso sind der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit zu messen. Ein hoher pH-Wert und/oder ein hoher Wert für die elektrische Leitfähigkeit bei Betonschutt, ohne gleichzeitig erhöhte Werte für Chlorid und Sulfat, gehen in der Regel auf den Calciumhydroxidgehalt des Betons zurück. Durch die Aufbereitung (Brechen) und das Lagern des Betons nehmen diese Werte in der Regel ab (Cronjaeger et al., 2015), sodass ein erhöhter pH-Wert und/oder eine erhöhte elektrische Leitfähigkeit kein Ausschlusskriterium für den Einsatz des RC-Gesteinskörnung sein müssen.

2.2.3 Herstellung von R-Beton

RC-Gesteinskörnung für Beton nach der R-Beton Richtlinie kann bis zur Druckfestigkeitsklasse C30/37 in Anteilen von 25 Volumenprozent (Vol.-%) bis 45 Vol.-% eingesetzt werden. Die Verwendung von RC-Gesteinskörnung für Spann- und Leichtbeton ist nach R-Beton Richtlinie nicht zulässig. Die Höchstwerte der Anteile richten sich nach der Feuchtigkeits- und Expositions-kategorie des Betons. Die Expositions- und Feuchtigkeitsklassen teilen Beton nach den Einwirkungen von Umgebungsbedingungen auf die Bewehrungs- und/oder Betonkorrosion ein. Je nach Expositions-kategorie wurden unterschiedliche Anforderungen an den Beton festgelegt wie Mindestdruckfestigkeit, Mindestzementgehalt und maximaler Wasserzementwert (w/z) (DIN 1045-2, 2008). In Abhängigkeit von der Feuchtigkeits-kategorie nach Richtlinie "Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkali-reaktion im Beton" (Alkali-Richtlinie) (DAfStb, 2007) sind gegebenenfalls

vorbeugende Maßnahmen gegen eine schädliche Alkali-Kieselsäure-Reaktion der Gesteinskörnung zu berücksichtigen. In trockenen Umgebungen, die als Feuchtigkeitsklasse WO klassifiziert sind, wie z.B. Innenwänden, kann RC-Gesteinskörnung ohne weitere Anforderungen verwendet werden. Wenn der Beton unter feuchten Bedingungen (WF) verwendet wird, besteht die Gefahr der Alkali-Kieselsäure-Reaktion, und es muss geprüft werden, ob Maßnahmen zur Vermeidung der Alkali-Kieselsäure-Reaktion ergriffen werden müssen. Die Verwendung eines R-Betons in feuchter Umgebung mit Alkalizufuhr von außen (WA), z. B. in Bauteilen, die Meerwasser oder Tausalz ausgesetzt sind, muss von einem Gutachter fallspezifisch beurteilt werden (DAfStb, 2010). Wenn Beton eine Bewehrung oder anderes eingebautes Metall enthält, sowie Luft, Feuchtigkeit und Chloriden ausgesetzt wird, besteht die Gefahr, dass das enthaltene Metall korrodiert. Abhängig von der Höhe des Risikos wird der Beton wie folgt klassifiziert (DIN EN 206, 2017):

XC0 kein Korrosionsrisiko

XC1-4 Korrosionsrisiko durch Karbonatisierung

XD1-3 Korrosionsrisiko durch Chloride, z. B. durch Taumittel (ohne Meerwasser)

XS1-3 Korrosionsrisiko durch Chloride aus Meerwasser oder salzhaltiger Seeluft

Die Exposition von Außenbauteilen gegenüber Frost-Tau-Wechsel oder chemischen Angriffen durch natürliche Böden, Grundwasser, Meerwasser und mechanische Belastungen kann den Beton direkt schädigen. Beton wird dann den folgenden Klassen zugeordnet:

XF1-4 Frostbeanspruchung mit/ohne Taumittel

XA1-3 Exposition gegenüber chemischen Angriffen

XM1-3 Beschädigungsrisiko aufgrund erheblicher mechanischer Beanspruchung

Erlaubt ist der Einsatz rezyklierter Gesteinskörnung in bewehrten und unbewehrten Bauteilen der Expositionsclassen X0, XC1-4, XF1, XF3, XA1. Die Verwendung von R-Beton, der Chloriden (XD, XS, XF2 und XF4), mäßigen oder starken chemischen Angriffen (XA2-3) oder erheblicher mechanischer Belastung (XM1-3) ausgesetzt ist, ist nicht erlaubt. Eine genaue Beschreibung und Beispiele für die Expositionsclassen sind im Anhang B aufgelistet. Tabelle 2 zeigt die nach R-Beton Richtlinie zulässigen RC-Anteile in Beton in Abhängigkeit von der Feuchtigkeits- und Expositionsclassen. Die RC-Anteile beziehen sich auf das Volumen der gesamten Gesteinskörnung (grobe und feine Gesteinskörnung).

Werden die Anforderungen der R-Beton Richtlinie eingehalten, dürfen die Betonbauteile nach DIN EN 1992-1-1 (DIN EN 1992-1-1, 2011) bemessen werden. Wird der Anteil an rezyklierten Gesteinskörnungen über die Angaben in Tabelle 2 hinaus erhöht, ist ein gesonderter Bemessungsnachweis durch den Tragwerksplaner erforderlich (Mettke et al., 2017).

Tabelle 2. Maximal zulässige RC-Anteile nach R-Beton Richtlinie (DAfStb, 2010)

Feuchtigkeits- klassen nach Alkalie-Richtlinie	Expositionsklassen (DIN 206-1 und DIN 1045-2)	Maximale zulässige RC-Anteile	
		Typ 1 Betonsplitt	Typ 2 Bauwerksplitt
WO (trocken)	Karbonatisierung XC1		
WF (feucht)	Kein Korrosionsrisiko XC0 Karbonatisierung XC1 - XC4	≤ 45 Vol.-%	≤ 35 Vol.-%
	Frost ohne Taumittleinwirkung XF1 und XF3 und in Beton mit hohem Wassereindringwiderstand WU	≤ 35 Vol.-%	≤ 25 Vol.-%
	Schwacher chemischer Angriff XA1	≤ 25 Vol.-%	≤ 25 Vol.-%

2.2.4 Erweiterte Erstprüfung

Gemäß R-Beton Richtlinie ist über die reguläre Erstprüfung einer neuen Betonmischung nach DIN EN 206-1/ DIN 1045-2 hinaus eine zusätzliche Prüfung der Konsistenz des Frischbetons und des Feuchtegehalts der Gesteinskörnung durchzuführen. Die Konsistenz des Frischbetons ist nach 10, 45 und 90 Minuten zu überprüfen. Der Feuchtegehalt der rezyklierten Gesteinskörnung (Kernfeuchte und Oberflächenfeuchte) ist zu bestimmen und bei der Festlegung der Mischungsanteile zu berücksichtigen. Außerdem ist eine Dosieranweisung für die nachträgliche Zugabe von Fließmitteln zur Einstellung der gewünschten Konsistenz zu erstellen (DAfStb, 2010).

2.2.5 Produktionskontrolle

Zur werkseigenen Produktionskontrolle gehören neben der Produktionskontrolle nach DIN 206-1/DIN 1045-2 folgende Prüfungen nach R-Beton Richtlinie (DAfStb, 2010):

Sichtprüfung der stofflichen Zusammensetzung der RC-Gesteinskörnung (Liefertyp 1 oder 2) bei jedem Lieferfahrzeug

Ermittlung der Kornrohichte (ofentrocken) nach DIN EN 1097-6 in jeder Produktionswoche

Ermittlung der Wasseraufnahme der RC-Gesteinskörnung nach 10 Minuten in jeder Produktionswoche

Ermittlung des Wassergehalts der rezyklierten Gesteinskörnung bei Änderung der Feuchtebedingungen

Ermittlung des Luftgehalts am Frischbeton und der Frischbetonrohichte im Rahmen des Festigkeitsnachweises für den Beton

2.2.6 Kennzeichnung und Lieferschein

RC-Gesteinskörnung muss nach R-Beton Richtlinie im Lieferverzeichnis als solche gekennzeichnet werden. Der Lieferschein enthält Angaben zum Typ der rezyklierten Gesteinskörnung und der Beton enthält den Zusatz „Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung nach DIN EN 12620, keine Verwendung für Spannbeton“. Darüber hinaus ist nach BauPVO die Leistungsbeständigkeit der Gesteinskörnung mit dem System 2+ nachzuweisen und mit einem CE-Kennzeichen kenntlich zu machen. Das System 2+ beinhaltet die Feststellung des Produkttyps (ehemalig Erstprüfung) und die werkseigene Produktionskontrolle (WPK) des Herstellers sowie die Erstinspektion des Werkes (RC-Anlage). Die Zertifizierung und laufende Überwachung der WPK erfolgt durch eine Zertifizierungsstelle (DIN EN 12620, 2015). Mit dem CE-Kennzeichen garantiert der Hersteller, dass die in der Leistungserklärung angegebenen Leistungen erfüllt werden und mit den europäischen Rechtsvorschriften übereinstimmen (Springenschmid, 2018).

2.3 Rückbauprozess und Aufbereitungstechnologien

2.3.1 Selektiver Rückbau

In Gebäuden sind in der Regel eine Vielzahl an Materialien verbaut, die von dem einsetzbaren Beton oder Mauerwerk separiert werden müssen. Eine nachträgliche Separation während der Aufbereitung ist in der Regel aufwendig oder unmöglich, sodass bereits auf der Baustelle eine sorgfältige Vorsortierung vorzunehmen ist. Um das Wertstoffpotential der mineralischen Abbruchmassen durch die Wiederverwertung als RC-Gesteinskörnung auszuschöpfen und die Recyclingquote zu erhöhen, ist die möglichst sortenreine Gewinnung der Abfallfraktionen von besonderer Bedeutung (Kaiser und VDI Technologiezentrum GmbH, 2019). Gemäß §8 Abs.1 der Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV, 2017) ist eine getrennte Sammlung und Beförderung mindestens folgender Bau- und Abbruchabfälle vorgeschrieben:

- 1) Glas (Abfallschlüssel 17 02 02)
- 2) Kunststoff (Abfallschlüssel 17 02 03)
- 3) Metalle, einschließlich Legierungen (Abfallschlüssel 17 04 01 bis 17 04 07 und 17 04 11)
- 4) Holz (Abfallschlüssel 17 02 01)
- 5) Dämmmaterial (Abfallschlüssel 17 06 04)

- 6) Bitumengemische (Abfallschlüssel 17 03 02)
- 7) Baustoffe auf Gipsbasis (Abfallschlüssel 17 08 02)
- 8) Beton (Abfallschlüssel 17 01 01)
- 9) Ziegel (Abfallschlüssel 17 01 02)
- 10) Fliesen und Keramik (Abfallschlüssel 17 01 03)

Wenn die getrennte Sammlung der jeweiligen Abfallfraktion wirtschaftlich nicht zumutbar ist, z.B. aufgrund einer hohen Verschmutzung, oder technisch nicht möglich ist, da beispielsweise Platz zur separaten Sammlung auf der Baustelle fehlt, entfallen die oben genannten Pflichten. Langfristig kann eine recyclinggerechte Konstruktion eine sortenreine Erfassung der Wertstoffe vereinfachen, z.B. indem Verklebungen vermieden werden (Koch und Schneider, 1997). Noch hat sich das recyclinggerechte Planen nicht etabliert und wird in der gängigen Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) nicht abgebildet, sodass dieses in der frühen Planungsphase auch nicht vergütet wird (Kaiser und VDI Technologiezentrum GmbH, 2019).

2.3.2 Schadstoffentfrachtung

In den 60er-Jahren wurden zahlreiche neue Produkte in allen Bereichen der Bauproduktion eingeführt und verbaut. Sie befinden sich bis heute in Nutzung und enthalten zum Teil Materialien und Chemikalien, die im Nachhinein als gesundheitsschädlich eingestuft wurden wie z. B. Asbest. Dessen Einsatz ist seit den 90er-Jahren verboten. Schadstoffhaltige und damit gefährliche Bauabfälle werden im Abfallverzeichnis mit einem Stern (*) im Abfallschlüssel gekennzeichnet. Aber auch nicht gefährliche Abfälle können unter Umständen Schadstoffe enthalten: Es kann während der Nutzung zu Kontaminationen z. B. durch Reinigungsmittel kommen. Die Schadstoffentfrachtung vor dem eigentlichen Abbruch ist sorgfältig zu planen und durchzuführen. In einem Schadstoffgutachten werden mögliche Schadstoffe und schadstoffbelastete Bauteile identifiziert und dokumentiert, um die Arbeitssicherheit während des Rückbaus zu gewährleisten (Meetz et al., 2015) und die Kontamination der rezyklierbaren Bauteile mit Schadstoffen zu vermeiden (Weimann et al., 2013). In Tabelle 3 sind die Schad- und Störstoffe, die für RC-Gesteinskörnung nach DIN 4226-101 (DIN 4226-101, 2017) geregelt sind, und Beispiele für Schadstoffquellen in Gebäuden aufgeführt.

Tabelle 3. Schadstoffe in Gebäuden und mögliche Schadstoffquellen

Parameter	Schadstoffquelle	Referenz
Chlorid	Chloride gelangen immer nachträglich z. B. durch Streusalze in den Beton	(Müller, 2018)
Sulfat	Zement, Anhydritestrich, Gipsbaustoffe	
Blei	Bspw. Anstrich oder nutzungsbedingt hauptsächlich bei Industrie- und Gewerbebauten	
Cadmium	Bspw. Anstrich oder nutzungsbedingt hauptsächlich bei Industrie- und Gewerbebauten	
Chrom	Bspw. Anstriche	
Arsen	Bspw. Holzschutzmittel	(LfU, 2019) (LfU, 2019)
Kupfer	Bspw. Holzschutzmittel, Anstriche	
Nickel	Bspw. Anstriche	
Quecksilber	nutzungsbedingt hauptsächlich bei Industrie- und Gewerbebauten	(Müller, 2018)
Zink	Bspw. Anstriche	
Phenole	Straßenpech, Teer	
Mineralölkohlenwasserstoffe (C10 – C40)	nutzungsbedingt hauptsächlich bei Industrie- und Gewerbebauten	(Müller, 2018)
Polyaromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	z.B. Teeranstriche, Ruß von Schornsteinen	(Scheibengraf und Reisinger, 2006)

extrahierbare organisch gebundene Halogene (EOX)*	Bspw. Holzschutzmittel	(LfU, 2019)
PCB	Weichmacher für Fugendichtungsmassen	

* bei EOX handelt es sich um einen Summenparameter für organisch gebundenes Chlor, Brom und Iod.

Eine vollständige Separierung der Wertstoffe von den Schadstoffen ist im Vorfeld häufig nicht technisch/wirtschaftlich möglich im Hinblick auf Verbundmaterialien, Kleber, Putze oder Anstriche. Folglich wird Recycling erschwert (Kaiser, 2019; Vogdt et al., 2019). Der Trend in der Bauwirtschaft geht in Richtung einer schadstoffärmeren Bauweise. Die Herstellung und das Inverkehrbringen von Asbest und asbesthaltigen Produkten ist beispielsweise seit 1993 in Deutschland verboten (BAuA, 2020). Anstelle der Asbestfasern werden heute Zellstoff- und Kunststofffasern verwendet (Müller, 2018).

2.3.3 Bauschuttzubereitung

Die Zubereitung von Beton- und Mauerwerksbruch zu rezyklierter Gesteinskörnung nach DIN EN 12620 und DIN 4226-101 unterscheidet sich im Prinzip nicht wesentlich von konventionellen Zubereitungsmethoden. Diese bestehen im Wesentlichen aus den Schritten Zerkleinern, Separieren und Klassieren. Hierfür stehen mobile, semi-mobile und stationäre Anlagen zur Verfügung, die zumeist für die Herstellung von RC-Material für den Straßenbau eingesetzt werden. Prinzipiell sind beide Anlagentypen für die Herstellung von RC-Gesteinskörnung geeignet. Da in mobilen Anlagen einfachere Zubereitungstechniken eingesetzt werden, ist möglichst sortenreines Eingangsmaterial nötig, um die geforderte Qualität für RC-Gesteinskörnung zu erreichen. In Deutschland standen im Jahr 2016 etwa 2.000 mobile und 800 stationäre Anlagen zur Zubereitung von Bauschutt zur Verfügung. Im Jahr 2016 wurden in den mobilen Anlagen etwa 40 Mio. Tonnen Bauschutt zubereitet, in den stationären Anlagen etwa 30 Mio. Tonnen. Damit waren die Kapazitäten der mobilen Anlagen vollständig ausgeschöpft, während die Kapazitäten der stationären Anlagen zu weniger als der Hälfte genutzt wurden (Destatis, 2019). Semi-mobile Anlagen spielen in der Praxis eine eher untergeordnete Rolle (Weimann et al., 2013). Eine ausführliche Beschreibung mobiler und stationärer Anlagen findet sich in dem Buch „Baustoffrecycling Entstehung - Zubereitung - Verwertung“ (Müller, 2018).

3 Forschungsteam

Das Center for Environmental Systems Research (CESR) bildet einen wichtigen Teil der Umweltkompetenz der Universität Kassel. Die Forschungsgruppe „Sustainable Resource Futures“ (SURF) zeigt Wege zur nachhaltigen Gestaltung der physischen Basis von Gesellschaft und Wirtschaft auf und entwickelt Methoden zu Analyse, Bewertung und Management von Stoffströmen und Ressourcen. Der gesellschaftliche Stoffwechsel wird vom Abbau bis zur endgültigen Entsorgung aller stofflichen Ressourcen untersucht. Die Forschungsfragen lauten, wie eine nachhaltige Ressourcennutzung aussehen und auf welche Weise sie erreicht werden kann. Technologische Optionen werden insbesondere daraufhin untersucht, wie Klima- und Ressourcenschutz mit ökonomisch tragfähigen Lösungen verbunden werden können.

Prof. Dr. Stefan Bringezu

Professor für Nachhaltiges Ressourcenmanagement am CESR der Universität Kassel. Studium der Biochemie, Mikrobiologie und Ökologie. Promotion im Bereich der Ökosystemforschung. Habilitation an der Fakultät für Umwelt und Gesellschaft der TU Berlin. Vorherige Tätigkeiten bei der Universität Bayreuth, beim Umweltbundesamt und der Universität Dortmund (stellv. Leitung des Lehrstuhls Versorgungssysteme und planerischer Umweltschutz). Initiator wissenschaftlicher Netzwerke (ConAccount, International Society for Industrial Ecology). Mitglied des International Resource Panel (IRP). Berater verschiedener nationaler und internationaler Organisationen (u.a. OECD, UNEP). Arbeitsschwerpunkte: Stoffstrom- und Materialflussanalyse; Analyse des sozio-industriellen Stoffwechsels und globaler Landnutzung; Ressourcenintensität erneuerbarer Energien; Indikatoren nachhaltiger Entwicklung; integrierte Nachhaltigkeitsszenarien und -bewertung; ökonomieweites Ressourcenmanagement, Umwelt- und Ressourcenpolitik.

Dr.-Ing. Clemens Mostert

Habilitand am CESR, Universität Kassel, Fachgebiet Nachhaltiges Ressourcenmanagement von Prof. Dr. Stefan Bringezu. Studium der Luft- und Raumfahrt mit Schwerpunkt Energietechnik an der Universität Stuttgart. MBA-Studium „International Marketing and Sales“ an der Kassel International Management School. Promotion im Bereich simulationsgestützte Analyse von Energie- und Stoffströme im Fachgebiet Umweltgerechte Produkte und Prozesse (Prof. Dr. Jens Hesselbach) an der Universität Kassel. Vorherige Tätigkeiten beim Deutschen Industrie- und Handelskammertag (DIHK), Leitung des Exzellenz-Clusters deENet und Mitglied der Geschäftsführung eines An-Instituts der Universität Kassel. Aktuelle Arbeitsschwerpunkte: Analyse, Modellierung und Bewertung der Materialflüsse des sozioökonomischen Systems sowie Bestimmung der Ressourcen-Fußabdrücke mit ökobilanziellen Methoden und Software-Lösungen.

Dr.-Ing. Husam Sameer

Wissenschaftlicher Mitarbeiter und PostDoc am CESR, Universität Kassel, Fachgebiet Nachhaltiges Ressourcenmanagement. Abschluss M.Sc. in Construction Management. Zuvor tätig als Bauleiter in verschiedenen Bau- und Infrastrukturprojekten. Im Rahmen seiner Promotion entwickelte er die wissenschaftlichen Grundlagen für eine ökobilanzielle Software zur Bestimmung der Ressourcenfußabdrücke und des Klimafußabdrucks in Building Information Modelling (BIM)-Umgebungen.

Dilan Glanz M.Sc.

Wissenschaftliche Hilfskraft und Masterandin am CESR, Universität Kassel, Fachgebiet Nachhaltiges Ressourcenmanagement. Abschluss M.Sc. im Umweltingenieurwesen mit den Schwerpunkten Abfall und Ressourcenwirtschaft. Zuvor tätig als studentische und wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Werkstoffe des Bauwesens der Universität Kassel. Aufgabenbereiche Modellierung und Berechnung der Ressourcenfußabdrücke und des Klimafußabdrucks von Betonwerkstoffen mit ökobilanziellen Methoden, Datenbanken und Software-Lösungen.

Prof. Dr.-Ing. Anja Rosen

Architektin und Geschäftsführerin der energum GmbH (agn-Gruppe). DGNB-Auditorin und Sachverständige für nachhaltiges Bauen (SHB) mit dem Arbeitsschwerpunkt Nachhaltigkeitsberatung und Zertifizierung. Promotion an der Bergischen Universität Wuppertal (BUW) 2020 mit dem "Urban Mining Index", seit 2021 Honorarprofessorin an der BUW, zuvor Lehraufträge und wissenschaftliche Mitarbeit an der BUW und der FH Münster. Referententätigkeit für diverse Akademien (DGNB, AKHH, Bildungsinstitut FH Münster, EBZ Business School), Gründungs- und Vorstandsmitglied der re!source Stiftung e.V. für eine Ressourcenwende in der Bau- und Immobilienwirtschaft, Mitglied der DGNB in der Expertengruppe Rückbau- und Recyclingfähigkeit, Initiatorin des Urban Mining Student Award, Autorentätigkeit (u.a. Atlas Recycling, ausgezeichnet mit dem Hans-Sauer-Award 2020 Designing Circularity in the Built Environment), Gewinner der DGNB Sustainability Challenge 2021 in der Kategorie Forschung mit dem Urban Mining Index.

4 Forschungsmethode

4.1 Baumaßnahme

Der Rathausumbau im hessischen Korbach ist Teil des Programms „Stadtumbau in Hessen“. Das in Teilen bereits seit dem 14. Jahrhundert bestehende Rathaus wurde in den 1970er-Jahren durch einen Anbau erweitert, der im Rahmen des Umbauprojekts selektiv zurückgebaut wurde. Das ehemalige Bauwerk in zeittypischer Brutalismus-Bauweise sollte anschließend durch einen modernen Neubau an gleicher Stelle ersetzt werden (Abbildung 1).

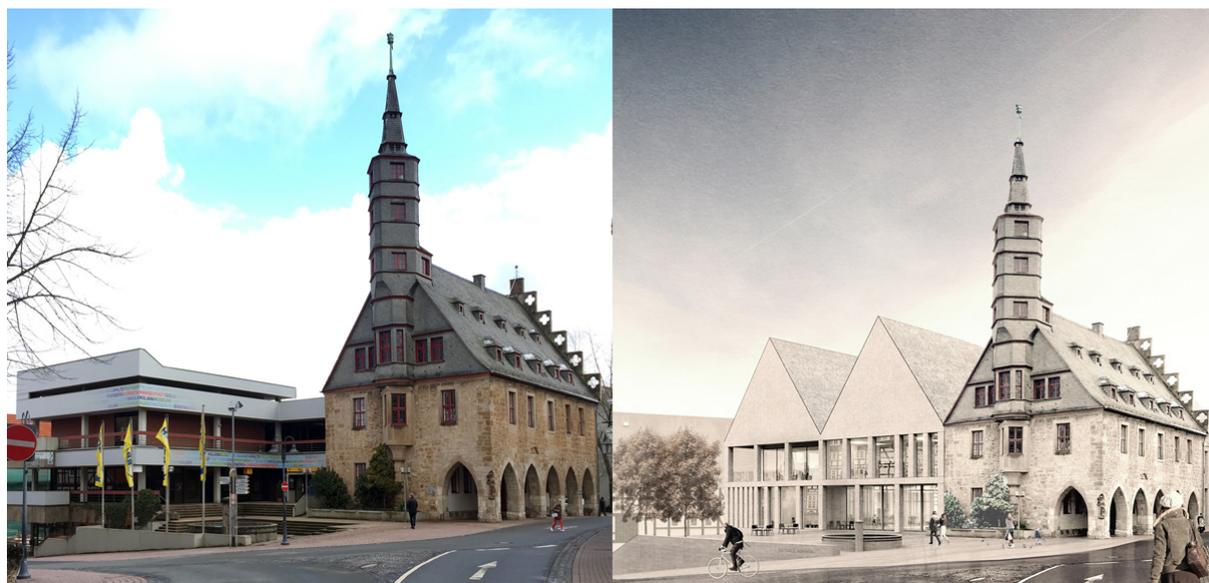


Abbildung 1. Historisches Rathaus und der 70er-Jahre Anbau links und das Design-Konzept für den Neubau rechts (ARGE agn-heimspielarchitekten, 2017). Quelle : ARGE agn-heimspielarchitekten.

Im August 2016 wurde für die Entwicklung des Rathausquartiers ein europaweiter Realisierungswettbewerb ausgeschrieben, um einen geeigneten Entwurf für das Rathaus zu finden. Als Sieger des Wettbewerbes wurde der Entwurf von Christian Thomann/agn und heimspiel architekten aus Münster, ausgezeichnet. Als Ergebnis der Entwurfs- und Genehmigungsplanung wurde ein Gebäudekonzept erstellt, bei dem ein ressourcenschonender Baustoffeinsatz und eine energiesparende Bauweise im Vordergrund standen (Kreis- und Hansestadt Korbach, 2020). Hierfür war vorgesehen, die beim Gebäudeabbruch entstehenden Materialien im Sinne eines Urban Minings aufzubereiten und in den Neubau zu integrieren. Auch alle Neumaterialien sollten ein möglichst hohes Kreislaufpotenzial aufweisen (Rosen, 2018). Die bauliche Maßnahme wurde sowohl mit Fördermitteln des Förderprogramms Stadtumbau in Hessen als auch der Stadt Korbach finanziert (Kreis- und Hansestadt Korbach, 2020). Der Gebäudekomplex liegt im historischen Innenstadtkern und bestand aus einem Historischen Rathaus, einem Rathausanbau aus dem Jahr 1970 sowie zusätzlich aus zwei Nebengebäuden (Hinterhaus und Stadtwache). Im Zuge des Rückbauprojekts wurden sowohl der Rathausanbau als auch die beiden Nebengebäude selektiv zurückgebaut, ohne das historische Rathaus zu beschädigen. Der Neubau wurde an derselben Stelle des Rathausanbaus geplant.

Das neue Areal besteht aus mehreren Giebelhäusern, einem glasüberdachten Bürgerforum und einem Freiflächenkonzept, die das historische Rathausgebäude erweitern. Weiterhin wird der Komplex im Bereich der Stechbahn 5 durch ein Nebengebäude ergänzt.



Abbildung 2. Luftbild mit Lage der Bestandsgebäude, weiß: Historisches Rathaus, rot: Rathausanbau, grün: Nebengebäude Hinterhaus und Stadtwache (bereits zurückgebaut). Quelle: Google Earth.

4.2 Forschungsprojekt

Mit dem Forschungsprojekt sollte der Rückbau des Rathausanbaus aus den 1970er-Jahren und die Errichtung eines Ersatzneubaus an gleicher Stelle wissenschaftlich begleitet, analysiert und bewertet werden. Die Planung und Umsetzung des selektiven Rückbaus des Anbaus, die Aufbereitung des Betonbruchs und die Bereitstellung von R-Beton für den Neubau im Sinne eines Urban Mining sollten hierfür in allen Schritten dokumentiert, qualitativ und quantitativ beschrieben und ausgewertet werden. Es sollte praxisnah geklärt werden, welche Informationen benötigt werden, um Ressourceneinsparungen einerseits und mögliche gegenläufige Umweltbelastungen andererseits durch Urban Mining ex-ante und ex-post zu quantifizieren und zu bewerten.

Ein weiteres Ziel war die Prüfung der Verfügbarkeit und der Qualität der zu dieser Bewertung benötigten Daten und die Funktionalität verfügbarer Ökobilanz-Software-Lösungen zur Analyse des kumulierten Rohstoffaufwandes und ergänzender Indikatoren (zum Beispiel „ungenutzte Extraktion“; dazu zählt Aushub). Es sollten beispielhaft die Bedingungen eruiert werden, unter denen Urban Mining zur klimaschonenden Nettoeinsparung von stofflichen Ressourcen im Hochbau beitragen kann. Die Ergebnisse sollten dazu verwendet werden, einen Leitfaden für Kommunen, Architektur- und Planungsbüros sowie Baufirmen zu erarbeiten, der als Grundlage für die ex-ante Bewertung von Bauentwürfen und Plänen zur ressourceneffizienten Gestaltung von Gebäuden unter Einbeziehung von Urban Mining dient. Neben der Darstellung der Erfolgsfaktoren und Hemmnisse, waren geeignete Indikatoren und ihre Berechnungsgrundlage vorzustellen, mit denen sowohl die Ressourceneffizienz als auch die Klimawirkung für

konkrete Bauvorhaben bestimmt werden können. Die Besonderheiten von Vorhaben der öffentlichen Hand sollte dabei besonders berücksichtigt werden.

Der Arbeitsplan der wissenschaftlichen Begleitung umfasste drei Arbeitspakete (AP), die sich an den drei Phasen des Rückbaus (1) Vorplanungs- und Vorbereitungsphase, (2) Durchführungsphase und (3) Nachbereitungsphase orientieren.

Arbeitspaket 1: Vorplanungs- und Vorbereitungsphase

Ein selektiver Rückbau bedarf einer gründlichen Vorbereitung, die eine Ermittlung der bisherigen Nutzung, eine detaillierte Erfassung der Gebäudekonstruktion und der verbauten Materialien nach Art und Menge, eine differenzierte Erfassung der Bauteile und Unterteilung in wiederverwendbare, verwertbare und zu entsorgende Materialien, eine grobe Mengenabschätzung, eine Kosten-Erlös-Schätzung und die Erkundung von etwaig kontaminierten Bereichen umfassen sollte (Meetz et al., 2015). Die Umsetzung dieser Schritte sollte in enger Abstimmung mit dem Bauamt der Stadt Korbach wissenschaftlich begleitet werden, wobei die geplanten Maßnahmen hinsichtlich ihrer ökologischen und ökonomischen Wirkungen sowie ihrer technischen Machbarkeit bewertet werden sollten. Im Ergebnis war zu bestimmen, welche Erfolgsfaktoren und Hemmnisse für einen ressourcenschonenden und umweltverträglichen Rückbau bereits in der Planungs- und Vorbereitungsphase zu berücksichtigen sind, wobei die Übertragbarkeit auf entsprechende Bauvorhaben, insbesondere von kommunalen Auftraggebern, im Vordergrund stand. Ein weiteres Ziel dieses Arbeitspakets war die Ermittlung geeigneter Indikatoren, um die Planungen von baulichen und organisatorischen Maßnahmen für die Entsorgungsphase eines Gebäudes zu unterstützen, sowie die Bestimmung des Daten- und Informationsbedarfs für die Berechnung der Indikatoren. Damit sollten die Optionen dargestellt werden, die technisch möglich, ökologisch aktuell akzeptabel und ökonomisch sinnvoll sind sowie einen Beitrag zu einem künftig nachhaltigeren sozio-industriellen Stoffwechsel liefern. Die Einsatz- und Verwendungsmöglichkeiten der Indikatoren sollten auch vor dem Hintergrund der EU-weiten und nationalen Rechtssetzungen und Programme geprüft werden. Grundlage für die Bestimmung der Indikatoren waren ökobilanzielle Betrachtungen, die zunächst eine Modellierung der Stoff- und Energieflüsse erforderte.

Für die Modellierung stehen unterschiedliche Softwarelösungen zur Verfügung. Eine open-source Softwarelösung für die Erstellung von Ökobilanzen und verwandte Lebenszyklusanwendungen ist bspw. openLCA, die auch den Einsatz unterschiedlicher Datenbanken ermöglicht (www.openlca.org). Als Grundlage für die Modellierung sollten die im Rahmen der Vorarbeiten erhobenen Daten dienen. Das Modell sollte im Projektverlauf durch neue Daten und Informationen ergänzt, detailliert und aktualisiert werden. Für die Entwicklung unterschiedlicher Szenarien und die Modellrechnungen war insbesondere die Beantwortung der Frage interessant, inwieweit die aus dem vorhandenen Gebäude extrahierten Materialien für den geplanten Neubau verwendet werden können. Obwohl Downcycling-Prozesse nicht zu den angestrebten Zielen des Urban Mining zählen, sollte auch das dabei mögliche Einsparpotenzial berücksichtigt werden. Eine Verwendung von sortenreinen Bauabfällen aus dem selektiven Rückbau ist aus Sicht der Ressourceneffizienz immer noch vorteilhaft, wenn dabei Primärressourcen eingespart werden können.

Darüber hinaus sollte die Wirtschaftlichkeit des Rückbaus und des Entsorgungs- und Verwertungskonzepts betrachtet werden. Je nach Gebäude kann der selektive Rückbau nicht nur aus Sicht des Umweltschutzes und der Ressourceneffizienz, sondern auch finanziell sinnvoll sein, da mit der Trennung des Bauschutts und der Bauabfälle in einzelne und möglichst reine Stoffströme günstigere Entsorgungskosten erzielt werden können. Da er allerdings in der Regel im Vergleich zu einem Abbruch mit einem Mehraufwand und damit auch Mehrkosten verbunden ist, sollte in jedem Fall bereits im Voraus eine gründliche Prüfung der Rentabilität erfolgen.

Arbeitspaket 2: Durchführungsphase

Der eigentliche Rückbau erfolgt immer in mehreren Demontagestufen: die Durchführung vorbereitender Arbeiten, die Arbeits- und Immissionsschutzmaßnahmen, die Schadstoffentfrachtung, den Ausbau von technischen Anlagen und sonstigen Bauteilen, den Abbau der Dach- und Fassadenkonstruktion, des Rohbaus bzw. der Tragwerkskonstruktion sowie den Rückbau der Außenanlagen. Die Umsetzung dieser Stufen sollte in enger Abstimmung mit den beteiligten Akteuren und dem Bauamt der Stadt Korbach wissenschaftlich begleitet werden. Die Arbeiten des Rückbaus mussten daher durch regelmäßige Besichtigungen der Rückbaustelle und die Teilnahme an Baubesprechungen verfolgt werden, um die durchgeführten Maßnahmen insbesondere hinsichtlich der Materialtrennung dokumentieren zu können.

Die von den Unternehmen erstellten Aufzeichnungen sollten hinsichtlich der tatsächlich verwerteten bzw. entsorgten Materialmengen ausgewertet werden. Etwaige Schwierigkeiten bei den Rückbau- und Separationsmaßnahmen, die sich je nach Bauteilen und -materialien ergaben, sollten mit den relevanten Akteuren besprochen werden. Die Daten der tatsächlich verwerteten bzw. entsorgten Materialmengen sollten mit den kalkulierten Mengen verglichen werden, um Aussagen über die Rückgewinnungsquoten einzelner Materialien und die Genauigkeit der bisher entwickelten Prognose- und Berechnungssystematik treffen zu können. Die neuen Daten sollten auch dazu genutzt werden, die Modellierung der Stoffströme und die entsprechenden ökobilanziellen Betrachtungen so anzupassen, dass die Änderungen im Hinblick auf die Klimawirkungen und Ressourcennutzung bewertet werden konnten.

Arbeitspaket 3: Nachbereitungsphase

Die Nachbereitungsphase des Rückbaus umfasst insbesondere die Erstellung der erforderlichen Abschlussdokumentation, welche die Rückbauarbeiten und Entsorgungsmaßnahmen qualitativ und quantitativ beschreibt. In diesem Arbeitspaket sollten alle wesentlichen Ergebnisse der wissenschaftlichen Begleitung zusammengefasst und dokumentiert werden, um auf dieser Grundlage einen Leitfaden zu erarbeiten, der es Bauverantwortlichen, Planern, Bauingenieuren, Architekten bereits in einer frühen Planungsphase ermöglicht, die Nachhaltigkeit eines Bauvorhabens durch den Einsatz von Urban Mining zu bestimmen.

Darüber hinaus sollten die Indikatoren und ihre Berechnungsgrundlage bestimmt werden, mit denen sowohl die Ressourceneffizienz als auch die Klimawirkung für konkrete Bauvorhaben bestimmt werden können. Die Besonderheiten von Vorhaben der öffentlichen Hand sollte dabei besonders berücksichtigt werden. Für die Durchführung der genannten Arbeitspakete war eine Laufzeit von 24 Monaten vorgesehen.

Tabelle 4. Übersicht Arbeitspakete, Laufzeit und Meilensteine

AP	Laufzeit	Universität Kassel, Center for Environmental Systems Research (CESR) Wissenschaftliche Begleitung	Stadt Korbach, Bauamt Rückbau und Neubau Rathausanbau
1	12/2018 – 01/2019	1) Konzeptentwurf für ein Indikatoren-Set	Erstellung der Ausschreibungsunterlagen für den Rückbau
	02/2019	2) Auswahl Software und Datenbank	
	03/2019	3) Modelle für unterschiedliche Szenarien (Plan)	Vergabeverfahren Rückbau
2	04/2019 - 07/2019	4) Begleitung und Dokumentation des Rückbaus	Rückbau
	08/2019	5) Bestimmung der Stoff-, Energie- und Wasserflüsse	Neubau
	09/2019 - 10/2019	6) Plan-Ist Vergleich hinsichtlich der Daten für die kalkulierten und tatsächlich verwerteten Materialmengen	
	11/2019	7) Indikatoren-Set inkl. Berechnungs- und Bewertungsverfahren	
3	12/2019 - 06/2020	8) Begleitung und Dokumentation der Herstellung von R-Beton und der Bauphase	
	07/2020 - 09//2020	9) Erfolgsfaktoren und Hemmnisse für einen ressourcenschonenden und umweltverträglichen Rückbau und Einsatz von R-Beton	
	10/2020 - 11/2020	Erstellung eines Leitfadens	

5 Ergebnisse

5.1 Begleitung und Dokumentation des Rückbaus

Die Baumaßnahme wurde über den gesamten Zeitraum des Forschungsprojekts durch die Teilnahme der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Universität Kassel an ca. 30 Baubesprechungen und 10 Baustellenbegehungen vor Ort kontinuierlich begleitet und dokumentiert. Dabei wurden alle relevanten Dokumente und Daten erhoben, gesichtet und ausgewertet. Die Dokumentation beinhaltet die Ergebnisse der Planung und Ausschreibung des Rückbaus und der Vorbereitung des Neubaus. Weiterhin wurde die Umsetzung der ausgeschriebenen Leistung begleitet. Die tatsächlich angefallenen Massenströme sowie ihre Verwertung bzw. Entsorgung (IST-Werte) wurden dokumentiert und ausgewertet. Im Folgenden werden die Schritte von der Planung bis zur Realisierung des Rückbaus beschrieben. Hierbei werden auch Herausforderungen und Planungsunsicherheiten anhand eines PLAN-IST Vergleiches transparent gemacht, um als Hilfestellung für zukünftige Urban-Mining-Projekte im Bausektor zu dienen.

5.1.1 Grundlagenermittlung und Vorplanung

Vor dem selektiven Rückbau wurden die in dem Gebäude verbauten Materialien nach Art und Mengen erfasst und in verwertbare und zu entsorgende Materialien gegliedert. Möglicherweise vorhandene Gefahrstoffe wurden durch das Hessische Institut für Baustoffprüfung (HIB) identifiziert und dokumentiert (HIB, 2018). Im Zuge der Vorplanung wurde eine Kosten-Erlös-Schätzung (Wirtschaftlichkeitsbetrachtung) unter Berücksichtigung verschiedener Varianten durchgeführt (Rosen, 2018). Die Informationen zur Grundlagenermittlung und Vorplanung der Rückbau- und Neubaumaßnahmen und die entsprechenden Ausschreibungsunterlagen stammen von folgenden Beteiligten:

ARGE agn-heimspiel architekten: Architektur (Thomann und Matzken, 2017)

energum GmbH: Entwicklung Urban Mining Konzept (Rosen, 2018)

Bimolab gGmbH: Rückbauplanung und Bauleitung (Kurkowski, 2019).

5.1.2 Ermittlung von Bestandsmassen und Recyclingpotentialen

Die Art und Massen der im Rathausanbau verbauten Materialien wurden im Vorfeld der Rückbauplanung im Rahmen einer Masterarbeit am CESR erhoben (Hofner, 2017). Als Datengrundlage dienten Rechnungen, Leistungsverzeichnisse und andere Dokumente aus dem Archiv des Rathauses.

Im Zuge der Rückbauplanung wurden die Berechnungen anhand archivierter Planunterlagen und Ortsbegehungen auf Plausibilität geprüft (Rosen, 2018). Zusätzlich erstellte das HIB ein Abbruch- und Entsorgungskonzept, in dem Schad- und Wertstoffe des Anbaus und der Nebengebäude quantifiziert wurden (HIB, 2018). Die meisten Massen von rezyklierbaren Stoffen und Materialien wurden im Rathausanbau identifiziert. In den Nebengebäuden wurden die potenziell verwertbaren Mauerwerksmaterialien ermittelt. Im Sinne der Maßgaben des Kreislaufwirtschaftsgesetzes wird dem stofflichen Recycling der Wertstoffe Vorrang vor der thermischen Verwertung und der Entsorgung eingeräumt. Der lose Kies und Splitt unterhalb des Fundaments wurde für die Wiederverwendung nach einfacher Aufbereitung (z.B. durch Sieben), z. B. als Frostschutzschicht unterhalb des Gebäudefundaments in Betracht gezogen.

Neben einer sortenreinen Erfassung sind auch die technischen und ökonomischen Möglichkeiten maßgeblich für ein hochwertiges Recycling. Die sortenreine Erfassung der Abfallfraktionen wird durch das

Getrennthaltungsgebot und den selektiven Rückbau unterstützt. Für die Wertstoffe Glas, Metall sind landesweit flächendeckende Recyclinganlagen vorhanden, während Holz deutschlandweit zu ca. 70 % energetisch und zu ca. 30 % stofflich verwertet wird (z.B. Weiterverarbeitung zu Spanplatten). Die Möglichkeiten des Recyclings von Kunststoffen sind stark abhängig von der Art des Kunststoffs. Für PVC existieren verbandseigene Recyclingsysteme (z. B. Roof-Collect für PVC-Dachbahnen oder Rewindo für PVC-Fenster). Die im Altbau verbauten Wertstoffe, gegliedert nach Abfallfraktionen gemäß GewAbfV, sind in Tabelle 5 aufgelistet und den möglichen Verwertungs- und Entsorgungsszenarien zugeordnet.

Tabelle 5. geschätzte Massen der Abfallfraktionen zur Verwertung in den Bestandsgebäuden des Rathauses Korbach mit möglichen Entsorgungs- und Verwertungsszenarien vor dem Rückbau (Rosen, 2018)

Abfallfraktion	Abfall-schlüssel	Rathaus-anbau	Stadt-wache	Hinter-haus	Mögliche Verwertungs- und Entsorgungsszenarien	
		Masse [t]			vorrangig	nachrangig
Glas	17 02 02	30,2	1,0	5	Recycling	Verfüllung
Kunststoff	17 0 203	9,4	k.A.	1	Recycling	Sonstige Verwertung (energetisch)
Metalle	17 04 01	470,3	k.A.	2	Recycling	-
	17 04 02					
	17 04 05					
	17 04 07					
Holz	17 01 02	2,6	20,0	2	Recycling	Sonstige Verwertung (energetisch)
	17 02 04*					
Dämmmaterial	17 06 04	-	-	5	Recycling	Beseitigung
Bitumengemische	17 02 03	2,0	-	5	Recycling	Sonstige Verwertung (energetisch)
Baustoffe auf Gipsbasis	17 08 02	5,0	-	2	Recycling	Beseitigung

Beton	17 01 01	7.397,1	200,0	50 (ges.)	Recycling	Sonstige Verwertung (Verfüllung)
Ziegel (Mauerwerk)	17 01 02	500,6	508,0			
Fliesen/Keramik	17 01 03	6,2	k.A.			
Kies/Splitt	17 05 04	2.752,2	-		Wieder- verwendung	Sonstige Verwertung (Verfüllung)

Für das Recycling mineralischer Abbruchabfälle (Beton und Ziegel/Mauerwerk) besteht in Deutschland flächendeckend ein dichtes Netz von stationären und mobilen Recyclinganlagen (Müller, 2018). Bisher findet in der Regel eine nachrangige Verwertung der Abfälle zu RC-Gesteinskörnung für den Straßen- und Wegebau oder zur Verfüllung in Tagebaugruben statt. Da die mineralischen Abbruchabfälle mit Abstand die größten Abfallfraktionen darstellen und da seitens der Bauverantwortlichen größere Einflussnahme möglich ist als bei den anderen Bau- und Abbruchabfällen, wurde im vorliegenden Projekt das Potential eines hochwertigen Recyclings der Beton-, Mauerwerks- und Ziegelfraktion weiter untersucht (Rosen, 2018).

5.1.3 Verwertbarkeit der mineralischen Bau- und Abbruchabfälle

Für ein hochwertiges Recycling der mineralischen Massen wurde geplant, die RC-Gesteinskörnung Typ 1 und Typ 2 mit der Korngröße 4/22 mm, siehe Abschnitt 1.3.1 für die Zusammensetzung der Typen, in möglichst hohen Anteilen in der Herstellung von Beton für den Neubau vor Ort einzusetzen (Rosen, 2018). Die RC-Gesteinskörnung des Typs 1 sollte in den Tragwerken und Typ 2 in der Fassade eingesetzt werden.

Das nicht für die Betonherstellung geeignete Material sollte nach Möglichkeit für die Verfüllung in ungebundenen Tragschichten verwendet werden. Anhand von Deklarationsanalysen nach LAGA M20 (LAGA, 2003), DIN 4226-101 und Prüfung nach DIN EN 12620 wurden Bauteile identifiziert, welche für die Herstellung von RC-Gesteinskörnung geeignet sind. Die Einstufung in die LAGA-Klassen ist für die Annahme der Abbruchmassen beim Entsorger bzw. Aufbereiter und für die konventionelle Verwertung in technischen Bauwerken oder für die Verfüllung maßgeblich, da die identifizierten Recyclingunternehmen im Umkreis nur Bauschutt bis zur LAGA Zuordnungsklasse Z1.1 annehmen (Rosen, 2018). Die Probenahmen beschränkten sich zunächst auf Bauteile, die für die Schadstoffgutachten als relevant eingestuft wurden (Tabelle 6).

Tabelle 6. Zusammenfassung der Prüfergebnisse (HIB, 2018)

Bauteil	LAGA (gutachterliche Einstufung)	Einhaltung der Höchstwerte nach DIN EN 4226-101:2017	Einhaltung der Höchstwerte nach DIN EN 12620
Ziegelsteine „Stadtwache Keller“	Z 1.2	ja	nein
Ziegelsteine Stadtwache OG	Z 1.2	ja	ja
Rathausanbau Beton Bodenplatte KG (Heizung)	Z 0	ja	ja
Rathausanbau Beton Bodenplatte KG (Klimaanlage)	> Z 2 (Z1.2)	nein	ja
Rathausanbau Beton Bodenplatte KG (Kellergewölbe Altbau)	> Z 2 (Z1.2)	nein	ja
Betonstütze	> Z 2 (Z1.2)	ja	ja
Waschbetonfassade	Z1.2 (Z1.1)	nein	ja
Sichtbetonmauern	Z1.2 (Z1.1)	nein	ja
Betonstütze Heizungskeller	Z 0	ja	nein
Bodenplatte EG Herrentoilette	Z 1.2. (Z1.1)	ja	ja

Die Fundamente konnten erst nach dem Rückbau beprobt werden. Die Stützen im Bereich des Obergeschosses wurden aufgrund von statischen Bedenken ebenfalls nicht im Zeitraum der Vorplanungen beprobt. Die Proben der Bodenplatten des Kellergeschosses und der Sichtbetonmauern aus dem Rathausanbau hielten die Anforderungen nach DIN 4226-101 nicht ein. Während die Bodenplatten die Grenzwerte für die elektrische Leitfähigkeit nicht einhielten, wurde bei der Sichtbetonmauer ein erhöhter Chromgehalt nachgewiesen. Bei einer Probenahme in einer Betonsäule im Heizungskeller wurde der Grenzwert für säurelösliche Chloride nach DIN EN 12620 überschritten. Wie in Abschnitt 2.2 aufgeführt, ist ein erhöhter pH-Wert und/oder eine erhöhte Leitfähigkeit von Betonbruch jedoch kein Ausschlusskriterium für die Eignung des Materials zur Herstellung rezyklierter Gesteinskörnung. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass bei einer Voranalyse immer nur Einzelproben genommen werden. Das aufbereitete, homogenisierte Produkt aus der Recyclinganlage lässt im Regelfall bessere Werte zu. Zum anderen wird der Kornanteil von 0/4 mm (Sand) abgeseibt, so dass eine grobe Gesteinskörnung entsteht. Die Voranalysen (nach LAGA) werden

dagegen an einer zerkleinerten Probe mit Sand durchgeführt, in dem sich in der Regel aufgrund des größeren relativen Oberfläche Schadstoffe anreichern (Pacheco-Torgal et al., 2013; Weimann et al., 2013).

5.1.4 Planung zum Einsatz der RC-Gesteinskörnung im Neubau

Die potentiellen Massen der RC-Gesteinskörnung wurden von energum (agn-Gruppe) auf Grundlage der Prüfergebnisse nach DIN 4226-101/DIN EN 12620 abgeschätzt. Demnach wurden etwa 4.700 Tonnen Beton und ca. 375 Tonnen Ziegel als für die Herstellung von RC-Gesteinskörnung geeignet eingestuft. Die Berechnung der potentiell herstellbaren Massen der RC-Gesteinskörnung basiert auf der Annahme, dass die Masse der verwendbaren RC-Gesteinskörnung ca. 50 % der Masse des aufbereiteten Betons und 40 % der Masse an aufbereiteten Ziegeln entspricht. Das verbleibende Material (Füllsand) sollte bei entsprechender Eignung nach Vorgaben der LAGA M20 für die Verfüllung der Baugrube verwendet werden. Der Betonbedarf für den Rathausanbau wurde anhand von Vordimensionierungen des Tragwerkplaners ermittelt. Bei der Berechnung des Bedarfs an RC-Gesteinskörnung wurde davon ausgegangen, dass der fertige Beton zu 70 % aus Gesteinskörnung besteht. Je nach Feuchtigkeits- und Expositionsklasse wurden für den Tragwerksbeton maximal 35 % bzw. 45 % RC-Gesteinskörnung nach R-Beton Richtlinie angesetzt. Außerdem wurde für die RC-Gesteinskörnung des Typs 2 der maximale Ziegelanteil von bis zu 30 % Ziegeln und 70 % Betonbruch in der RC-Gesteinskörnung berücksichtigt. Demnach könnte der Bedarf an RC-Gesteinskörnung vollständig aus dem Beton und den Ziegeln der rückzubauenden Gebäude gedeckt werden. Die vollständige Berechnung des Bedarfs an Rezyklat für die RC-Gesteinskörnung ist in Anhang C dargestellt.

5.1.5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

In einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde untersucht, ob eine Direktverwertung der mineralischen Abbruchmassen für den Neubau wirtschaftlich ist (Rosen, 2018). Der finanzielle Aufwand für die Direktverwertung wurde in Zusammenarbeit mit zwei Recyclingunternehmen und einem Betonhersteller abgeschätzt. Den Unternehmen wurden dazu die folgenden Informationen zur Verfügung gestellt:

- 1) Zeitlicher Ablauf des Vorhabens (Dauer Rückbau 3 Monate, Dauer Betonarbeit: 9 Monate)
- 2) Kurzbeschreibung des Urban-Mining Konzepts
- 3) Mengenangaben der mineralischen Bau- und Abbruchabfälle nach LAGA-Klassen
- 4) Anforderungen an die Güteüberwachung mit CE-Kennzeichnung (Güteüberwachung/Konformität gemäß DIN EN 12620 in Verbindung mit 4226-101)
- 5) Zusätzliche Berücksichtigung einer Variante bei der die Entsorgung des Materials auf konventionellem Weg unter Einstufung in die LAGA-Klasse Z 1.2 erfolgt, falls eine Direktverwertung des Materials nicht möglich ist.
- 6) Anfrage der Preise für die Annahme der jeweiligen Abfallfraktionen pro Tonne nach LAGA-Abstufung, die Anlieferung beim Recyclingunternehmen durch den Abbruchunternehmer, Abgabepreise der jeweiligen Gesteinskörnung pro Tonne

Die Kosten einer „Business As Usual“ (BAU)-Variante wurden den Kosten der geplanten, ressourcenschonenden Direktverwertung (RC-Variante), jeweils inklusive der Transportkosten, gegenübergestellt. Die BAU-Variante stellt die Weiterverwertung der mineralischen Abbruchmaterialien z.B. im Straßenbau dar, während die RC-Variante die Verwertung der mineralischen Abbruchmaterialien als RC-Gesteinskörnung für den Einsatz im Beton darstellt. Für die BAU-Variante wurden Preise bei einem Bauschutttaufbereitungsunternehmen (Firma 1) in 17 km Entfernung von der Baustelle abgefragt. Für die RC-Variante wurden zwei Recyclingunternehmen angefragt, deren Anlagestandorte 4 km bzw. 42 km von der Baustelle entfernt liegen. Die Preise für die Verwertung des Beton- und Ziegelbruchs, inklusive der Lagerung, Prüfung nach DIN 4226-

101 und die werkseigene Produktionskontrolle wurden bei den Unternehmen abgefragt. Die Ergebnisse der Preisabfrage sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7. Kostenvergleich (Prognose) zwischen der konventionellen Verwertung und einer Verwertung nach dem Urban Mining-Konzept für Beton- und Ziegel (Rosen, 2018)

Kostenart	BAU-Variante	RC-Variante	
	Firma 1	Firma 2	Firma 3
Transport der mineralischen Abfälle	15.136 €	7.568 €	40.363 €
Annahme Entsorgung / Verfüllung	70.634 €	-	-
Lagerung der mineralischen Abfälle		11.250 €	
Annahme zur Verwertung		149.112 €	88.019 €
Lagerung der Rezyklate bis zur Verarbeitung		7.200 €	4.711 €
Einsatz Materialien für Tragwerk des Neubaus	30.896 €	49.005 €	55.978 €
Einsatz Materialien für Fassade des Neubaus	1.114 €	11.234 €	11.501 €
Gesamt	117.781	235.369 €	200.571 €
Mehrkosten (netto)	-	117.588 €	82.790 €

Die Mehrkosten bei der Aufbereitung durch die Firma 2 ergeben sich insbesondere aufgrund der hohen Annahmepreise für die mineralischen Abfälle. Bei dem Angebot der Firma 3 fallen die Transportkosten deutlich ins Gewicht. Bei der Herstellung des Betons und der Fassade entstehen Mehrkosten insbesondere durch die Kosten für die Qualitätsüberwachung und die separate Lagerung der Gesteinskörnung (Rosen, 2018). Die prognostizierten Mehrkosten für die Verwertung des Betons lagen damit bei ca. 0,5 % der Gesamtkosten des Bauvorhabens, die voraussichtlich etwa 20 Mio. Euro betragen werden (Daum, 2020).

5.1.6 Ausschreibung der Rückbauleistungen

Öffentliche Bauvorhaben unterscheiden sich von privaten Bauvorhaben insbesondere durch das Vergaberecht. Das Vergaberecht umfasst alle Regeln und Vorschriften, die das Verfahren für die öffentliche Hand beim Einkauf von Gütern und Leistungen vorschreiben. Dem Vergaberecht übergeordnet ist das

Haushaltsrecht, dass die Grundsätze der sparsamen und wirtschaftlichen Mittelverwendung der öffentlichen Hand festschreibt und deren Umsetzung regelt. Durch die Gebote der Gleichbehandlung, Nichtdiskriminierung und Transparenz soll es einen fairen Wettbewerb zwischen den bietenden Unternehmen sicherstellen und Korruption wirksam verhindern. Durch die Einbeziehung von nachhaltigen, insbesondere umweltbezogenen, sozialen und innovativen Kriterien kann die Vergabe öffentlicher Aufträge auch der Verwirklichung strategischer Politikziele dienen (Edquist, 2017).

Vor diesem Hintergrund wurden die Anforderungen an den Rückbau in der Leistungsbeschreibung in den Ausschreibungsunterlagen umfassend erarbeitet und veröffentlicht (Kurkowski, 2019). Die Rückbauleistungen wurden europaweit in einem öffentlichen Verfahren ausgeschrieben und umfassten:

- Selektiver Rückbau Anbau Rathaus: umbauter Raum (ohne Fundamente) ca. 18.000 m³
- Selektiver Rückbau Nebengebäude Stadtwache Stechbahn 5: umbauter Raum (ohne Fundamente) ca. 2.800 m³
- Selektiver Rückbau Hinterhaus Stechbahn 5: umbauter Raum (ohne Fundamente) ca. 2.100 m³
- Vorbereitende Arbeiten für den Neubau Anbau Rathaus

Zu den Leistungen des selektiven Rückbaus gehören neben dem Rückbau selbst der vorhergehende Schadstoffausbau und die Entkernung sowie die Leistungen für den Transport und die Verwertung der Baustoffe. Die vorbereitenden Arbeiten für den Neubau beschreiben unter anderem das Einbringen von RC-Materialien als Tragschicht und ggf. als Frostschutzschicht im Bereich der Fundamente. Für den Neubau des Rathausanbaus sollte ein Großteil des selektiv rückgebauten Betons des Altbaus als sortenreine RC-Gesteinskörnung für Beton nach DIN EN 12620/DIN 4226-101 (DIN EN 12620, 2008) aufbereitet werden. Die ausgeschriebenen Massen und Leistungen im Zusammenhang mit den mineralischen Bauabfällen waren:

- 1) 5.000 t Beton (AVV: 17 01 01) der Klasse Z1.1 sind selektiv zurückzubauen, zu verladen, zu der Aufbereitungsanlage zu transportieren und aufzubereiten.
- 2) Aus dem Betonbruch lassen sich voraussichtlich ca. 3.000 t RC-Gesteinskörnung (4/22 mm) herstellen.
- 3) Die übrigen 2.000 t fallen als RC-Füllsand (0/4 mm) an und sollen extern verwertet werden.
- 4) Außerdem sind bis zu 2.800 t R-Beton-Tragschichten für die Verkehrsflächen und weitere 200 t für Auffüllarbeiten im Bereich der Fundamente eingeplant. Die Mengen können sich je nach notwendiger Gründungshöhe und Bauweise des Neubaus noch gravierend verändern. Es wird jedoch angenommen, dass alle für den Neubau benötigten Mengen an Schüttgutstoffen als gütegesicherte RC-Baustoffe aus den Abbruchmassen gewonnen werden können.

Ein Teil des Ziegelmauerwerks (200 t von 500 t) der Stadtwache soll als sortenreiner Zuschlagsstoff für die Fassade des Neubaus eingesetzt werden.

Die Mengen wurden in der Ausschreibung gegenüber der vorherigen Schätzung aufgerundet, um Nachträge zu vermeiden. Die Ausschreibung des Rückbaus wurde explizit auf die geplante Wiederverwertung der Materialien ausgerichtet. Dabei wurden in der Vorplanung Vorgaben für die Ausschreibung des Rückbaus festgelegt, welche sich u.a. auf die Anforderungen an die Qualifikation der Abbruch- und Aufbereitungsunternehmen und die Separierung der Abfallfraktionen beziehen. Die Ausschreibung wies insbesondere auf die Separierung der mineralischen Fraktionen nach Umweltverträglichkeitsklasse z.B. gemäß LAGA M20 und die erforderlichen Laboranalysen hin.

Weitere relevante Bestandteile der Ausschreibung waren die Relevanz der Schadstoffentfrachtung, der eingeschränkte Platz auf der Rückbaustelle und Informationen zu regionalen Recyclingbetrieben. Weitere Details zu der Ausschreibung finden sich in Anhang D.

5.1.7 Umsetzung des selektiven Rückbaus

Die Rückbauleistungen wurden an die Firma Bonensteffen GmbH vergeben. Das Unternehmen mit dem Sitz in 33758 Schloß Holte-Stukenbrock hat sein Geschäftsfeld im Bereich Wertstoffhandel, Recycling, Abbruch, Rückbau, Demontagen und Sanierungsarbeiten. Die Aufbereitung des Bauschutts wurde von der Firma Funke GmbH in Volkmarsen durchgeführt. Das Betriebsgelände des Baustoffunternehmens befindet sich in 34471 Volkmarsen, etwa 30 km von der Baustelle in Korbach entfernt. Aufgrund einer baustellenbedingten Straßensperre auf der Strecke zwischen Korbach und Volkmarsen erhöhte sich die Entfernung zum Zeitpunkt des Rückbaus auf 40 km. Auf dem Gelände des Baustoffunternehmens wird üblicherweise sowohl Naturgestein als auch Bauschutt mit einer mobilen Aufbereitungsanlage aufbereitet und vertrieben (Flore, 2019). Das Unternehmen nimmt Bauschutt bis zur Zuordnungsklasse Z1.1 nach LAGA an. Der Recyclingbeton für den Rathausanbau wurde im Betonwerk FMK Fertigmischbeton Korbach GmbH & Co. KG – Transportbeton in 34497 Korbach hergestellt. Die Fassadenfertigteile stellte die Firma HERING Bau GmbH & CO KG in 57299 Burbach her. Die Standorte des Projekts, des Auftraggebers und der beteiligten Akteure sind in Abbildung 3 dargestellt.

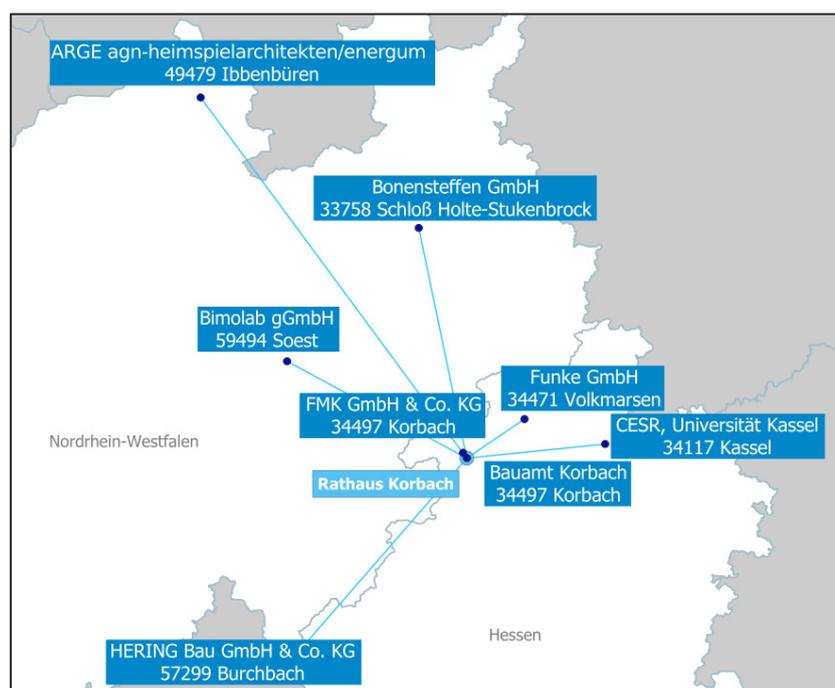


Abbildung 3. Innovationsnetzwerk des Urban Mining Pilotprojekts „RückRat“.

Vor dem eigentlichen Rückbau wurden die Schadstoffe entfernt und alle Einbauteile, Fenster, Innenwände, Gebäudetechnik etc. bis auf die Tragwerkskonstruktion ausgebaut und separat gelagert.



Abbildung 4. Beispiele für separat gelagerte Fraktionen aus dem Schadstoffausbau und die Entkernung (A) Rigips Platten (B) Metall (Lüftung) (C) KMF-Dämmmaterial (D) gemischte Bauabfälle. Quelle: Fotografin Dilan Glanz.

Die in Tabelle 8 aufgeführten Abfallfraktionen wurden der Entsorgung zugeführt.

Tabelle 8. Im Zuge des Schadstoffausbaus erfasste Abfallfraktionen im Modellprojekt „RückRat“

Abfallschlüssel nach AVV	Beschreibung	Entsorgungs-/Verwertungsweg
13 07 01	Heizöl	Entsorgung
14 06 01	Fluorchlorkohlenwasserstoffe, HFCKW, HFKW	Thermische Entsorgung
17 06 03	KMF-Dämmmaterial	Deponie
17 06 05	Asbesthaltige Baustoffe	Deponie
17 02 01	Holz A1 bis A3	Thermische Entsorgung
17 02 04	Holz A4	
17 03 01	Teerhaltige Dachbahnen	Thermische Entsorgung

20 01 21	Leuchtstoffröhren	Weiterverwertung durch die Stiftung Elektro-Altgeräte-Register (ear)
----------	-------------------	--

Ein Teil der Glasabfälle, der zunächst als rezyklierbar eingestuft wurde, musste wegen Verunreinigungen mit Bauschutt deponiert werden. Die ausgebauten Leuchtstoffröhren wurden an die Firma Interseroh geliefert, wo sie nach eigenen Angaben des Unternehmens weitestgehend in ihre Bestandteile zerlegt und dann durch die Stiftung Elektro-Altgeräte-Register (ear) weiterverwertet wurden. Nach dem Schadstoffausbau und der Entkernung erfolgte der selektive Betonabbruch. Die Innenwände aus Mauerwerk wurden mit Hilfe eines Minibaggers zurückgebaut. Die Außenwände, tragenden Innenwände, Böden und Decken aus Beton wurden mit Longfrontbaggern abgebrochen. Die Bagger waren mit Abbruchscheren (Pulverisierer) ausgestattet, die zum Zerkleinern des Stahlbetons und zum Trennen der Bewehrung vom Beton eingesetzt wurden. Zur Staubreduktion wurde ein Wasserwerfer eingesetzt. Schwierigkeiten bei der sortenreinen Erfassung der Betonfraktion entstanden durch Verbundkonstruktionen, wie die „verlorene Schalung“ in der Rippendecke des Ratssaals, sodass sich nach dem Abbruch Verunreinigungen wie Holz- und Styroporreste im Betonbruch befanden.



Abbildung 5. Herausforderung der getrennten Erfassung: Verlorene Schalung mit Holz- und Styroporresten in der Betonkonstruktion (Rippendecke des Ratssaals). Quelle: Fotografin Dilan Glanz.

5.1.8 Dokumentation der Massen und Verwertungswege und Prüfung der Mineralischen Abbruchabfälle nach DIN 4226-101

Die Massen der Abfälle und Wertstoffe wurden aus den Wiegescheinen des Abbruchunternehmens entnommen und in Tabellen übertragen. Die Tabellen beinhalten neben den Mengen unter anderem die jeweilige Zuordnung zu den Positionen in der Ausschreibung und Angaben zu dem Verwerter/Entsorger. Für die mineralischen Bauabfälle wurde eine Unterteilung in die Gebäudeeinheiten „Rathausanbau“, „Stadtwache“ und „Hinterhaus“ vorgenommen. Es wurden insgesamt 824 Wiegescheine ausgewertet. Weiterhin wurden die Mengen des angelieferten RC-Materials für die Vorbereitung des Neubaus erfasst und dokumentiert. Während der Entkernungs- und Rückbauarbeiten wurden weitere Einzelproben aus Beton-, Mauerwerksbaustoffen (Ziegel, Bimsstein-Mauerwerk und Porenbeton) und Asphalt entnommen und nach LAGA M20 beprobt. Einige Proben hielten die Höchstwerte der Zuordnungsklasse Z1.1 zunächst nicht ein. Da die Werte sich in der Regel nach der Aufbereitung verbessern, wurden diese Proben bei dem verantwortlichen Unternehmen aufbereitet

und erneuert beprobt. Nach der Aufbereitung erfüllten die Baustoffe die Anforderungen der Zuordnungsklasse Z1.1, sodass die entsprechenden Bauteile zur Aufbereitung zugelassen wurden (Kurkowski, 2020b).

5.2 Aufbereitung und Herstellung R-Beton

5.2.1 Aufbereitung des mineralischen Bauschutts

Für die Aufbereitung des mineralischen Bauschutts wurde eine mobile Anlage verwendet, die aus einem Prallbrecher mit integriertem Magnetabscheider und einer Siebanlage besteht. Sie wurde durch einen Windsichter ergänzt, um Leichtstoffe wie Kunststoffe und Holz abzutrennen und die nötige Qualität der Gesteinskörnung nach DIN 4226-101 (DIN 4226-101, 2017) zu erreichen.



Abbildung 6. Schritte der Aufbereitung in der mobilen Anlage: Aufgabe (Bagger), Brechen (Prallbrecher) Sieben, Klassieren (Windsichter) und Transport (Radlader). Quelle: Fotografin Dilan Glanz, Integra Windsichter.

Der angelieferte Beton wurde zunächst in der Brecheranlage zerkleinert, dann über den Magnetabscheider von Metallresten befreit und anschließend in die Fraktionen 0/8 mm, 8/22 mm und 22/X mm gesiebt. Gesteinskörnung der Größe 8/22 mm wurde in den Windsichter weitergeleitet. Etwa 10 - 20 % des Überkorns (22/X mm) wurden in einem zweiten Durchlauf behandelt und zu RC-Gesteinskörnung aufbereitet. Eine Unterteilung der Feinfraktion (0/8 mm) in die Fraktionen 0/4 mm und 4/8 mm, um die gewünschte Korngröße für die RC-Gesteinskörnung (4/22 mm) zu erreichen, konnte nicht vorgenommen werden. Die zusätzliche Separationsstufe im Windsichter machte es erforderlich, das Material in einer ausreichend engen Körnung bereitzustellen, um gute Abscheideergebnisse zu erreichen. Die Stärke des Luftstroms musste so eingestellt werden, dass möglichst viele Kunststoff- und Holzreste entfernt werden konnten. Die feine Gesteinskörnung wäre in diesem Prozess ebenfalls über den Luftstrom entfernt worden, so dass lediglich die Fraktion der Körnung 8/22 mm in den Windsichter weitergeleitet wurde. Dennoch konnte der mit den Schalungselementen verunreinigte Beton nicht vollständig von den Leichtstoffen befreit werden. Die aus diesem Beton gewonnene RC-Gesteinskörnung wurde zusammen mit dem RC-Sand und dem Überkorn und gemischten mineralischen Abfällen für die Verfüllung genutzt. Insgesamt wurden in der mobilen Anlage aus etwa 6.900 t abgebrochenem Beton ca. 1.000 t RC-Gesteinskörnung für die Herstellung von R-Beton gewonnen. Die angefallene Leichtfraktion wurde extern einer thermischen Verwertung zuführt. Alle Massen-

und Energieströme bezogen auf die Herstellung einer Tonne RC-Gesteinskörnung sind in Kapitel 5.5 dargestellt.

Zusätzlich wurden 18 t Tondachziegel der Nebengebäude zu 10 t Ziegel-Gesteinskörnung 8/16 mm aufbereitet. Die Position sortenreine Ziegelsteine aus der Stadtwache war für die Herstellung von R-Beton nicht geeignet, da das Material nicht die erforderliche Festigkeit aufwies. Der Aufbereitungsbetrieb wurde vom Baustoffüberwachungsverein Hessen – Rheinland-Pfalz e.V. (BÜV HR) zertifiziert, wodurch die Konformität der werkseigenen Produktionskontrolle (WPK) mit den Anforderungen der Bauproduktenverordnung bestätigt wird. Die hergestellte RC-Gesteinskörnung wurde auf dem Werkhof auf die Konformität mit den maßgeblichen Normen (DIN EN 12620 und DIN 4266-101) zertifiziert und mit einer CE-Kennzeichnung versehen. Ein einmaliger Nachweis der Umweltverträglichkeit der Firma Funke war ausreichend, da die DIN 4226-101 bei diskontinuierlicher Produktion eine Prüfung alle 5.000 t vorsieht. Alle Prüfhäufigkeiten und Prüfanforderungen gemäß DIN EN 12620/DIN 4226-101 wurden im Rahmen der Erstprüfung und Aufnahme der WPK damit erfüllt (Kurkowski, 2020a).

5.2.2 Herstellung von R-Beton

Für den Neubau wurden Transportbetone der Festigkeitsklassen C25/30 und der Expositions- und Feuchtigkeitsklasse XC1, WO und XC2, wasserundurchlässiger Beton (WU) ausgeschrieben. Die Rezeptur des XC1 Betons (insbesondere der Wasser-Zement-Wert) wurde auf die Anforderungen an die Festigkeit ausgerichtet und kann für Expositionsklassen bis XC4 eingesetzt werden. Der Beton wird daher im weiteren als XC4, WO bezeichnet. Der Beton XC2, WU entspricht einem Beton mit hohem Wassereindringwiderstand nach DIN 1045-2 und DIN EN 206. Die Angaben zu den RC-Anteilen und weiteren Betonbestandteilen finden sich in Tabelle 15 (vgl. Kap. 5.6). Neben dem Beton mit RC-Gesteinskörnung des Typs 1 wurde für die Fassadenelemente ebenfalls Beton mit RC-Gesteinskörnung des Typs 1 erstellt, in welcher ca. 8 M.-% der Gesteinskörnung durch Ziegel-Rezyklat ersetzt wurde, die in der ökobilanzellen Betrachtung nicht berücksichtigt sind. Die RC-Anteile werden in den Lieferdaten des Herstellers in Masseprozent (M.-%) angegeben und in Volumenprozent (Vol.-%) der gesamten Gesteinskörnung umgerechnet.

5.2.3 PLAN - IST Vergleich

Bei der Umsetzung des Urban Mining Konzepts des Projekts „RückRat“ Korbach haben sich einige Abweichungen von der ursprünglichen Planung ergeben. Zum einen unterschieden sich die Massen der zurückzubauenden Materialien von den ursprünglich abgeschätzten Massen, zum anderen wichen die Art und Massen der hergestellten RC-Gesteinskörnung von den im Vorfeld getroffenen Annahmen ab. Obwohl mehr Beton als zur Aufbereitung zu RC-Gesteinskörnung nach DIN EN 12620 und DIN 4226-101 geeignet eingestuft wurde als ursprünglich angenommen, wurde weniger RC-Gesteinskörnung hergestellt. Die mineralischen Fraktionen, die im Modellprojekt zurückgebaut wurden und einer Verwertung vor Ort oder an anderer Stelle zugeführt wurden, sind in der folgenden nach geplanten und tatsächlich erfassten Massen gegenübergestellt. Die geplanten und tatsächlich erfassten Massen aller Abfälle und Wertstoffe aus dem Rückbauprojekt sind im Anhang E aufgeführt.

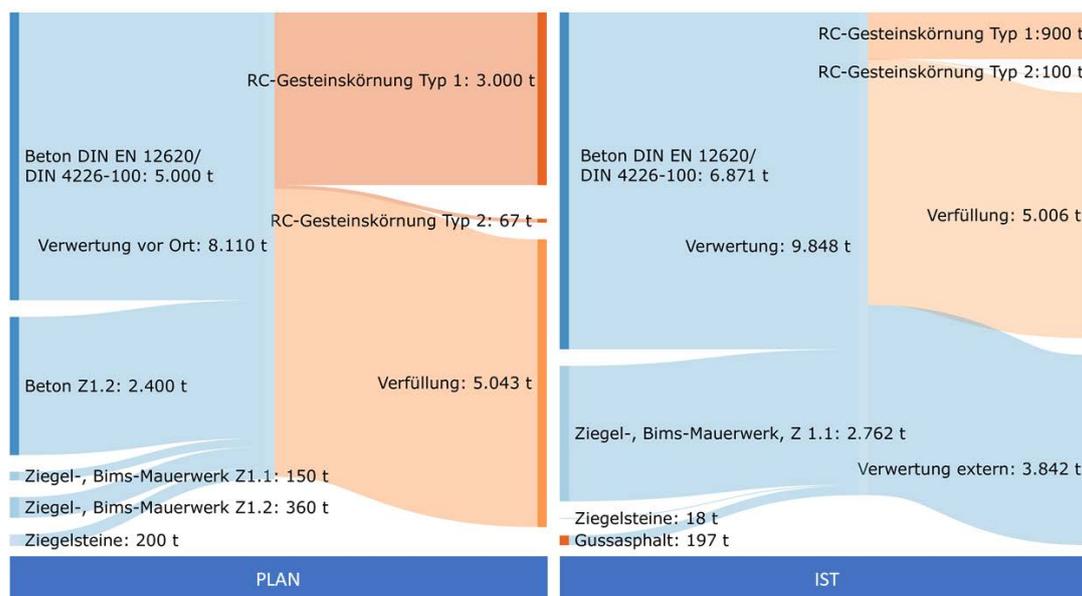


Abbildung 7. Massenströme in Tonnen und Verwertungswege der Betonfraktion des Modellprojekts, links gemäß Ausschreibung (Kurkowski, 2019), rechts gemäß Massenermittlung (eigene Berechnung)

Insgesamt wurden in dem Modellprojekt 6.891 t Stahlbeton zurückgebaut und 6.871 t Beton dem Recycling in einer mobilen Aufbereitungsanlage zugeführt. Entgegen der ursprünglichen Annahmen, wonach 32 % (2.400 t von 7.400 t) des Betons aufgrund der Voruntersuchungen als nicht für die Herstellung von RC-Gesteinskörnung geeignet beurteilt wurden, konnten ein Großteil der Masse der Betonabfälle für die Herstellung der RC-Gesteinskörnung nach DIN EN 12620 und DIN 4226-101 genutzt werden. Allerdings konnten prozessbedingt nicht, wie geplant, 50 % der Betonmasse zu RC-Gesteinskörnung der Korngröße 4/22 mm verarbeitet werden. Stattdessen wurde RC-Gesteinskörnung der Korngröße 8/22 mm hergestellt, deren Masse 15 % des Eingangsmaterials entsprach. Zusätzlich zu dem erwarteten Feinanteil (RC-Sand) fielen bei der Aufbereitung der Betonfraktion RC-Material mit einer Korngröße größer 22 mm an. Der RC-Sand und das RC-Material aus Beton wurden zusammen mit gemischten mineralischen Abfällen zu RC-Material als ungebundene Frostschutzschicht und Tragschicht vor Ort verwertet. Insgesamt wurden 5.000 Tonnen RC-Material für die Verfüllung verwendet. Die lose Kies- und Schotterfraktion, in der zunächst Recyclingpotential mit minimalem Aufbereitungsaufwand gesehen wurde, wurde im direkten Bereich der Baustelle u.a. als Baustraße wiederverwendet.

5.3 Ökologische Bewertung

Ein wesentliches Ziel des Projekts war die ökologische Bewertung (Ressourcennutzung und Klimawirkung) des Einsatzes von R-Beton im Vergleich zu konventionellem Beton. Die Bewertung folgt der Methodik einer Ökobilanz, die nach ISO 14040 (DIN EN ISO 14040, 2009) standardisiert ist, sowie den Grundregeln für Umweltproduktdeklarationen von Bauprodukten (DIN EN 15804, 2014). Als Bewertungsmaßstab dienen die Produkt-Fußabdrücke. Der Material-, Energie-, und Wasserfußabdruck von Produkten und Dienstleistungen stellen als Produkt-Ressourcenfußabdrücke ein Maß für die Umweltbelastungen der Ressourcennutzung dar; der Produkt-Klimafußabdruck ein Maß für die globalen Temperatur- und Klimaveränderungen aufgrund von Treibhausgas (THG) Emissionen.

5.3.1 Systemgrenzen und Szenarien

Für die Bestimmung der Fußabdruck-Indikatoren umfasst die Systemgrenze die Entsorgungs- und Herstellungsphase des Betons. Die Entsorgungsphase von Beton wird den Lebenszyklusmodulen C1-C3 nach DIN EN 15804 (DIN EN 15804, 2014) zugeordnet. Die Daten der Entsorgungsphase dienen anschließend zur Beurteilung der Herstellung von RC-Gesteinskörnung. Die Herstellung der Betonausgangsstoffe, der Transport zum Betonwerk und die Betonherstellung sind in Modulen A1-A3 beschrieben. Abbildung 8 stellt die Systemgrenzen und die betrachteten Lebenszyklusmodule der Fußabdruckanalyse dar.

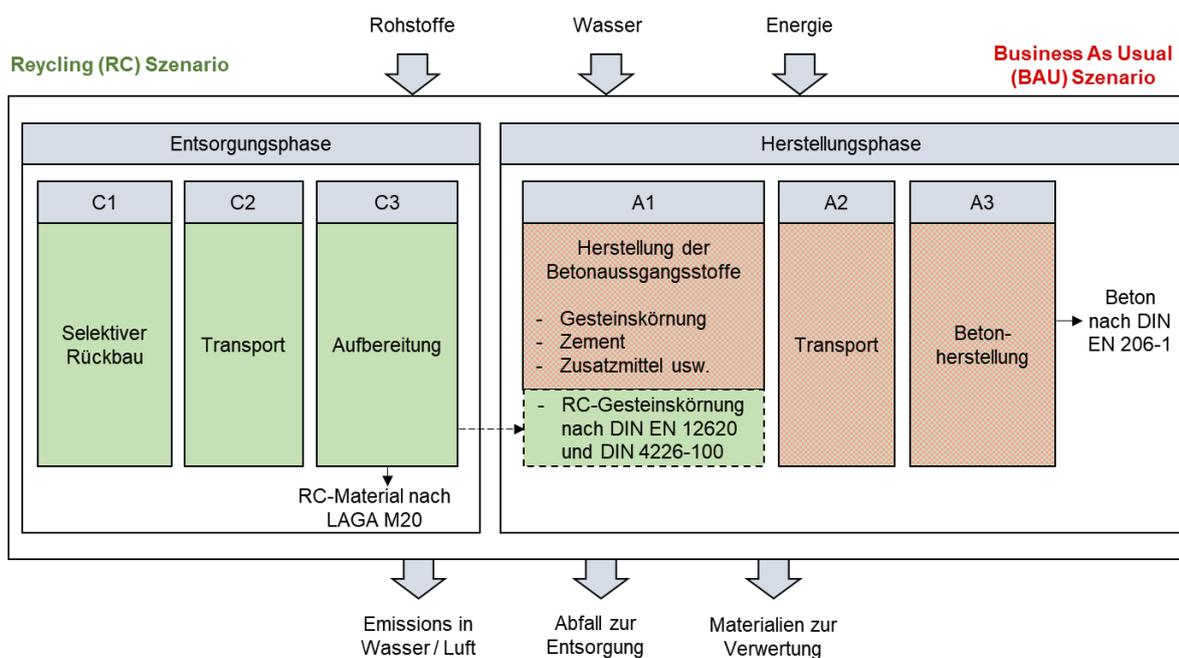


Abbildung 8. Systemgrenzen der Fußabdruckanalyse

Für die Entsorgungsphase wurden verschiedene Aufbereitungsszenarien berücksichtigt: Das Business As Usual (BAU)-Szenario beschreibt die konventionelle Aufbereitung von Betonabfällen zur Herstellung von RC-Gesteinskörnung für ungebundene Anwendungen nach LAGA M20 (RC-Material). Das RC-Szenario beinhaltet die Herstellung von RC-Gesteinskörnung für den Einsatz in Beton nach DIN EN12620 und DIN 4226-101, wobei als Nebenprodukt ebenfalls RC-Material anfällt. Die verschiedenen Szenarien für die Entsorgungsphase sind in Tabelle 9 aufgeführt.

Tabelle 9. Beschreibung der Entsorgungs-Szenarien von Beton in einem Business As Usual (BAU)- und Recycling (RC)-Szenario

Lebens- zyklus- phase	Lebens- zyklus- modul	Szenario			
		BAU		RC	
		BAUmobil	BAUstat	RCmobil	RCstat
Ent- sorgung	C1	Selektiver Rückbau		Selektiver Rückbau	
	C2	Transport des Betonbruchs zur Aufbereitungsanlage		Transport des Betonbruchs zur Aufbereitungsanlage	
	C3	Aufbereitung mobile Anlage	Aufbereitung stationäre Anlage	Aufbereitung mobile Anlage	Aufbereitung stationäre Anlage
Output C1-C3	RC-Material nach LAGA M20		RC-Material nach LAGA M20, RC-Gesteinskörnung nach DIN 4226-101	RC-Material nach LAGA M20, RC-Gesteinskörnung nach DIN 4226-101	

Für die BAU- und RC-Szenarien wurde jeweils die Aufbereitung in einer mobilen Anlage (BAUmobil, RCmobil) und einer stationären Anlage (BAUstat, RCstat) berücksichtigt. In der mobilen Anlage, die im Projekt „RückRat“ zum Einsatz kam, wurde RC-Gesteinskörnung der Korngröße 8/22mm hergestellt. In der stationären Anlage, deren Daten aus einem anderen Modellprojekt stammen, wurde RC-Gesteinskörnung der Korngröße 2/16 mm hergestellt (Heyn und Mettke, 2010). Dabei ist zu berücksichtigen, dass der jeweilige Aufbereitungsaufwand nicht nur von der Anlagentechnik, sondern auch von den Eigenschaften des Ausgangsmaterials abhängt.

Der Szenarienvergleich umfasst die Herstellung von konventionellem Beton (BAU-Szenario) und die Herstellung von R-Beton (RC-Szenario) mit einer mobilen Aufbereitungsanlage im Projekt „RückRat“. Es wurden jeweils zwei Betonmischungen der Festigkeitsklasse C25/30 betrachtet: (1) Beton der Expositionsklasse XC4 und der Feuchtigkeitsklasse WO (2) Beton der Expositionsklasse XC2 und der Feuchtigkeitsklasse WU jeweils nach DIN EN 260-1 und DIN 1045-2. Die Herstellungsphase wird auf 1 m³ Beton und 1 m² Bruttogrundfläche des gesamten Rohbaus betrachtet (Tabelle 10).

Tabelle 10. Beschreibung der Szenarien der Beton-Herstellung

Lebens- zyklus- phase	Lebens- zyklus- modul	Szenario			
		BAU		RC	
		BAUwo	BAUwu	RCwo	RCwu
Her- stellungs- phase	A1	Herstellung der Betonausgangsstoffe (konventionelle Betonherstellung)		Herstellung der Betonausgangsstoffe inklusive RC-Gesteinskörnung nach DIN EN 12620/DIN 4226-101	
	A2	Transport der Materialien zum Betonwerk		Transport der Materialien zum Betonwerk	
	A3	Betonherstellung		Betonherstellung	
	Output A1-A3	Beton, C25/30, XC4, WO	Beton, C25/30, XC2, WU	R-Beton, C25/30, XC4, WO	R-Beton C25/30, XC2, WU

5.3.2 Funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit (FE) dient als Vergleichseinheit und legt „die Quantifizierung der angegebenen Funktionen des Produktes fest“ (DIN EN ISO 14044). Im Rahmen der Bewertung wurden vier verschiedene Funktionen unterschieden: Um die verschiedenen Szenarien der Entsorgungsphase zu vergleichen, wurde jeweils der Rückbau, der Transport und die Aufbereitung einer Tonne (Stahl)beton bewertet. Anschließend wurden die unterschiedlichen Technologien zur Herstellung von RC-Gesteinskörnung in Bezug auf eine Tonne RC-Gesteinskörnung nach DIN EN 12620 und DIN 4226-101 verglichen. Die Fußabdruckergebnisse der Herstellungsphase beziehen sich auf einen m³ Beton innerhalb der Festigkeitsklasse C25/30 für verschiedene Bauanwendungen. Die geplanten Anwendungen wurden durch die Expositionsclassen XC4 und XC2 und die Feuchtigkeitsklassen WO, WF und WU definiert. Anschließend wurden die Mengen der verschiedenen Betonarten, R-Beton und konventioneller Beton, aufsummiert, um die Fußabdrücke für 1 m² Bruttogeschossfläche (BGF) analysieren zu können. Eine Zusammenfassung der FE, die für die Fußabdruckanalyse verwendet werden, ist in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11. Funktionelle Einheiten (FE) für die Fußabdruckanalyse

Lebenszyklus -phase	Entsorgung	Herstellung von RC-Gesteinskörnung	Betonherstellung	Herstellung eines Gebäudes
Funktion	Rückbau, Transport und Aufbereitung von Beton	Herstellung von RC-Gesteinskörnung nach DIN EN 12620 und DIN 4226-101	Herstellung von Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2	Bereitstellung von Beton für den Rohbau eines Gebäudes
Funktionelle Einheit	1 Tonne Betonbruch	1 Tonne RC-Gesteinskörnung	1 m ³ Beton C25/30, XC4, WO bzw. XC2, WU	1 m ² Bruttogeschossfläche (BGF)

5.4 Indikatoren

5.4.1 Produkt-Materialfußabdruck

Der Produkt-Materialfußabdruck wurde als ökobilanzielles Bewertungsverfahren entwickelt, um die Umweltbelastungen und Beeinträchtigungen natürlicher Systeme aufgrund der Nutzung natürlicher, materieller Ressourcen abzuschätzen (Mostert und Bringezu, 2019). Das Bewertungsverfahren wurde zunächst für abiotische Materialien entwickelt. Zentrales Element des Charakterisierungsmodells ist die Entnahme von natürlichem Primärmaterial aus dem Naturraum und die Verlagerung in die Technosphäre bzw. innerhalb des Naturraums. Ein Teil des Primärmaterials wird als Rohstoff, bspw. Erz, in die Technosphäre transferiert und dort zu Material für die Produktion, bspw. Kupfer, weiterverarbeitet. Der übrige Teil wird als ungenutztes Extraktionsmaterial, z.B. Abraum, im Naturraum abgelagert. Die Entnahme von Primärmaterial und die Ablagerungen des ungenutzten Anteils verändern den Zustand der betroffenen natürlichen Kompartimente Boden, Wasser sowie Luft und führen dort zu direkten und indirekten Umweltwirkungen und Schäden am Schutzgut Ökosysteme. Diese Schäden sind in bestehenden ökobilanziellen Bewertungsverfahren bisher noch nicht berücksichtigt.

Der Produkt-Materialfußabdruck wird mit Hilfe von zwei Indikatoren bestimmt: (1) dem Gesamtprimärmaterialbedarf (engl. Total Material Requirement, TMR) und (2) dem Rohstoffaufwand (engl. Raw Material Input, RMI). Der TMR schätzt die Umweltbelastung der Materialnutzung hinsichtlich der extrahierten Mengen an natürlichem Primärmaterial pro FE ab; der RMI hinsichtlich der Menge an genutztem Rohstoff pro FE. TMR und RMI sind damit umsatzbasierte Umweltbelastungsindikatoren bzw. Midpoint-Indikatoren im Sinne der Ökobilanz.

5.4.2 Produkt-Wasserfußabdruck

Die Grundlagen zur Ermittlung und Berichterstattung des Produkt-Wasserfußabdrucks sind in DIN EN ISO 14046 (ISO 14046, 2014) geregelt. Die Arbeitsgruppe „Water Use in Life Cycle Assessment“ (WULCA) der „UNEP-SETAC Life Cycle Initiative“ hat hierzu eine Methode zur Berechnung des Wasserfußabdrucks entwickelt (Boulay et al., 2017). Ausgangspunkt dieser Initiative ist das Verlangen nach einem Indikator, der Ergebnisse von Berechnungen auf Grundlage der DIN EN ISO 14046 vergleichbar macht. Derzeit existieren mehrere Indikatoren, die über verschiedene Berechnungsmodelle ermittelt werden und dabei den Wasserverbrauch,

aber nicht die Verfügbarkeit in der spezifischen Region berücksichtigen. Mit der neu entwickelten Methode AWARE (Available Water Remaining) kann die in einem Wassereinzugsgebiet oder in einem Land verbleibende Wassermenge abzüglich des Wasserbedarfs von Menschen, Tieren und Pflanzen ermittelt werden. Der Wasserbedarf von Pflanzen wird häufig über die landwirtschaftliche Bewässerung bestimmt. Pflanzen, die nicht für landwirtschaftliche Zwecke genutzt werden, bleiben unberücksichtigt. Mit Hilfe von AWARE kann eingeschätzt werden, wie anfällig ein Einzugsgebiet potenziell für Wasserstress ist. Für die Berechnung der Charakterisierungsfaktoren bedient man sich der Variablen AMD (Availability Minus Demand), die sich aus der Wasserverfügbarkeit abzüglich des Bedarfs von Menschen und Umwelt, bezogen auf die Referenzfläche, zusammensetzt. Als Wirkungsindikator für die Berechnung des Produkt-Wasserfußabdrucks wird Water Use (WU) pro FE nach AWARE verwendet (Boulay et al., 2017).

5.4.3 Produkt-Klimafußabdruck

Der Produkt-Klimafußabdruck wird über den Indikator Global Warming Impact (GWI) pro FE bestimmt. Für seine Berechnung wird das Charakterisierungsmodell Global Warming (Globale Erwärmung) mit einem Zeithorizont von 100 Jahren gewählt (European Commission, 2011). Dazu wird als Charakterisierungsfaktor das Global Warming Potential (GWP100) herangezogen. Diese vom International Panel of Climate Change (IPCC) bestimmte Faktoren geben die Menge an CO₂-Emissionen an, welche die gleiche Auswirkung auf die Verstärkung des Strahlungsantriebs und damit die Klimabelastung hat, wie 1 kg eines betrachteten Treibhausgases. So verursacht beispielsweise 1 kg Methan-Emissionen die gleichen Klimaauswirkungen wie 28 kg CO₂-Emissionen. Das GWP100 wird daher in der Einheit kg CO₂-Äquivalente (CO₂eq.) pro kg des betrachteten THG angegeben, im Fall von Methan also 28 kg CO₂eq/kg Methan. In dieser Analyse wird auf die Daten des fünften Sachstandsberichts des IPCC zurückgegriffen (Myhre et al., 2013).

5.4.4 Produkt-Energiefußabdruck

Der Produkt-Energiefußabdruck wird durch den Indikator kumulativer Energieaufwand (KEA, engl. Cumulated Energy Demand, CED) pro FE bestimmt. Der CED berücksichtigt den lebenszyklusweiten direkten und indirekten Energieverbrauch, einschließlich des Energieverbrauchs für die Gewinnung, Produktion und Entsorgung von Rohstoffen. Der CED beinhaltet erneuerbare und nicht-erneuerbare Energieressourcen (Huijbregts et al., 2010). Im Rahmen der Bewertung werden nur nicht-erneuerbare Energieressourcen (CED_{non renewable}) bewertet.

5.4.5 Software, Datenbank und Modellierung

Die in das System eingehenden Stoff-, Energie- und Wassermengen sowie die das System verlassende Menge an Treibhausgasemissionen wurden anhand der projektspezifischen Primärdaten bilanziert und die Sekundärdaten mit Hilfe der GaBi Datenbanken GaBi Professional (Sphera Solutions Inc., 2020b) und GaBi Construction materials (Sphera Solutions Inc., 2020a) ermittelt. Die Modellierung erfolgte in der Software openLCA (www.openlca.org) der Firma GreenDelta. Die Sachbilanzergebnisse sind im Anhang F dokumentiert.

5.5 Material- und Energieflussbilanz der Entsorgungsphase

In der Entsorgungsphase wurden beim selektiven Rückbau (C1) der Betonkonstruktion 6.891 Tonnen Beton und 190 Tonnen Stahlbewehrung gewonnen. Unter der Annahme, dass etwa 7.400 Tonnen Beton im Gebäude verbaut waren, wurde eine Sammelrate von 93 % berechnet. Entsprechend müssen etwa 1,07 Tonnen Beton abgebrochen werden, um 1 Tonne Beton für die weitere Aufbereitung zur Verfügung zu stellen. Der Energiebedarf für den Abbruch je Tonne Stahlbeton wurde anhand des Treibstoffverbrauchs der Bagger berechnet (CAT, 2020; rental, 2020). Die Bagger waren 30 Tage zwischen 7 und 8 Stunden pro Tag im Einsatz.

Zur Berechnung des Energiebedarfs wurde von einer Auslastung von 50 % ausgegangen. Außerdem wurde ein Verbrauch von 0,28 Litern Diesel pro kWh bei einer Motorauslastung von 50 % (Heyn und Mettke, 2010) und ein Energiegehalt von 37 MJ/l (Sphera Solutions Inc., 2020b) angenommen. Der Energiebedarf für den Abbruch wurde auf Grundlage der tatsächlich erfassten Mengen bestimmt. Die Berechnung des Treibstoff- und Energiebedarfs für den Abbruch des Stahlbetons sind in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12. Treibstoff- und Energiebedarf für den Abbruch der Stahlbetonstruktur

Gerät	Leistung	Einsatzzeit	Energiebedarf	Verbrauch Motor	Dieselbedarf	Energiebedarf
	[kW]	[h]	[kWh]	[l/kWh]	[l]	[MJ]
Bagger 30 t	178	240	21.360	0,28	5.981	221.293
Bagger 40 t	234	240	28.080	0,28	7.862	290.894
Summe Energiebedarf [MJ]						512.187
Stahlbetonmasse [t]						7.081
Spezifischer Energiebedarf [MJ/t]						72

Nach den Berechnungen beträgt der Energiebedarf für den Abbruch und die Vorzerkleinerung von einer Tonne Stahlbeton 72 MJ. Angaben zu Wasser- und Energiebedarf der Staubreduzierungsmaßnahmen standen nicht zur Verfügung. Der in der Literatur angegebene Energieverbrauch vergleichbarer selektiver Rückbauprozesse mit Baggern liegt im Mittel bei 70 MJ/ und reicht von 28 MJ/t (Gayarre et al., 2016) bis 105 MJ/t (Heyn und Mettke, 2010). In der Transportphase (C2) wurde der auf 60 cm x 60 cm vorgebrochene Beton (ohne Bewehrung) mit Sattelzug-LKW über eine Strecke von 41 km zu einer mobilen Aufbereitungsanlage transportiert. Der Transportaufwand wird mit einem Auslastungsgrad von 50 % berechnet (0 % bis zur Baustelle, 100 % zur Aufbereitungsanlage). Die Daten für die Aufbereitung (C3), die mit einer mobilen Anlage erfolgte, wurden in Zusammenarbeit mit dem Recyclingunternehmen erhoben. Die Ergebnisse wurden mit Literaturdaten zur Aufbereitung in einer stationären Anlage verglichen (Heyn und Mettke, 2010). Die Hintergrunddaten für die Dieselproduktion, d.h. Ressourcenaufwendungen und Emissionen für die Rohstoffgewinnung, die Rohölproduktion und den Transport zur Raffinerie und zur Tankstelle, wurden der GaBi-Datenbank entnommen. Emissionen aus der Verbrennung von Diesel in den Motoren sind in den GaBi-Daten nicht berücksichtigt. Sie wurden im Modell unter Verwendung von Daten aus den IPCC-Richtlinien für nationale Treibhausgasinventare hinzugefügt (IPCC, 2006).

5.5.1 Bauschutttaufbereitung in einer mobilen Anlage

In der im Projekt verwendeten mobilen Recyclinganlage wurde der Beton in einen Brecher mit einem integrierten Magneten zur Metallabscheidung geladen. Nach der Zerkleinerung und Trennung von Stahlschrott wurde der Betonbruch in mehrere Größenfraktionen (0/8 mm, 8/22 mm und 22/70 mm) gesiebt. Im Anschluss wurde die Fraktion 8/22 mm in einem Windsichter geleitet und von Holz- und Kunststoffpartikeln getrennt (Mostert et al., 2020). Die Massenströme durch die Aufbereitungsanlage sind in Abbildung 9 dargestellt.

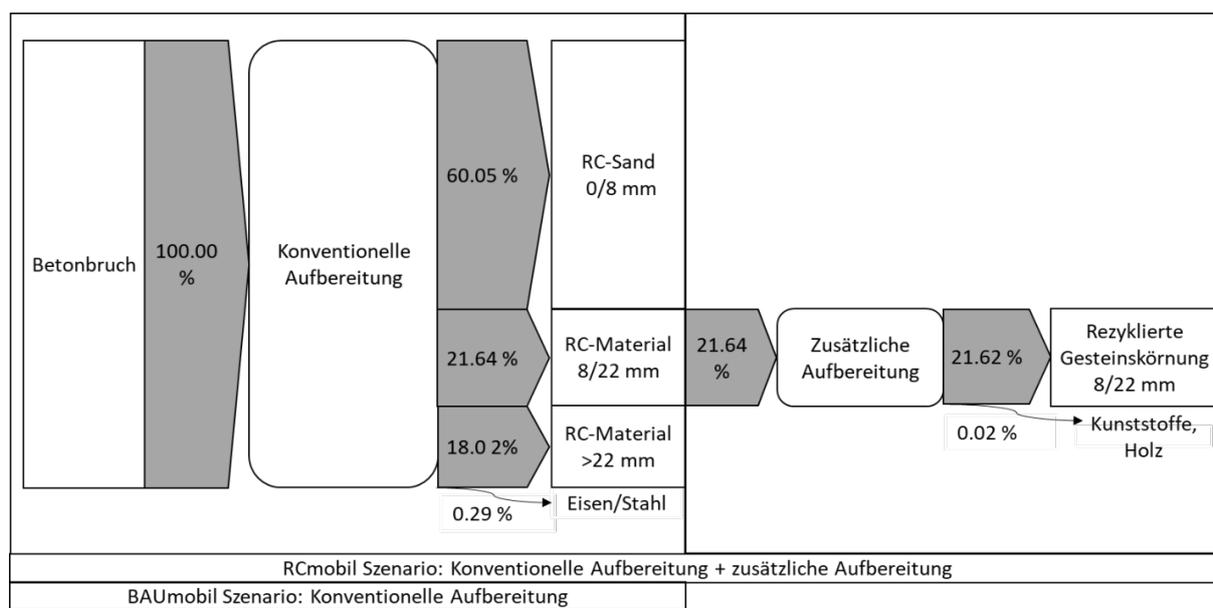


Abbildung 9. Massenströme bei der Aufbereitung von Betonbruch zu rezyklierter Gesteinskörnung in einer mobilen Aufbereitungsanlage

Bei der Verarbeitung von 1 t Betonbruch wurden 0,029 t Stahl abgetrennt und einem Recycling zugeführt. In der Siebstufe wurden 0,216 t RC-Gesteinskörnung der Größe 8/22 mm, 0,602 Tonnen RC-Sand der Größe 0/8 mm und 0,181 t RC-Gesteinskörnung der Größe 22/70 mm hergestellt. Der Energieeinsatz wurde als täglicher Dieselverbrauch von der Recyclingfirma ermittelt. Die Grunddaten zur Berechnung des Energiebedarfs für die Aufbereitung von 1 t Betonbruch sind in Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 13. Energieaufwand für die Aufbereitung von Beton in einer mobilen Aufbereitungsanlage

Prozess	Gerätebeschreibung	Diesel Input [l/Tag]	Material Input [t/Tag]	Energieaufwand [MJ/t]
Laden	Bagger, Komatsu PC 240	140	833	6,0
Brechen	Prallbrecher, Trakpactor 320	200	833	8,6
Sieben	Powerscreen Warrior 1400X	95	830	4,1

Separieren ¹	Windsichter Integra	40	180	1,7
Interne Transporte	Radlader	180	833	7,7
Energieaufwand pro Tonne Betonbruch, BAUmobil Szenario				26,4
Energieaufwand pro Tonne Betonbruch, RCmobil Szenario				28,1

¹ Die Windsichtung ist nicht in dem BAUmobil Szenario enthalten

5.5.2 Bauschutttaufbereitung in einer stationären Anlage

Nachfolgend ist die Berechnung einschließlich der entsprechenden Ergebnisse dargestellt, wenn die Bauschutttaufbereitung in einer stationären Anlage stattgefunden hätte. Die Aufbereitung besteht aus einer Trockenzerkleinerung und Siebung in drei Durchläufen und anschließender Nassabscheidung von Störstoffen (Heyn und Mettke, 2010). Aus einer Tonne Betonbruch wurden 0,51 t RC-Gesteinskörnung (2/16 mm), 0,29 t RC-Sand und 0,14 t RC-Gesteinskörnung (größer 16 mm) hergestellt. Zusätzlich werden 2,9 kg Stahl und 0,02 kg Leichtstoffe wie Holz und Kunststoffe abgetrennt. Die Materialströme in Prozent des vorgebrochenen Betons sind in Abbildung 10 dargestellt.

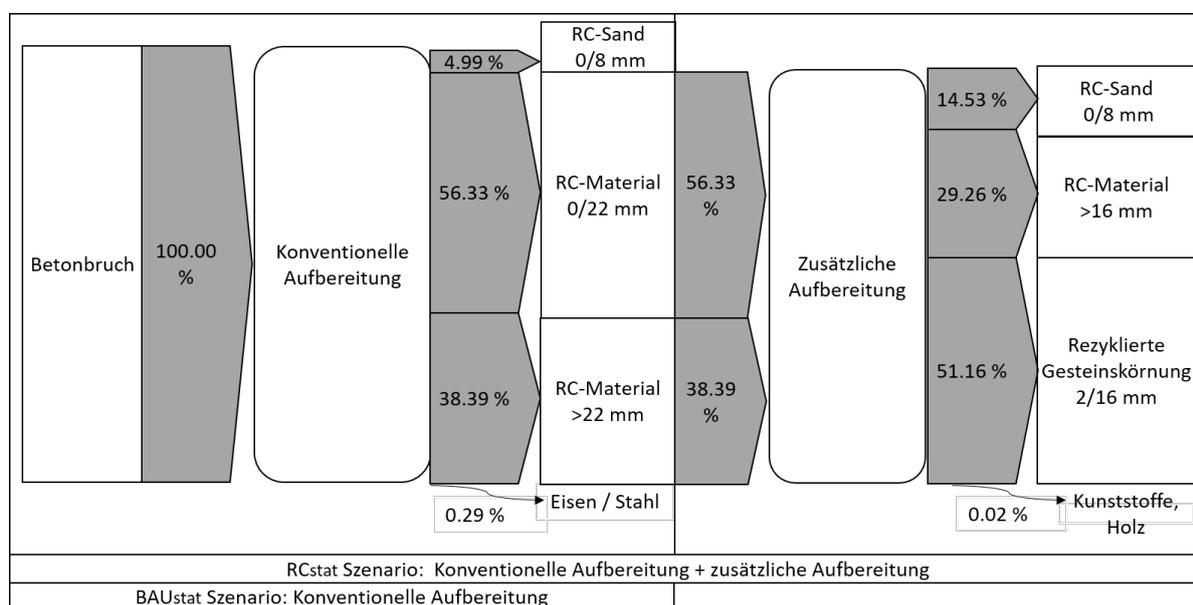


Abbildung 10. Massenströme bei der Aufbereitung von Betonbruch zu rezyklierter Gesteinskörnung in einer stationären Aufbereitungsanlage, eigene Berechnung nach Heyn und Mettke (2010)

Die Grunddaten zur Bestimmung des Energie- und Wassereinsatzes für die Behandlung von einer Tonne Betonbruch in einer stationären Anlage sind in Tabelle 14 aufgeführt.

Tabelle 14. Energieaufwand für die Aufbereitung von Beton in einer stationären Aufbereitungsanlage, eigene Berechnung nach Heyn und Mettke (2010)

Prozess	Gerätebeschreibung	Diesel [MJ/t]	Strom [MJ/t]	Gesamt [MJ/t]
Vorzerkleinern / Laden	Bagger Volvo 240 (30 t) Radlader Volco L180F	9,4	-	9,4
1. & 2. Durchlauf	Prallbrecher, Backenbrecher, Siebe, Bänder	-	8,2	8,2
3. Durchlauf	Prallbrecher, Siebe, Bänder	-	2,5	2,5
Nassaufbereitung	Setzmaschine, Radlader	5,1	10,3	15,4
Sonstige	Heizung, Licht	-	0,1	0,1
Energieaufwand pro Tonne Betonbruch, RCstat Szenario		14,5	21,1	35,6
Energieaufwand pro Tonne Betonbruch, BAUstat Szenario		9,4	8,3	17,7

Der Energiebedarf für die Vorbehandlung (Beladung und Zerkleinerung) und die ersten beiden Durchläufe der Trockenaufbereitung in der stationären Anlage beträgt 8,2 MJ Strom und 9,4 MJ Diesel pro Tonne Beton. Das Verfahren entspricht der konventionellen Verarbeitung von Betonabfall. Um RC-Gesteinskörnung nach DIN 206/1045-2 zu erzeugen, wird ein dritter Durchlauf der Trockenaufbereitung und eine anschließende Nassaufbereitung durchgeführt, die nicht in dem BAUstat Szenario enthalten sind. In diesem Schritt wird die RC-Körnung weiter zerkleinert und gesiebt, Wasser hinzugefügt und Leichtstoffe und Metallrückstände getrennt. Für die Verarbeitung von 1 Tonne Betonbruch und die zusätzliche Nassaufbereitung werden 21,1 MJ Strom, 14,5 MJ Diesel und 0,2 m³ Frischwasser benötigt (Heyn & Mettke, 2010).

5.6 Material- und Energieflussbilanz der Betonherstellung

Die bilanzierten Betonmischungen entsprechen Betonen (1) für den Einsatz im trockenen Bereich mit der Expositionsklasse bis XC4 (WO-Beton) und (2) für den Einsatz im feuchten Bereich als Beton der Expositionsklasse XC2 mit hohem Wassereindringwiderstand (WU-Beton). Die Anteile von Gesteinskörnung, Zement, Wasser und Zusatzstoffen der Betone sind in Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 15. Betonzusammensetzung im Recycling (RC)- und Business as Usual (BAU)-Szenario

		RCwo	BAUwo	RCwu	BAUwu
		C25/30, XC4, WO		C25/30, XC2, WU	
Anteil RC-Gesteinskörnung	M.-%	43	0	35	0
	Vol.-%	45	0	35	0
Rezyklat (8/22 mm)	kg/m ²	770	0	618	0
Splitt (2/16 mm)	kg/m ²	279	1.121	421	1.120
Sand	kg/m ²	754	721	745	722
Zement (CEM II)	kg/m ²	335	340	345	330
Wasser	kg/m ²	140	160	140	165
Zusatzmittel	kg/m ²	3	4	2	3
Masse gesamt	kg/m ²	2.281	2.346	2.271	2.340

In dem Modellprojekt wurde RC-Gesteinskörnung (8/22 mm) aus einer mobilen Anlage für die Herstellung von R-Beton eingesetzt. Die Daten der R-Betonmischungen wurden durch den Betonhersteller zur Verfügung gestellt. Die Betonausführungen wurden nach DIN EN 12390-3:2019-10 (2019) auf ihre Druckfestigkeit geprüft und auf die Festigkeitsklasse C25/30 abgestimmt. Um die Anforderungen zu erfüllen, wurden für den R-Beton im trockenen Bereich (RCwo) 45 Vol.-% und im feuchten Bereich (RCwu) 35 Vol.-% der natürlichen Gesteinskörnung durch RC-Gesteinskörnung ersetzt. Die Betonzusammensetzungen wurden aus den Betoneigenschaftsverzeichnissen des Herstellers übernommen.

5.6.1 Betrachtung auf Gebäudeebene

Der Einsatz des R-Betons im Rathausanbau wurde anhand der Aufteilung der Betonmengen nach Festigkeits- und Expositions- bzw. Feuchtigkeitsklassen im Rohbau bilanziert. Insgesamt wurden 2.939 m³ Beton eingesetzt, davon 1.312 m³ R-Beton (vgl. Tabelle 16).

Tabelle 16. Varianten und Volumen der Betone für den Neubau des Rathausanbaus

Betontyp	BAU Szenario	RC Szenario
	Menge [m ³]	
R-Beton C25/30, XC4, WO (45 Vol.-% RC-Gesteinskörnung)	0	683
R-Beton C25/30, XC2, WU (35 Vol.-% RC-Gesteinskörnung)	0	629
Konventioneller Beton C25/30, XC4, WO	2.310	1.627
Konventioneller Beton C25/30, XC2, WU	629	0
Gesamt	2.939	2.939

5.7 Ergebnisse der Fußabdruckanalyse

5.7.1 Entsorgungsphase (C1-C3)

Der Produkt-Materialfußabdruck der Entsorgungsphase nach den Lebenszyklusmodulen C1-C3, gemessen in RMI und TRM pro Tonne Betonbruch, für die konventionelle Aufbereitung (BAU) und Recyclingbeton (RC) in einer mobilen und einer stationären Anlage ist in Abbildung 11 dargestellt.

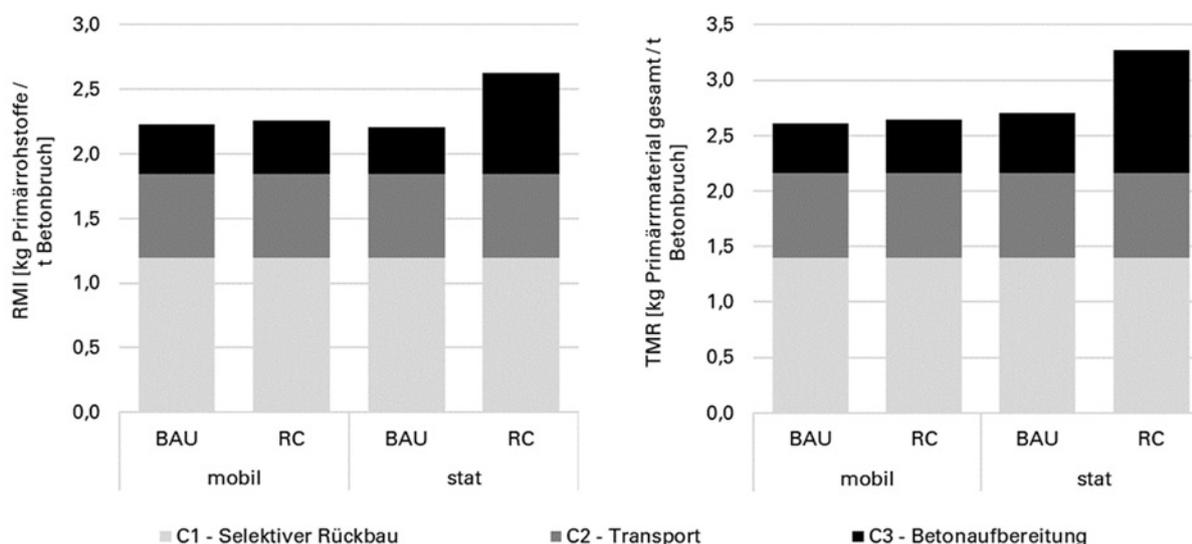


Abbildung 11. Produkt-Materialfußabdruck gemessen in Raw Material Input (RMI) und Total Material Requirement (TMR) pro Tonne Betonbruch für die Entsorgungsphase (C1-C3). Konventionelle Aufbereitung (BAU) und R-Beton (RC) in einer mobilen und stationären Anlage

Die Wasser-, Energie- und Klima-Fußabdrücke der Entsorgungsphase pro Tonne Betonbruch nach den Lebenszyklusmodulen C1-C3 für die konventionelle Aufbereitung (BAU) und die Aufbereitung für die Herstellung von R-Beton (RC) in einer mobilen und einer stationären Anlage sind in Abbildung 12 dargestellt.

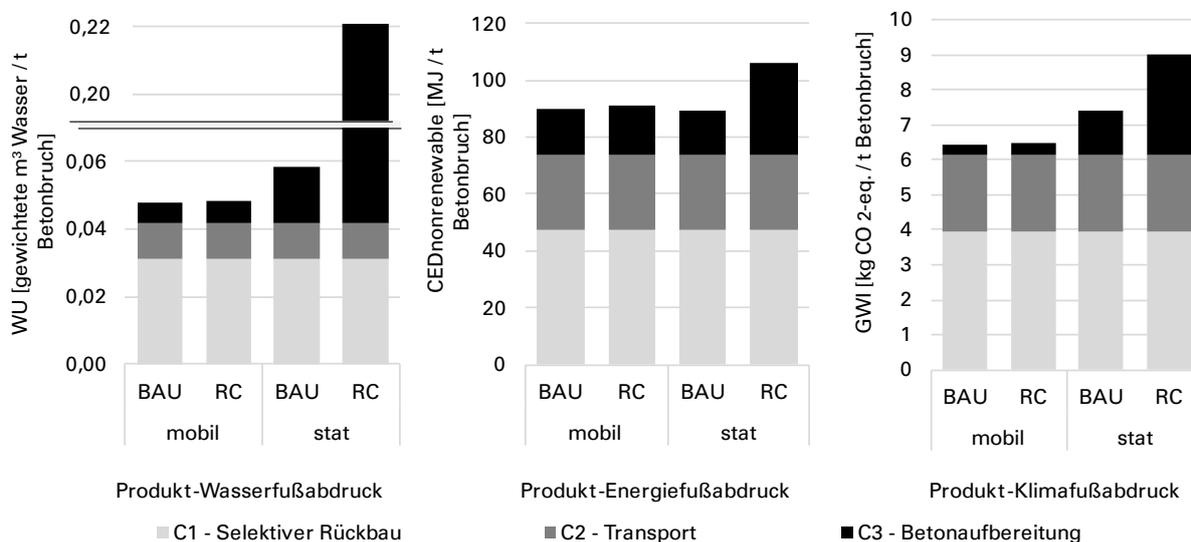


Abbildung 12. Produkt-Wasserfußabdruck gemessen in Water Use (WU), Produkt-Energiefußabdruck gemessen in Cumulated Energy Demand (CED) für fossile Energieträger und Produkt-Klimafußabdruck gemessen in Global Warming Impact (GWI) pro Tonne Betonbruch für die Entsorgungsphase (C1-C3). Konventionelle Aufbereitung (BAU) und Aufbereitung für die Herstellung von R-Beton (RC) in einer mobilen und stationären Anlage

Der Wasserfußabdruck des RCstat-Szenarios beträgt durch die zusätzliche Nassaufbereitung etwa das 4-fache des Wasserfußabdrucks der übrigen Szenarien. Im Material-, Energie- und Klimafußabdruck zeigt das RCstat-Szenario gegenüber dem BAUstat-Szenario um etwa 20 % höhere Werte. Die Material- und Energiefußabdrücke der konventionellen Aufbereitung des Betons in der mobilen Anlage (BAUmobil) liegen etwa in der gleichen Größenordnung wie die Werte der RCmobil- und BAUstat-Szenarien. Dahingegen sind der Wasser- und der Klimafußabdruck des BAUstat-Szenarios gegenüber den Werten des BAUmobil- und RCmobil-Szenarios um 22 % bzw. 30 % erhöht. Die konventionelle Aufbereitung in der stationären Anlage ist mit einem höheren Energieverbrauch verbunden als die Aufbereitung in einer mobilen Anlage. Gleichzeitig wird die stationäre Anlage mit Strom versorgt, während die mobile Anlage vollständig dieselbetrieben ist. Der Stromverbrauch aus dem deutschen Strommix ist mit einem höheren Ressourcenaufwand und einer höheren Klimawirkung je MJ Energie verbunden als der Einsatz von Diesel (siehe Anhang G).

5.7.2 Herstellung von RC-Gesteinskörnung

Die Produkt-Materialfußabdrücke gemessen in RMI und TMR für die Herstellung einer Tonne RC-Gesteinskörnung in einer mobilen und einer stationären Anlage sind in Abbildung 13 dargestellt.

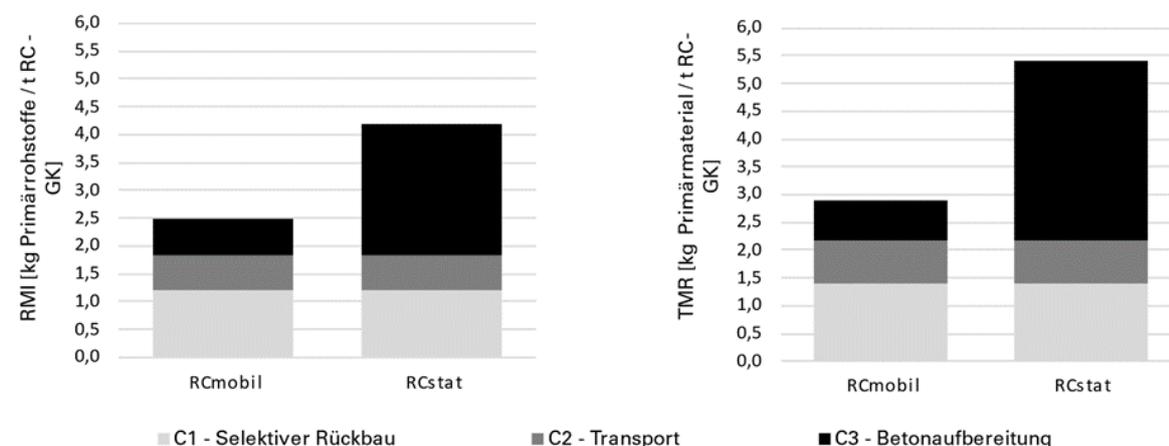


Abbildung 13. Produkt-Materialfußabdruck gemessen in Raw Material Input (RMI) und Total Material Requirement (TMR) pro Tonne RC-Gesteinskörnung zum Einsatz in R-Beton aufbereitet in einer mobilen Anlage (RCmobil) und einer stationären Anlage (RCstat)

Die Produkt-Wasser-, -Energie- und -Klima-Fußabdrücke für die Herstellung einer Tonne RC-Gesteinskörnung in einer mobilen und einer stationären Anlage sind in Abbildung 14 dargestellt.

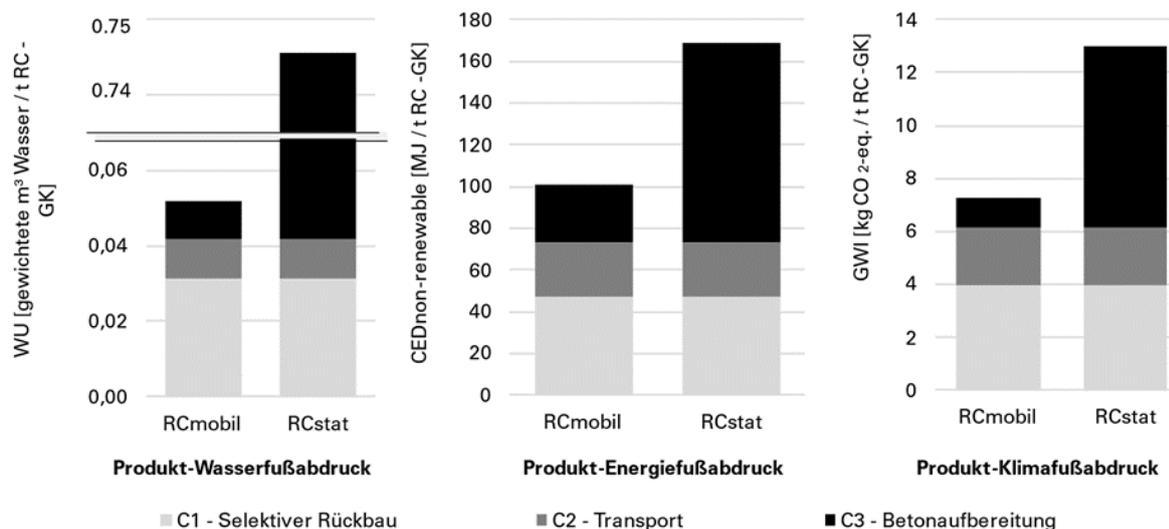


Abbildung 14. Produkt-Wasserfußabdruck gemessen in Water Use (WU), -Energiefußabdruck gemessen in Cumulated Energy Demand (CED) für fossile Energieträger und -Klimafußabdruck gemessen in Global Warming Impact (GWI) pro Tonne RC-Gesteinskörnung zum Einsatz in R-Beton aufbereitet in einer mobilen Anlage (RCmobil) und einer stationären Anlage (RCstat)

Die Ergebnisse zeigen, dass die Herstellung je Tonne RC-Gesteinskörnung in einer mobilen Anlage mit einer geringeren Ressourcennutzung und einer geringeren Klimawirkung verbunden ist als die Herstellung je Tonne RC-Gesteinskörnung in einer stationären Anlage. Die Mehrbelastungen sind im Wesentlichen auf die zusätzliche Nassaufbereitungsstufe und die Verwendung von Strom als Energieträger zurückzuführen.

5.7.3 Betonherstellung

Die Abbildung 15 und Abbildung 16 zeigen die Produkt-Ressourcen- und -Klimafußabdrücke für die Herstellung von Beton mit der Festigkeitsklasse C25/30 und den Expositions- bzw. Feuchtigkeitsklassen XC4, WO und XC2, WU pro m³ Beton für das BAU- und RC-Szenario. Da sich beim Produkt-Materialfußabdruck die Ergebnisse für den TMR und der RMI um weniger als 1 % unterscheiden, sind lediglich die Ergebnisse für den RMI dargestellt.

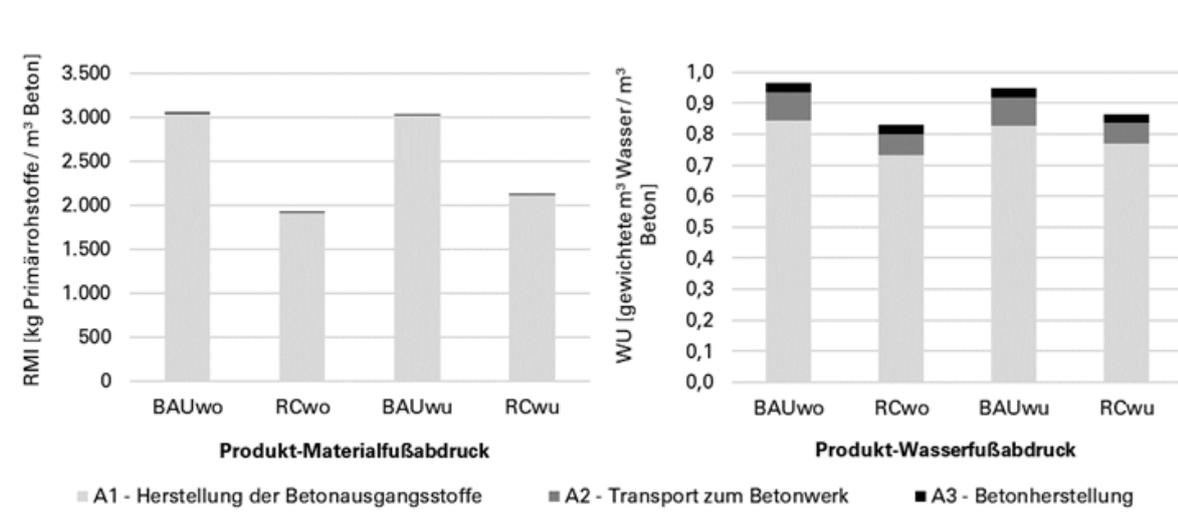


Abbildung 15. Produkt-Materialfußabdruck gemessen in Raw Material Input (RMI) und Produkt-Wasserfußabdruck gemessen in Water Use pro m³ Beton der Festigkeitsklasse C25/30 und den Expositions- bzw. Feuchtigkeitsklassen XC4, WO und XC2, WU für die Herstellungsphase (A1-A3) im BAU-Szenario und im RC-Szenario (mobile Aufbereitung)

Die Ergebnisse zeigen, dass durch den Einsatz rezyklierter Gesteinskörnung die Materialfußabdrücke des RBetons um 37 % (RCwo) und 31 % (RCwu) im Vergleich zum konventionellen Beton geringer ausfallen. Die Wasserfußabdrücke der sind um 14 % (RCwo) bzw. 9 % geringer (RCwu) als die der jeweiligen BAU-Varianten.

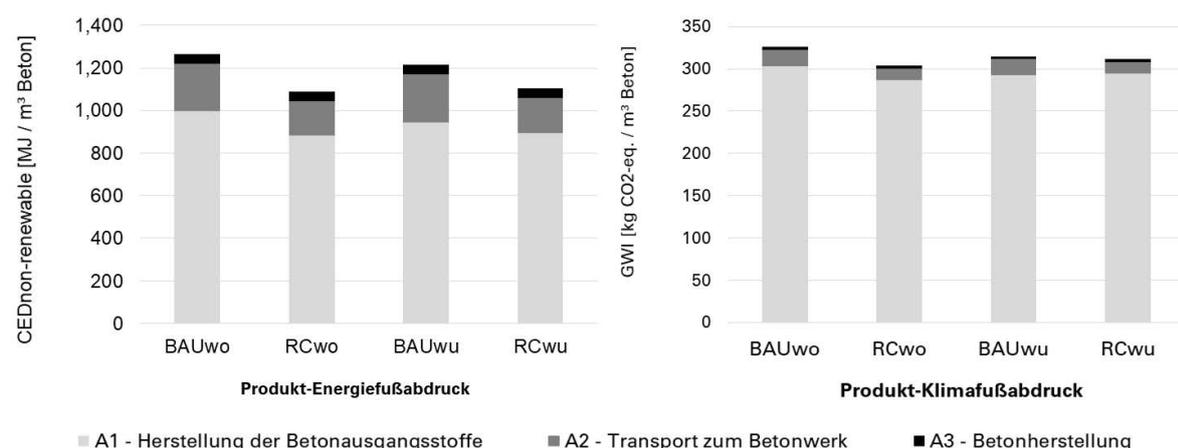


Abbildung 16. Produkt-Energiefußabdruck gemessen in Cumulated Energy Demand (CED) für fossile Energieträger und Produkt-Klimafußabdruck gemessen in Global Warming Impact (GWI) pro m³ Beton der Festigkeitsklasse C25/30 und den Expositions- bzw. Feuchtigkeitsklassen XC4, WO und XC2, WU für die Herstellungsphase (A1-A3) im BAU-Szenario und im RC-Szenario (mobile Aufbereitung)

Die Energiefußabdrücke der RCwo- und RCwu-Varianten sind um 14 % bzw. 9 % niedriger als der Energiefußabdruck der korrespondierenden BAU-Varianten. Die Einsparungen ergeben sich aufgrund der geringeren Energieaufwendungen für die Herstellung und den Transport der rezyklierten Gesteinskörnung im Vergleich zur natürlichen Gesteinskörnung (Splitt).

Der Klimafußabdruck wird im Wesentlichen durch die die Zementherstellung bestimmt, sodass die Herstellung der Gesteinskörnung und ihre Transportaufwendungen weniger ins Gewicht fallen als beim Energiefußabdruck. Ergebnisse anderer Analysen, beispielsweise von Kleijer et al. (2017), zeigen ebenfalls, dass die THG-Emissionen der Zementproduktion überproportional zum Energiebedarf der Zementproduktion sind, da während des Brennens des Zementklinkers hohe Mengen an CO₂ durch die Entsäuerung des Kalksteins emittiert werden (Barcelo et al., 2014; Worrell et al., 2001). Obwohl für die Herstellung des wasserundurchlässigen R-Betons etwas mehr Zement eingesetzt wurde, konnte auch sein Klimafußabdruck im Vergleich zum konventionellen Beton um 1 % gesenkt werden (7 % für XC4, WO).

Die Ressourcen- und Klimafußabdrücke der Beton-Gebäudekonstruktion bezogen auf 1 m² Bruttogeschossfläche sind in Abbildung 17 dargestellt.

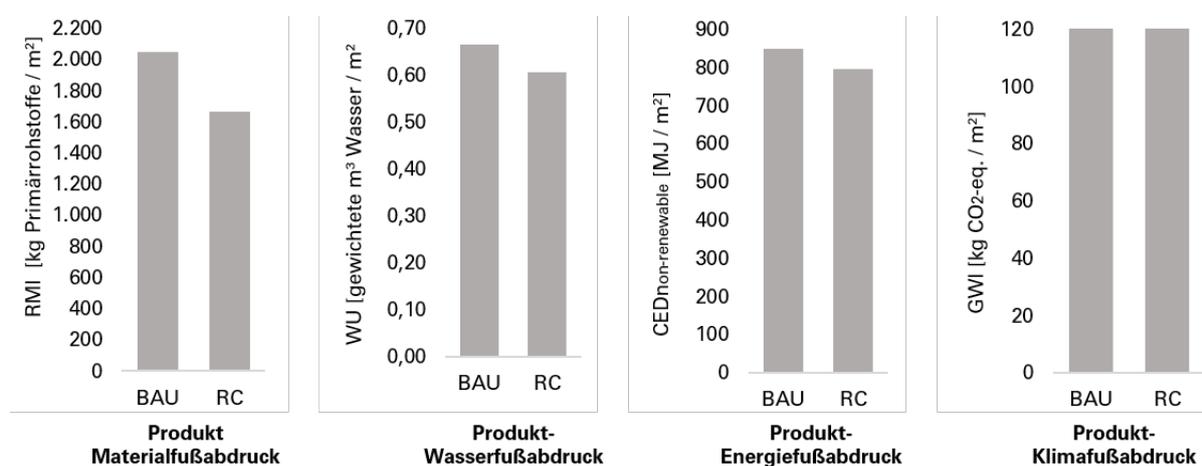


Abbildung 17. Produkt-Ressourcen- und -Klimafußabdrücke für die Herstellung der Beton-Gebäudekonstruktion pro m² Bruttogeschossfläche vollständig aus konventionellem Beton (BAU) und anteilig aus R-Beton (RC)

Auf Ebene der Beton-Gebäudekonstruktion betragen die Einsparungen beim Materialfußabdruck durch den anteiligen Einsatz von R-Beton (ca. 45 %) etwa 15 %. Da der Materialfußabdruck der BAU-Varianten durch den Einsatz natürlicher Gesteinskörnung dominiert wird, geht die Reduktion des Materialfußabdrucks fast vollständig auf die Substitution natürlicher Gesteinskörnung zurück. Der Materialfußabdruck, gemessen als TMR, zeigt keine signifikanten Unterschiede zum RMI, da die ungenutzten Extraktionen im Zusammenhang mit der Gewinnung der Betonausgangsstoffe gering sind. Im Vergleich zur BAU-Variante ist in der RC-Variante der Wasserfußabdruck um 5 %, der Energiefußabdruck um 3 % und der Klimafußabdruck um 2 % reduziert. Ein ressourceneffizientes Design kann durch den Einsatz von Building Information Modelling (BIM) Anwendungen und entsprechenden Berechnungstools bereits in der Planungsphase auf Grundlage der entsprechenden Indikatoren unterstützt werden (Sameer et al., 2020).

5.8 Erweiterte Szenarioanalyse

Eine erweiterte Szenario-Analyse wurde durchgeführt, um zu untersuchen, wie sich Veränderungen von Annahmen auf die Ergebnisse auf Gebäudeebene auswirken. Die Ergebnisse sollten zeigen, unter welchen Bedingungen der Einsatz von R-Beton zur klimaschonenden Nettoeinsparung von stofflichen Ressourcen im Hochbau beitragen kann und welche Optimierungspotentiale möglich sind. Es wurde auch untersucht, wie sich die Variation der Transportdistanz auf die Ergebnisse auswirken. Dabei wurde berücksichtigt, dass mobile Anlagen auch auf der Baustelle („on-site“) betrieben werden können, wenn die Baustelle beispielsweise in geeignetem Gebiet gelegen und immissionsschutzrechtlich genehmigungsfähig ist und somit keine Belästigungen durch Staub- und Lärmemissionen zu erwarten sind. Wie in Abschnitt 5.7.2 dargestellt, unterscheiden sich die RC-Gesteinskörnung aus mobilen und stationären Anlagen hinsichtlich der Ressourcen- und Klimafußabdrücke. Zusätzlich wirken sich die unterschiedlichen Korngrößenverteilungen auf die Rezeptur des R-Betons aus. Durch die breitere Verteilung der Korngrößen der RC-Gesteinskörnung könnte ein höherer RC-Anteil im Beton eingesetzt werden. Für die erweiterte Szenario-Analyse wurde angenommen, dass durch den Einsatz von RC-Gesteinskörnung aus einer stationären Anlage (Korngröße 2/16 mm) die maximalen Anteile von 45 Vol.-% im Betontyp 1 (C25/30, XC4, WO) und 35 Vol.-% für den Betontyp 2 (C25/30, XC2, WU) eingesetzt werden können. Zusätzlich wurde analysiert, welches Optimierungspotential der Einsatz alternativer Bindemittel im R-Beton haben könnte.

Für die Herstellung des Betons wird in der Fallstudie ein Portlandkompositzement (CEM II) verwendet, bei dem 6 bis 20 % des Portlandzementklinkers durch Kalkstein ersetzt wird (VDZ, 2002). Die Produktion von Portlandzementklinker ist der Hauptfaktor für die Klimawirkung von Zement. Der teilweise Ersatz von Portlandzementklinker durch industrielle Nebenprodukte wie Flugasche und Hüttensand gilt als vorteilhaft und ist inzwischen gängige Praxis (Van Den Heede und De Belie, 2012). Es wurde angenommen, dass Hüttensandzement (CEM III) verwendet wird, in dem zwischen 36 % und 80 % des Portlandzementklinkers durch Hüttensand ersetzt wird. Abschließend wurde untersucht, wie sich die Art der Gesteinskörnung auf die Ergebnisse auswirkt. Es wurde angenommen, dass der im Projekt eingesetzte Kalksteinsplitt durch Kies ersetzt wird. Die Annahmen für die erweiterte Szenarien-Analyse sind in Tabelle 17 zusammengefasst.

Tabelle 17. Parameter für die erweiterte Szenarien-Analyse

	Szenarien						
Parameter	BAU	RC	RC onsite	RC stat	RC cemIII	BAU kies	RC +kies
Natürliche Gesteinskörnung	Kalksteinsplitt					Rundkies	
Anlagentyp zur Herstellung der RC-Gesteinskörnung	-	mobil	mobil	stationär	mobil	-	mobil

Distanz zur Aufbereitungsanlage	-	41 km	0 km	41 km	41 km	-	41 km
Zementtyp	CEM II				CEM III	CEM II	

Die Ergebnisse für die Produkt-Fußabdrucke sind in Abbildung 18 gegenübergestellt. Die Fußabdruckergebnisse des BAU-Szenarios dienen hierbei als Referenzwerte (100%).

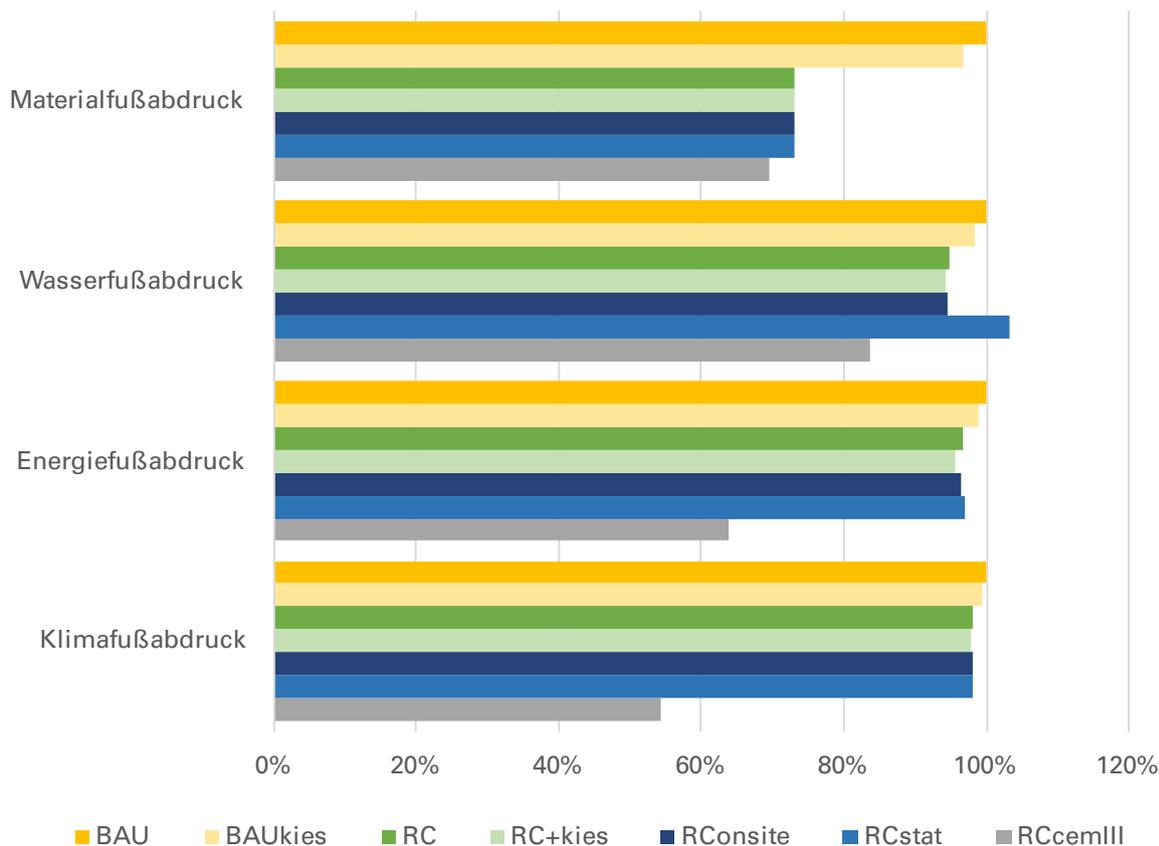


Abbildung 18. Fußabdruckergebnisse der BAUkies-, RC-, RC+kies-, RConsite-, RCstat- und RCcemIII-Szenarien im Vergleich zum BAU-Szenario

Die Materialfußabdrücke der verschiedenen RC-Szenarien sind um rund 15 % geringer als die des BAU-Szenarios. Die Wasserfußabdrücke der RC-, RC+kies- und der RConsite-Szenarien sind um 5 bis 6 % geringer als die des BAU-Szenarios, während sich der Wasserfußabdruck durch den Einsatz von CEM III sogar um 16 % reduzieren lässt. Lediglich bei einer Nassaufbereitung zur Herstellung von RC-Gesteinskörnung (RCstat) ist der Wasserfußabdruck im Vergleich zum BAU-Szenario um 3 % erhöht. Die Energiefußabdrücke sind gegenüber dem BAU-Szenario um 3 % (RC- und RCstat-Szenario) bzw. 4 % (RC+kies- und RConsite- Szenario) geringer. Auch hier lassen sich durch den Einsatz von CEM III mit 36 % die größten Einsparungen realisieren. Die Klimafußabdrücke sind in allen RC-Szenarien, außer dem RCcemIII Szenario, um 2 % geringer als im BAU-Szenario. Im RCcemIII-Szenario ist der Klimafußabdruck gegenüber dem BAU-Szenario um 46 % reduziert.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich durch ein On-Site Recycling keine nennenswerten Einsparungen gegenüber dem Recycling in einer 40 km entfernten Recyclinganlage hätten erzielen lassen. Auch die Verwendung von Kies anstelle von Kalksteinsplitt wirkt sich nur geringfügig auf die Ergebnisse aus. Der Vergleich der Betonaufbereitung in einer mobilen Anlage (RCmobile) und in einer stationären Anlage (RCstat) zeigt, dass beide Anlagentypen geeignet sind, um Einsparungen in den Fußabdruckergebnissen zu erzielen, wenn auf eine Nassaufbereitung des RC-Materials verzichtet wird. Die Ergebnisse der erweiterten Szenario-Analyse zeigen, dass das größte Einsparungspotential insbesondere hinsichtlich der Klimawirkung durch den Einsatz alternativer Zement-Technologien besteht. Dabei ist zu berücksichtigen, dass von einer theoretischen Betonmischung ausgegangen wurde, in der CEM II in der gleichen Menge mit CEM III ersetzt wurde. In jedem Fall ist der tatsächliche ökologische Nutzen von R-Beton immer projekt- und produktspezifisch zu bewerten (Kleijer et al., 2017; Bischof et al., 2010). Die Ergebnisse wurden in englischer Sprache in einem Aufsatz der Fachzeitschrift „Resources, Conservation and Recycling“ veröffentlicht. (Mostert et al., 2021).

6 Fazit

Mit den Zielen für eine Nachhaltige Entwicklung (engl. Sustainable Development Goals, SDGs) ist auch die Notwendigkeit nach einer effizienteren Nutzung natürlicher Ressourcen und der Reduzierung der Umweltbelastungen deutlich geworden. Die Unterzeichnerstaaten haben sich damit auch zu einer nachhaltigen Entwicklung von Städten verpflichtet, die insbesondere von den vorhandenen und zukünftig gebauten Infrastrukturen und Gebäuden abhängt. Auch in der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie und im deutschen Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess) kommt der Förderung der Ressourcenschonung im Bauwesen, insbesondere durch die Stärkung der Kreislaufführung der Baumaterialien, eine besondere Rolle zu, da diesem Sektor der höchste Rohstoffeinsatz, der größte Energiebedarf und das größte Abfallaufkommen zuzuordnen sind. Die Ressourceneffizienz und der Bestandserhalt können im Hochbau durch eine Wiedernutzung von bereits bebauten Flächen, durch gezielte Rückbaumaßnahmen von Bestandsgebäuden und die Verwendung der Rückbaumaterialien als RC-Baustoffe im Sinne eines Urban Minings erhöht werden. Damit werden nicht nur knappe und teure Deponieräume eingespart, sondern auch Abgrabungen im Naturraum vermieden und die zeitliche Verfügbarkeit von Primärrohstoffen verlängert. Dies ist von besonderer Bedeutung für die Bauindustrie, da sie überwiegend mineralische Rohstoffe einsetzt, die zu den nicht erneuerbaren bzw. erschöpflichen Ressourcen zählen. Für die Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung und den Aufbau einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft im Baubereich muss die Ressourceneffizienz entlang der gesamten Wertschöpfungskette betrachtet werden. Während der Nutzungsphase von Gebäuden, vor allem wegen der Energieverbräuche und den damit verbundenen THG-Emissionen, bereits große Aufmerksamkeit geschenkt wird, werden die übrigen Lebenszyklusphasen bisher noch wenig beachtet. Um eine funktionierende Kreislaufwirtschaft zu etablieren, kommt der Nutzung von Material aus dem Rückbau für den Neubau von Gebäuden und damit der Verwertungs- und der darauf basierten Herstellungsphase eine immer größere Bedeutung zu. Aus dem hier untersuchten Urban Mining-Projekt lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

Der erste Schritt des Urban Minings im Baubereich besteht in der Aufgabe, die in einem Gebäude verbauten Wertstoffe zu erkennen und zu bewerten, um sie als Sekundärrohstoffe nutzen zu können, bevor sie zu Abfall werden. Für den selektiven Rückbau, also den aktiven Teil des Urban Minings, ist im Vergleich zum herkömmlichen Abbruch eine umfangreichere Planung und detaillierte Analyse erforderlich. In jedem Fall muss vorab die Art, der Umfang und die Verteilung des Materialbestandes eines Gebäudes ermittelt werden. Diese Daten sind auch für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit der Baumaßnahme eine wichtige Grundlage. Die Ausschreibung des selektiven Rückbaus sollte dabei explizit auf die geplante Wiederverwertung der Materialien ausgerichtet werden und Vorgaben hinsichtlich Qualität, Umweltverträglichkeit und Separierung der Abfallfraktionen machen.

Trotz bestehender Regularien werden die für den Hochbau interessanten Abfallfraktionen in der Rückbaupraxis lediglich in die Materialgruppen Baustellenabfälle (mit Holz, Glas, Metall, Kunststoff und Dämmmaterial), Straßenaufbruch, Bauabfälle auf Gipsbasis und Bauschutt (mit Beton, Ziegel, Keramik, Fliesen, Mauerwerk) unterteilt. Da eine nachträgliche Separation während der Aufbereitung in der Regel aufwendig oder unmöglich ist, muss bereits auf der Baustelle eine sorgfältige Vorsortierung vorgenommen werden. Um das Wertstoffpotenzial der Abbruchmaterialien möglichst weit ausschöpfen und die Recyclingquote erhöhen zu können, ist eine möglichst sortenreine Gewinnung der Abfallfraktionen von besonderer Bedeutung.

Während Holz, Glas, Metall und Kunststoffe bereits vielseitig verwertet werden, kommen die aus Betonbruch hergestellten RC-Gesteinskörnungen bisher fast ausschließlich für ungebundene Anwendungen im Straßenbau und in der Tragschicht für Gebäudefundamente zum Einsatz. Ihre Verwendung als RC-Gesteinskörnung bei der Betonherstellung für den Hochbau ist bisher noch die Ausnahme. Ein wesentliches Thema für die Bauindustrie – sowohl im Hochbau als auch im Tiefbau – ist dabei die Sicherstellung, dass die RC-Gesteinskörnung frei von Schadstoffen ist und mit ihrem Einsatz somit keine umweltschädlichen Auswirkungen, insbesondere auf Boden und Grundwasser, verbunden sind. In der R-Betonherstellung ist darüber hinaus entscheidend, dass die RC-Gesteinskörnung frei von Störstoffen ist, da beispielsweise Holz- und Kunststoffreste bei der Betonierung aufschwimmen. Eine entsprechende Beprobung der Rückbaumaterialien und der RC-Ausgangsstoffe ist daher in jedem Fall erforderlich.

Die Menge an R-Beton aus Urban Mining Projekten hängt im Wesentlichen von der herstellbaren Menge an RC-Gesteinskörnung ab, die für die Betonproduktion nach DIN EN 12620 und DIN 4226-101 geeignet ist. Im Pilotprojekt hätte ein größerer Teil der Betonabfälle für die Herstellung einer entsprechenden RC-Gesteinskörnung genutzt werden können, wenn in vertretbarer Entfernung eine stationäre Aufbereitungsanlage zur Verfügung gestanden hätte. Nach der ursprünglichen Planung sollten 5.000 Tonnen bzw. 50 % der Betonabfälle zu RC-Gesteinskörnung der Korngröße 4/22 mm verarbeitet werden. Allerdings waren die Betonabfälle trotz selektiven Rückbaus mit Leichtfraktionen verunreinigt, so dass mit dem eingesetzten Trockenverfahren (Windsichter) nur RC-Gesteinskörnung der Korngröße 8/22 mm hergestellt werden konnte. Der Feinanteil (Korngröße kleiner 8 mm) konnte mit den lokal zur Verfügung stehenden Technologien nicht weiter separiert werden. Etwa 15 % des Überkorns (Korngröße größer 22 mm) wurde erneut zerkleinert und zu RC-Gesteinskörnung aufbereitet. Der verbleibende Teil des Überkorns wurde zusammen mit dem Feinanteil und gemischten mineralischen Abfällen als ungebundene Frostschutzschicht und Tragschicht für den Neubau verwendet. Durch den Rückbau der sehr tiefen Altfundamente (bis zu 2 m) wurden große Mengen für die Auffüllung benötigt.

Beim Einsatz von R-Beton ist zu beachten, dass seine Qualitätseigenschaften dem von konventionellem Beton aus Primärrohstoffen entsprechen. Die Betonrezeptur muss stets an die individuellen Projekt- bzw. Bauteilanforderungen (Statik, Exposition, Umgebung, mechanische und physikalische Eigenschaften) angepasst werden. Ein erhöhter Zementanteil ist beim Einsatz von RC-Gesteinskörnung zu vermeiden.

Mit der vergleichenden Fußabdruckanalyse wurde erstmalig ein softwaregestütztes, ökobilanzielles Bewertungskonzept entwickelt und erfolgreich getestet, mit dem die ökologische Vorteilhaftigkeit der Verwendung von RC-Materialien in Urban Mining-Projekten abgeschätzt werden kann. Die ausgewählten Indikatoren haben sich als richtungssicherer Bewertungsmaßstab für die Bestimmung der Ressourceneffizienz im Hochbau erwiesen.

Die Ergebnisse der Fußabdruckanalyse zeigen, dass sich in dem vorliegenden Projekt mit einem Einsatz von 45 Vol.-% RC-Gesteinskörnung der Materialfußabdruck von R-Beton um mehr als 30 % im Vergleich zu konventionellem Beton senken lässt. Der Klimafußabdruck des R-Betons ist auf Produktebene um 1 bis 7 % geringer als der des konventionellen Betons. Indem knapp die Hälfte des Betons im Rohbau mit R-Beton ausgeführt wurde, belaufen sich die Einsparungen im Materialfußabdruck auf 15 % und im Klimafußabdruck auf 2 %. Der Wasserfußabdruck hängt insbesondere von den gewählten Aufbereitungsverfahren (trocken bzw. nass) ab. Der Energiefußabdruck wird nach der Zementherstellung (ca. 60 %) durch die Transportaufwendungen zwischen dem Produktionsort der Betonausgangsstoffe und dem Betonwerk (ca. 25 %) und dem Einsatz von Zusatzmitteln (ca. 14 %) bestimmt.

Im vorliegenden Projekt hätte sich der Energie- und Klimafußabdruck noch weiter reduzieren lassen, entweder auf Produktebene durch einen Verzicht auf die Erhöhung des Zementanteils im WU-Beton oder aber auf Gebäudeebene, wenn die RC-Gesteinskörnung nicht zur Hälfte im WU-Beton für die Sohlen, sondern komplett im Beton für den trockenen Bereich eingesetzt worden wäre. Im letzteren Fall hätte sich jedoch die Lagerzeit und das Risiko der Mengenkalkulation erhöht.

Die Ergebnisse der erweiterten Szenario-Analyse haben gezeigt, dass sich der Klimafußabdruck vor allem durch den Einsatz alternativer Zuschlagsstoffe wie Hüttensand reduzieren lässt, wobei zu berücksichtigen ist, dass seine Verfügbarkeit mittel- bis langfristig abnehmen wird. Klimaschonende Ressourceneinsparungen lassen sich zukünftig auch durch den Einsatz von stationären Recyclinganlagen erzielen, die mit Strom aus erneuerbaren Energien betrieben werden.

Die Entscheidung für den Rückbau im Pilotprojekt wurde auf Grundlage umfangreicher Untersuchungen hinsichtlich einer möglichen Sanierung oder Umnutzung getroffen. Bestandsgebäude mit einem hohen Stahlbetonanteil könnten bevorzugt erhalten werden, um die Energieaufwendungen und Klimawirkungen des Rückbaus und der Zementherstellung zu vermeiden. Bereits bei der Planung neuer Gebäude sollte der Anteil von Stahlbeton auf ein möglichst geringes Maß reduziert werden. Im Rahmen von weiteren Forschungsarbeiten könnten Betonbauteile so weiterentwickelt werden, dass sie als Bauelemente komplett wiederverwendet werden können, um nicht CO₂-intensiv mit neuem Zement produziert werden zu müssen.

Weitere Erfahrungen und Schlussfolgerungen aus der wissenschaftlichen Begleitung des Bauvorhabens werden in einem Leitfaden dokumentiert, der sowohl Bauherren der öffentlichen Hand als auch Privatpersonen, Planungsbüros, Architekten und Unternehmen bei der Planung, Bewertung und Umsetzung von zukünftigen Urban Mining Projekten unterstützen kann.

7 Verzeichnisse

7.1 Literatur

- ARGE agn-heimspiel architekten. (2019). Modellprojekt ressourcenschonendes Bauen Rathaus Korbach.
- Barcelo, Kline, Walenta, und Gartner. (2014). Cement and carbon emissions. *Materials and Structures*, 47(6), 1055–1065. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0114-5>.
- BAuA. (2020). Leitlinie für die Asbesterkundung zur Vorbereitung von Arbeiten in und an älteren Gebäuden Inhaltsverzeichnis (S. 1–29). Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Umweltbundesamt (UBA).
- Bischof, Sugg, Meister, Grüninger, Kytzia, Lier, Stüssi, und Seyler. (2010). Ökobilanzen rezyklierter Gesteinskörnung für Beton - ein Forschungsbericht der Holcim (Schweiz) AG (Holcim (Schweiz) AG (Hrsg.)).
- BMUB. (2016). Leitfaden Nachhaltiges Bauen: Zukunftsfähiges Planen, Bauen und Betreiben von Gebäuden. http://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/Leitfaden_2015/LFNB_D_final-barrierefrei.pdf.
- Boulay, Bare, Benini, Berger, Lathuillière, Manzardo, Margni, Motoshita, Núñez, Pastor, Ridoutt, Oki, Worbe, und Pfister. (2017). The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). In *International Journal of Life Cycle Assessment* (S. 1–11). <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1333-8>.
- CAT. (2020). Produktspezifikationen für 340 F UHD.
- Cronjaeger, Decker, Euich, Grünewald, Herold, Seidel, und Verheyen. (2015). Merkblatt „Entsorgung von Bauabfällen“. Regierungspräsidium Darmstadt, Regierungspräsidium Gießen, Regierungspräsidium Kassel.
- DAfStb. (2007). Richtlinie „Vorbeugende Massnahmen gegen schädigende Alkali-reaktion im Beton“ (Alkali-Richtlinie).
- DAfStb. (2010). DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620.
- Daum. (2020). Rathaus: Kosten steigen geringfügig | Korbach. *Waldeckische Landezeitung*.
- Destatis. (2019). Umwelt Abfallentsorgung - Fachserie 19 (Bd. 49, Nummer 0). https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/abfallentsorgung-2190100177004.pdf;jsessionid=03F28BB9C6318A4EB6B8D83239A8F4FF.internet8711?__blob=publicationFile.
- DESTATIS. (2018). Umwelt - Abfallbilanz. In *Statistisches Bundesamt DESTATIS* (Bd. 49, Nummer 0).
- DIN 1045-2. (2008). Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1.

- DIN 4226-101. (2017). Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen.
- DIN 4226-102. (2017). Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 102: Typprüfung und Werkseigene Produktionskontrolle (Nummer August).
- DIN EN 12390. (2019). Prüfung von Festbeton – Teil 1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen; Deutsche und Englische Fassung prEN 12390-1:2019.
- DIN EN 12620. (2008). Gesteinskörnungen für Beton; Deutsche Fassung EN 12620:2002+A1:2008. Dezember.
- DIN EN 12620. (2015). Gesteinskörnungen für Beton; Deutsche und Englische Fassung prEN 12620:2015.
- DIN EN 15804. (2014). Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A1:2013 (S. 1–68).
- DIN EN 1992-1-1. (2011). Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010.
- DIN EN 206. (2017). Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013+A1:2016.
- DIN EN ISO 14040. (2009). Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006); Deutsche. September, 1–19.
- Edquist. (2017). Organisationsmodelle im öffentlichen und privaten Hochbau Inhaltsübersicht.
- EU. (2008). Richtlinie 2008-98-EG über Abfälle und zur Aufhebung bestimmte Richtlinien (S. 3–30). Europäische Union.
- Flamme, und Krämer. (2010). Von der Abfallentsorgung zum „Urban Mining“.
- Flore. (2019). Interview Protokoll: Herstellung von RC-Gesteinskörnung.
- Gayarre, Pérez, Pérez, López, und Martínez. (2016). Life cycle assessment for concrete kerbs manufactured with recycled aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 113, 41–53.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.093>.
- GewAbfV. (2017). Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen. https://www.gesetze-im-internet.de/gewabfv_2017/BJNR089600017.html.
- Heyn, und Mettke. (2010). Ökologische Prozessbetrachtungen-RC-Beton (Stofffluss, Energieaufwand, Emissionen). zum Forschungsprojekt: Einsatz von Recycling-Material aus mineralischen Baustoffen Zuschlag in der Betonherstellung. Brandenburgische Technische Universität. <https://www.r-beton.de/wp-content/uploads/2015/08/RC-Beton-Stofffluss-Energieaufwand-101102.pdf>.
- Hofner. (2017). Masterarbeit - Erhebung des Verwertungspotenzials von Materialien im Gebäudebestand vor Rückbau und Abriss am Beispiel des Rathauses von Korbach - Korrigierte Fassung -.

- Huijbregts, Hellweg, Frischknecht, Hendriks, Hungerbühler, und Hendriks. (2010). Cumulative Energy Demand As Predictor for the Environmental Burden of Commodity Production. *Environmental Science & Technology*, 44(6), 2189–2196. <https://doi.org/10.1021/es902870s>
- IPCC. (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories CHAPTER 3 MOBILE COMBUSTION: Bd. 2: Energy.
- ISO 14046. (2014). Water footprint—principles, requirements and guidelines.
- Kaiser. (2019). Rückbau im Hochbau – Aktuelle Praxis und Potenziale der Ressourcenschonung. 26.
- Kaiser, und VDI Technologiezentrum GmbH. (2019). Rückbau im Hochbau – Aktuelle Praxis und Potenziale der Ressourcenschonung. VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 26 Rückbau, 26, 112. https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/VDI-ZRE_KA26_Rueckbau_im_Hochbau_Web_bf.pdf.
- Kleijer, Lasvaux, Citherlet, und Viviani. (2017). Product-specific Life Cycle Assessment of ready mix concrete: Comparison between a recycled and an ordinary concrete. In *Resources, Conservation and Recycling* (Bd. 122, S. 210–218). Elsevier B.V.. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.02.004>.
- Koch, und Schneider. (1997). Flächenrecycling durch kontrollierten Rückbau. In *Flächenrecycling durch kontrollierten Rückbau*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-59209-6>.
- Kreis- und Hansestadt Korbach. (2020). Korbach: Rathuserweiterung – Ressourcenschonende Altstadtentwicklung durch Urban Mining. <https://nachhaltige-stadtentwicklung-hessen.de/gute-beispiele/gemeinbedarf/korbach-rathaus-suh.html>
- Kurkowski. (2019). Leistungsbeschreibung mit Leistungsverzeichnis selektiver Rückbau / Neubau Rathaus Korbach. Auftraggeber: Kreis- und Hansestadt Korbach.
- Kurkowski. (2020a). Antworten auf einen Fragebogen zum Projekt „RückRat“ der Stadt Korbach (unveröffentlicht).
- Kurkowski. (2020b). Niederschriften der Baubesprechungen (unveröffentlicht).
- LAGA. (2003). Mitteilung Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 20 - Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen - Technische Regeln (S. 51). https://www.laga-online.de/documents/m20_tr_mineral-abfaelle_allgteil-i_2_1517834500.pdf.
- LfU. (2019). Rückbau schadstoffbelasteter Bausubstanz Arbeitshilfe Rückbau: Erkundung, Planung, Ausführung.
- Lieferscheine/Wiegescheine, Excel-Tabelle zur Massenermittlung, Bautagesberichte (Bonensteffen GmbH), Protokoll Interview Funke GmbH (Flore), Leistungsbeschreibung mit Leistungsverzeichnis selektiver Rückbau / Neubau, Niederschriften der Baubesprechung (K. (o. J.)).
- López-Gayarre, Serna, Domingo-Cabo, Serrano-López, und López-Colina. (2009). Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties. *Waste Management*, 29(12), 3022–3028. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.07.010>.

- Lutter, Giljum, Gözet, Wieland, und Manstein. (2018). Die Nutzung natürlicher Ressourcen: Bericht für Deutschland 2018 | Umweltbundesamt.
- Meetz, Mettke, Liesemeier, Schmidt, und Verbeyer. (2015). Brandenburger Leitfaden für den Rückbau von Gebäuden, Steigerung der Ressourceneffizienz des Recyclings von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen.
- Mettke, Jacob, und Meetz. (2017). Einsatz von mineralischen Recycling-Baustoffen im Hoch- und Tiefbau. https://www.bvse.de/images/news/Mineralik/2017/04-11_Broschüre_Einsatz_von_mineralischen_Recycling-Baustoffen_im_Hoch-_und_Tiefbau.pdf.
- Mostert, und Bringezu. (2019). Measuring Product Material Footprint as New Life Cycle Impact Assessment Method: Indicators and Abiotic Characterization Factors. *Resources*, 8(2), 61. <https://doi.org/10.3390/resources8020061>.
- Mostert, Sameer, Glanz, und Bringezu. (2020). Urban Mining for Sustainable Cities: Environmental Assessment of Recycled Concrete. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 588, 052021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/588/5/052021>.
- Mostert, Sameer, Glanz, und Bringezu. (2021). Climate and resource footprint assessment and visualization of recycled concrete for circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*. 174. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105767>.
- Müller. (2018). Baustoffrecycling Entstehung - Aufbereitung - Verwertung. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-22988-7>.
- Myhre, Shindell, Bréon, Collins, Fuglestad, Huang, Koch, Lamarque, Lee, Mendoza, Nakajima, Robock, Stephens, Takemura, und Zhang. (2013). Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In *Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.), Climate Change 2013 - The Physical Science Basis* (S. 659–740). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.018>.
- Pacheco-Torgal, Tam, Labrincha, Ding, und de Brito. (2013). *Handbook of recycled concrete and demolition waste*. Woodhead Publishing Limited.
- Pour, Di, Et, Recyclage, Beton, Des, und Onneries. (1994). Specifications for concrete with recycled aggregates. *Materials and Structures*, 27(9), 557–559. <https://doi.org/10.1007/BF02473217>.
- rental. (2020). Kettenbagger CAT 330FLN (28.9 t). <https://www.zeppelin-rental.de/miete/artikel/BAHY-CAT330F>.
- Rosen. (2018). Gutachten „Ressourcenschonendes Bauen“ am Beispiel Rathaus Korbach. (unveröffentlicht).
- Sameer, Mostert, und Bringezu. (2020). Product Resource and Climate Footprint Analysis during Architectural Design in BIM. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Bd. 588, Nummer 5, S. 052022). IOP Publishing. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/588/5/052022>.
- Scheibengraf und Reisinger. (2006). VERWERTUNG : BAURESTMASSEN Detailstudie zur Entwicklung einer Abfallvermeidungs- und -verwertungsstrategie

- Schiller, Deilmann, Gruhler, und Röhm. (2010). Ermittlung von Ressourcenschonungspotenzialen bei der Verwertung von Bauabfällen und Erarbeitung von Empfehlungen zu deren Nutzung. In Fachgebiet III 2.2 Ressourcenschonung, Stoffkreisläufe, Mineral- und Metallindustrie Felix Müller (Hrsg.), Nr. 56/2010. Umweltbundesamt. <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/dateien/4040.html>.
- Sobek. (2011). Weshalb wir ein Rohstoffproblem kriegen. 6–7.
- Sphera Solutions Inc. (2020a). Construction materials GaBi extension database XIV. <http://www.gabi-software.com/databases/gabi-databases/construction-materials/>.
- Sphera Solutions Inc. (2020b). GaBi Professional Database. <http://www.gabi-software.com/databases/gabi-databases/professional/>.
- Springenschmid. (2018). Betontechnologien für die Praxis. Beuth Verlag GmbH.
- Stürmer, und Kulle. (2017). Untersuchung von Mauerwerksabbruch (verputztes Mauerwerk aus realen Abbruchgebäuden) und Ableitung von Kriterien für die Anwendung in Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung (RC-Beton mit Typ 2 Körnung) für den ressourcenschonenden Hochbau.
- UBA. (2016). Das anthropogene Lager. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/urban-mining/das-anthropogene-lager>.
- UBA. (2017). Urban Mining - Ressourcenschonung im Anthropozän. 72.
- Van Den Heede, und De Belie. (2012). Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and „green“ concretes: Literature review and theoretical calculations. *Cement and Concrete Composites*, 34(4), 431–442. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.01.004>.
- VDI ZRE. (2014). Potenziale eines hochwertigen Recyclings im Baubereich. In VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 8 (Nummern 3. A7uflage, 2016). http://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/2014-Kurzanalyse-08-Recycling-im-Baubereich.pdf.
- VDZ. (2002). Zement Taschenbuch 2002.
- Vogdt, Schenk, und Koc. (2019). F3108 Urban Mining Leitfaden zur Vermeidung nicht recyclingfähiger Bauabfälle bei künftigen kommunalen Bauvorhaben. Fraunhofer IRB Verlag. ISBN 978-3-7388-0398-3.
- Weimann, Matyschik, Adam, Schulz, Linss, und Müller. (2013). Optimierung des Rückbaus / Abbruchs von Gebäuden zur Rückgewinnung und Aufbereitung von Baustoffen. In Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.), TEXTE 05/2013. <http://www.uba.de/uba-info-medien/4430.html>.
- Worrell, Price, Martin, Hendriks, und Meida. (2001). CARBON DIOXIDE EMISSIONS FROM THE GLOBAL CEMENT INDUSTRY. *Carbon*, 26, 303–329. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.26.1.303>.

7.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Historisches Rathaus und der 70er-Jahre Anbau links und das Design-Konzept für den Neubau rechts (ARGE agn-heimspielarchitekten, 2017). Quelle : ARGE agn-heimspielarchitekten.....	21
Abbildung 2. Luftbild mit Lage der Bestandsgebäude, weiß: Historisches Rathaus, rot: Rathausanbau, grün: Nebengebäude Hinterhaus und Stadtwache (bereits zurückgebaut). Quelle: Google Earth.	22
Abbildung 3. Innovationsnetzwerk des Urban Mining Pilotprojekts „RückRat“. Quelle: INTEGRA Windsichter GmbH.....	33
Abbildung 4. Beispiele für separat gelagerte Fraktionen aus dem Schadstoffausbau und die Entkernung (A) Rigips Platten (B) Metall (Lüftung) (C) KMF-Dämmmaterial (D) gemischte Bauabfälle. Quelle: Fotografin Dilan Glanz.	34
Abbildung 5. Herausforderung der getrennten Erfassung: Verlorene Schalung mit Holz- und Styroporresten in der Betonkonstruktion (Rippendecke des Ratsaals). Quelle: Fotografin Dilan Glanz.....	35
Abbildung 6. Schritte der Aufbereitung in der mobilen Anlage: Aufgabe (Bagger), Brechen (Prallbrecher) Sieben, Klassieren (Windsichter) und Transport (Radlader). Quelle: Fotografin Dilan Glanz, Integra Windsichter.....	36
Abbildung 7. Massenströme in Tonnen und Verwertungswege der Betonfraktion des Modellprojekts, links gemäß Ausschreibung (Kurkowski, 2019), rechts gemäß Massenermittlung (eigene Berechnung)	38
Abbildung 8. Systemgrenzen der Fußabdruckanalyse	39
Abbildung 9. Massenströme bei der Aufbereitung von Betonbruch zu rezyklierter Gesteinskörnung in einer mobilen Aufbereitungsanlage	45
Abbildung 10. Massenströme bei der Aufbereitung von Betonbruch zu rezyklierter Gesteinskörnung in einer stationären Aufbereitungsanlage, eigene Berechnung nach Heyn und Mettke (2010).....	46
Abbildung 11. Produkt-Materialfußabdruck gemessen in Raw Material Input (RMI) und Total Material Requirement (TMR) pro Tonne Betonbruch für die Entsorgungsphase (C1-C3). Konventionelle Aufbereitung (BAU) und R-Beton (RC) in einer mobilen und stationären Anlage	49
Abbildung 12. Produkt-Wasserfußabdruck gemessen in Water Use (WU), Produkt-Energiefußabdruck gemessen in Cumulated Energy Demand (CED) für fossile Energieträger und Produkt-Klimafußabdruck gemessen in Global Warming Impact (GWI) pro Tonne Betonbruch für die Entsorgungsphase (C1-C3). Konventionelle Aufbereitung (BAU) und Aufbereitung für die Herstellung von R-Beton (RC) in einer mobilen und stationären Anlage.....	50
Abbildung 13. Produkt-Materialfußabdruck gemessen in Raw Material Input (RMI) und Total Material Requirement (TMR) pro Tonne RC-Gesteinskörnung zum Einsatz in R-Beton aufbereitet in einer mobilen Anlage (RCmobil) und einer stationären Anlage (RCstat)	51
Abbildung 14. Produkt-Wasserfußabdruck gemessen in Water Use (WU), -Energiefußabdruck gemessen in Cumulated Energy Demand (CED) für fossile Energieträger und -Klimafußabdruck gemessen in Global Warming Impact (GWI) pro Tonne RC-Gesteinskörnung zum Einsatz in R-Beton aufbereitet in einer mobilen Anlage (RCmobil) und einer stationären Anlage (RCstat).....	51
Abbildung 15. Produkt-Materialfußabdruck gemessen in Raw Material Input (RMI) und Produkt-Wasserfußabdruck gemessen in Water Use pro m ³ Beton der Festigkeitsklasse C25/30 und den Expositions- bzw. Feuchtigkeitsklassen XC4, WO und XC2, WU für die Herstellungsphase (A1-A3) im BAU-Szenario und im RC-Szenario (mobile Aufbereitung).....	52
Abbildung 16. Produkt-Energiefußabdruck gemessen in Cumulated Energy Demand (CED) für fossile Energieträger und Produkt-Klimafußabdruck gemessen in Global Warming Impact (GWI) pro m ³ Beton der Festigkeitsklasse C25/30 und den Expositions- bzw. Feuchtigkeitsklassen XC4, WO und XC2, WU für die Herstellungsphase (A1-A3) im BAU-Szenario und im RC-Szenario (mobile Aufbereitung).....	52

Abbildung 17. Produkt-Ressourcen- und -Klimafußabdrücke für die Herstellung der Beton-Gebäudekonstruktion pro m² Bruttogeschossfläche vollständig aus konventionellem Beton (BAU) und anteilig aus R-Beton (RC)53

Abbildung 18. Fußabdruckergebnisse der BAUkies-, RC-, RC+kies-, RConsite-, RCstat- und RCcemIII-Szenarien im Vergleich zum BAU-Szenario55

7.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Bestandteile der RC-Gesteinskörnung Typ 1 und 2 (DIN 4226-101)	11
Tabelle 2. maximal zulässige RC-Anteile nach R-Beton Richtlinie (DAfStb, 2010).....	14
Tabelle 3. Schadstoffe in Gebäuden und mögliche Schadstoffquellen.....	17
Tabelle 4. Übersicht Arbeitspakete, Laufzeit und Meilensteine	25
Tabelle 5. geschätzte Massen der Abfallfraktionen zur Verwertung in den Bestandsgebäuden des Rathauses Korbach mit möglichen Entsorgungs- und Verwertungsszenarien vor dem Rückbau (Rosen, 2018).....	27
Tabelle 6. Zusammenfassung der Prüfergebnisse (HIB, 2018).....	29
Tabelle 7. Kostenvergleich (Prognose) zwischen der konventionellen Verwertung und einer Verwertung nach dem Urban Mining-Konzept für Beton- und Ziegel (Rosen, 2018)	31
Tabelle 8. Im Zuge des Schadstoffausbaus erfasste Abfallfraktionen im Modellprojekt „RückRat“	34
Tabelle 9. Beschreibung der Entsorgungs-Szenarien von Beton in einem Business As Usual (BAU)- und Recycling (RC)-Szenario	40
Tabelle 10. Beschreibung der Szenarien der Beton-Herstellung	41
Tabelle 11. Funktionelle Einheiten (FE) für die Fußabdruckanalyse	42
Tabelle 12. Treibstoff- und Energiebedarf für den Abbruch der Stahlbetonstruktur	44
Tabelle 13. Energieaufwand für die Aufbereitung von Beton in einer mobilen Aufbereitungsanlage	45
Tabelle 14. Energieaufwand für die Aufbereitung von Beton in einer stationären Aufbereitungsanlage, eigene Berechnung nach Heyn und Mettke (2010)	46
Tabelle 15. Betonzusammensetzung im Recycling (RC)- und Business as Usual (BAU)-Szenario.....	48
Tabelle 16. Varianten und Volumen der Betone für den Neubau des Rathausanbaus	49
Tabelle 17. Parameter für die erweiterte Szenarien-Analyse	54

7.4 Publikationsliste

Sameer, H.; Glanz, D.; Mostert, C.; Bringezu, S. (2019). Urban Mining for Circular Economy in the Building Sector – Ecological Assessment based on Material, Carbon, and Water Footprint, 13th Conference of the International Society for Industrial Ecology (ISIE)-Poster.

Mostert, C.; Sameer, H.; Glanz, D.; Bringezu, S. (2020). Urban Mining for Sustainable Cities: Environmental Assessment of Recycled Concrete. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 588, No. 5, p. 052021). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/588/5/052021>.

Sameer, H.; Mostert, C.; Bringezu, S. (2020). Product Resource and Climate Footprint Analysis during Architectural Design in BIM. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 588, No. 5, p. 052022). IOP Publishing. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/588/5/052022>.

Mostert, C.; Sameer, H.; Glanz, D.; Bringezu, S. (2021) Climate and resource footprint assessment and visualization of recycled concrete for circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*. 174. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105767>.

Sameer, H., Bringezu, S. (2021) Building Information Modelling Application of Material, Water, and Climate Footprint Analysis. *Building Research & Information* <https://doi.org/10.1080/09613218.2020.1864266>

8 Anhang

8.1 Anhang A

Tabelle A1. RC-Modellprojekte

Nr.	Bundesland	Standort	Projektbezeichnung	Aufbereitungsprozess					R-Beton			Prüfung der RC-Gesteinskörnung	
				Aufbereiter	Art d. Anlage	Aufbereitungsart	Outputgröße [mm]	Typ	Einsatz	Anteil RC-Gesteinskörnung [%]	verbaute Menge [m ³]	Umweltverträglichkeitsprüfung nach DIN 4226-101	Prüfung d. Qualität nach DIN 12620
1	BE	Berlin	Forschungs- und Laborgebäude	Fa. Heim Recycling / Berlin Fa. Eurovia/ Schönerlinde	stationär	Trockenaufbereitung	8/16	1	Beton	25 40	5.500	DIN 4226-100	ja
2	BW	Denkendorf	Werkwohnungen	Fa. Feess/ Kirchheim	Semi-mobilen	Trockenaufbereitung	2/16	1	Beton Verfüllung	k.A.	k.A.	DIN 4226-100	ja

3		Kirchheim	Kompetenz-zentrum	Holcim Kies und Beton GmbH & Co. KG/Kirchheim	stationär	Trocken-aufbereitung	2/16	2	Beton	25	1.500	k.A.	k.A.
4		Mann-heim-Neuost-heim	„moderner Plattenbau“	Fa. Scherer & Kohl/ Ludwigshafen	stationär	Trocken-aufbereitung	k.A.	2	Beton	k.A.	750	DIN 100 4226-	ja
5		Stuttgart	Pegasus	Fa. Feess/ Kirchheim	stationär	Trocken-aufbereitung	2/16	1	Beton	45	500	DIN 100 4226-	ja
6		Stuttgart/ Ostheim	Ersatz-bebauung		stationär	Trocken-aufbereitung	k.A.	2	Beton	k.A.	1.370	ja	ja
7		Tübingen	Technisches Rathaus		stationär	Trocken-aufbereitung	k.A.	2	Beton	k.A.	1.165	k.A.	k.A.
8		Weilheim	Mehr-familienhaus		stationär	Trocken-aufbereitung	k.A.	2	Beton	k.A.	350	ZiE	ja
9		Winn-enden	Wiegehaus		stationär	Trocken-aufbereitung	2/16	1	Beton	64	150	k.A.	ja

10	BY	Würzburg	Umweltstation	k.A.	stationär	Trockenaufbereitung	2/16	1	Beton	45	600	ja	k.A.
11	RP	Ludwigshafen	Wohngebäude	Fa. Scherer & Kohl/ Ludwigshafen	stationär	Trocken- & Nassaufbereitung	2/8 8/16	1	Beton	30	500	DIN 4226-100	ja

8.2 Anhang B

Tabelle B1. Regelanforderungen RC-Gesteinskörnung nach DIN EN 12620/R-Beton Richtlinie (DAfStb, 2010)

Eigenschaft		Kategorie der Gesteinskörnung	
		Typ 1	Typ 2
Kornzusammensetzung	Grobe Gesteinskörnung mit $D/d \leq 2$ oder $D \leq 11,2$	GC85/20	GC50/22
	Korngemisch	GA90	GA85
Kornform		FI50 oder SI55	
Feinanteile	Grobe Gesteinskörnung	f4	
Kornrohddichte		$\geq 2.000 \text{ kg/m}^3$	
Schwankungsbreite Mittelwert Kornrohddichte		150 kg/m^3	
Frost-Tau-Widerstand		F4	
Säurelösliches Chlorid		$\leq 0,04 \text{ M.-%}$	
Säurelösliches Sulfat		AS _{0,8}	
Gesamtschwefel (außer Hochofenschlacke)		$\leq 1 \text{ M.-% Kat. S1}$	
Organische Verunreinigungen von Gesteinskörnungen		$\leq 0,1 \text{ M.-%}$	
Maximale Wasseraufnahme nach 10 Minuten bei Gesteinskörnung > 2mm		10 M.-%	15 M.-%

Tabelle B2. LAGA Zuordnungsklassen

Zuordnungsklasse	Verwendung
Z 0	Uneingeschränkter Einbau
Z 1.1	Eingeschränkter offener Einbau bei günstigen hydrogeologischen Standortbedingungen*
Z 1.2	Eingeschränkter offener Einbau bei ungünstigen hydrogeologischen Standortbedingungen
Z 2	eingeschränktem Einbau mit definierten technischen Sicherungsmaßnahmen

* Günstige hydrogeologisch Standorte sind landesspezifisch festzulegen. Hydrogeologisch günstig sind u.a. Standorte, bei denen der Grundwasserleiter nach oben durch flächig verbreitete, ausreichend mächtige Deckschichten mit hohem Rückhaltevermögen gegenüber Schadstoffen überdeckt ist. Dieses Rückhaltevermögen ist in der Regel bei mindestens 2 m mächtigen Deckschichten aus Tonen, Schluffen oder Lehmen gegeben.

Tabelle B3. Expositionsklasse nach Feuchtigkeitsklassen

Expositionsklasse	Beschreibung
X0	Expositionsklasse ohne Korrosions- oder Angriffsrisiko
XC1 bis XC4	Expositionsklassen für Korrosionsgefahr, durch Karbonatisierung
XD1 bis XD3	Expositionsklassen für Korrosionsgefahr, durch Chloride, ausgenommen Meerwasser
XS1 bis XS3	Expositionsklassen für Korrosionsgefahr, durch Chloride aus Meerwasser
XF1 bis XF4	Expositionsklassen für Gefahr von Frostangriff mit oder ohne Taumittel
XA1 bis XA3	Expositionsklassen für chemischen Angriff

8.3 Anhang C

Tabelle C1. Bedarf an RC-Gesteinskörnung in Beton der Festigkeitsklasse C25/30 nach Expositionsklassen und Feuchtigkeitsklassen für das Projekt Rathaus Korbach (nach Rosen, 2018)

Bauteile (Beispiele)	Decken, Innen- wände	Boden- platten (unten)	Außen- wände	erd- berührende Außen- wände	Funda- ment	Fassade	
Expositions- und Feuchtigkeitsklasse nach DIN 1045-2	WO, XC1	WU, WF, XC2	WF, XC3	WU, WF, XC3	WF, XC3, XF1	WF, XC4, XF1	
Betonmenge V_{Beton} [m ³]	1.856	341	371	134	479	169	
Typ der einzusetzenden Gesteinskörnung nach DIN 4226-101	Typ 1	Typ 1	Typ 1	Typ 1	Typ 1	Typ2	
Maximal zulässiger RC-Anteil nach R-Beton Richtlinie v_{max}	≤ 45%	≤ 35%	≤ 45%	≤ 35%	≤ 35%	≤ 25%	
Bedarf RC-Gesteinskörnung m_{RC} [t]	1.333	191	267	75	268	67	
Berechnung	$m_{RC} = V_{Beton} * 0,7 * v_{max} * \rho_{RC}$						
Bedarf Betonrezyklat [t]						2.134	47
Bedarf Ziegelrezyklat [t]							20

8.4 Anhang D

Anforderungen an die Qualifikation der Abbruch- und Aufbereitungsunternehmen

Für den selektiven Rückbau und die Herstellung von RC-Gesteinskörnung werden hohe Anforderungen an die Qualifikation der Abbruch- und Aufbereitungsunternehmen gestellt, die beispielsweise durch Zertifizierung mit entsprechender Fremdüberwachung nachgewiesen werden kann.

Der Bieter erklärt durch seine Unterschrift

- a) dass er über erforderliche Zulassungen und Genehmigungen verfügt,
- b) dass der vorhandene Gerätepark den Unfallverhütungsvorschriften entspricht,
- c) dass sein Personal ausreichend qualifiziert, geeignet und hinsichtlich Arbeitssicherheit, Gesundheitsschutz und selektiven Rückbau/Abfalltrennung unterwiesen ist,
- d) dass eine ausreichende Haftpflichtversicherung für Personen- und Sachschäden besteht, die ebenfalls Schäden einschließt, welche durch falsche Bedienung oder Aufstellung von Verkehrsanlagen sowie mangelhafte Beleuchtung der Abbruch-Baustelle entstehen,
- e) dass er Mitglied der Bauberufsgenossenschaft ist Mitglieds-Nr.: '.....'!
- f) dass er (z.B. durch eingehende und sorgfältige Baubegehungen), sich ein umfassendes Bild bezüglich Angebotsumfang, Schwierigkeitsgrad, Rahmenbedingungen, und Verwertungs-/Entsorgungsumfang der zu erwartenden und zu entsorgenden Bau- und Schadstoffe gemacht hat, zur Erstellung eines vollständigen Angebotes.
- g) dass ordnungsgemäße Entsorgungen / Verwertungen nach KrWG in Verbindung mit der Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV) erfolgen

Die Qualifikation der Aufbereitungsunternehmen ist wie folgt beschrieben:

Anforderung an die Verwertungsanlage: Zertifizierung nach DIN EN 12620 für die Herstellung einer rezyklierten Gesteinskörnung für Beton.

Vorgaben für die Separierung der Abfallfraktionen

In der Ausschreibung ist die sortenreine Verwertung der anfallenden Abfallfraktionen vorgegeben, insbesondere sortenreiner Mineralstofffraktionen, z. B. 17 01 01 Beton oder 17 01 02 Ziegel.

Beispiele aus der Positionsbeschreibung:

Beton, DIN EN 12620/DIN 4226-100

Beton sortenrein laden, transportieren und verwerten.

Abfallschlüsselnummer nach AWW: 170101 – Beton

Ziegelsteine sortenrein laden, transportieren und verwerten.

Abfallschlüsselnummer nach AVV: 170102 - Ziegel,

Hinweise für die Umweltverträglichkeitsklasse, z.B. nach LAGA

Die Einstufung z.B. nach LAGA soll sicherstellen, dass Baustoffe mit dem gleichen Abfallschlüssel auch von der Umweltverträglichkeitsklasse her unterschieden werden. Zum Beispiel:

Beton Z 1.2, Stützmauern, Treppe, Fundamente Beton, Stützmauern, Treppe sortenrein laden, transportieren und verwerten.

Abfallschlüsselnummer nach AVV: 170101 - Beton, Abfall ist als nicht gefährlich eingestuft gemäß Abbruch- und Entsorgungskonzept, LAGA Z 1.2.

Abfall in Behälter oder Miete auf Baustelle lagernd, zur Verwertungsanlage transportieren und verwerten.

strenge Schadstoffentfrachtung

Die Ausschreibung beinhaltet ein ausführliches Schadstoffgutachten mit Schadstoffkataster. Die Schadstoffentfrachtung muss von der Bauüberwachung kontrolliert werden. Ausgebaute Gefahrstoffe sind streng von ungefährlichen und „sauberen“ Materialien getrennt zu halten, um Kontaminationen zu verhindern.

Grundsätzlich wird mit dem Schadstoffausbau und der Entkernung das Ziel verfolgt, sämtliche nicht mineralischen Bauteile/ technischen Installationen und sämtliche Boden-/ Wand-/ Decken- und Dachaufbauten (innen, außen; mehrschichtig bzw. -lagig; auch mineralisch) bis zur Rohkonstruktion der Rückbauobjekte auszubauen/zu demontieren, sämtliche Stofffraktionen zu separieren und die Materialien sortenrein für die Verwertung/Entsorgung bereitzustellen.

Zu den schadstoffhaltigen Materialien zählen u.a. KMF (Kategorie I), Holz A1 bis A3, Leuchtstoffröhren, Kondensatoren, Dachbahnen, Schwarzanstriche, Kunststoffe, Gipsbaustoffe, etc. Die zu entfernenden Materialien sind unter Berücksichtigung der Abfallschlüssel so auszubauen und zu separieren, dass sortenreine Stofffraktionen angelegt und schadlos verwertet oder entsorgt werden können

Der Schadstoffausbau erfolgt einschließlich zu separierender, schad- und störstoffhaltiger Anlagen, Installationen und Bausubstanz sind fachgerecht zu demontieren und getrennt vorzuhalten.

Laboranalysen

Während des Rückbaus sind weitere Schadstoffuntersuchungen nach LAGA M20, DIN 4226-101 und DIN EN 12620 für Bauteile, die vorher nicht zugänglich waren (z.B. das Fundament), durchzuführen und vom Bauherrn zu beauftragen.

In Eigenverantwortung des AN sind die Gerätschaften und Materialien für die Kontrolle / Deklaration zur gesicherten Festlegung des vom AN vorgesehenen Entsorgungsweges durch den AN noch näher zu inspizieren und für eine eventuelle erforderliche weitere Entsorgungsanalytik vom AN zu untersuchen und

einzukalkulieren soweit diese erforderlichen Laboranalysen nicht Leistungen der Positionen
(Deklarationsanalysen nach LAGA Bauschutt (M20), LAGA Boden (M20) und Deponieverordnung) sind.

Platz auf der Rückbaustelle

Der Baustelleneinrichtungsplan sollte Platz für die separate Zwischenlagerung von Haufwerken und für die Aufstellfläche verschiedener Container zur sortenreinen Abfalltrennung berücksichtigen.

Für den selektiven Rückbau ist auf der Baustelle ein Sammellager, bestehend aus zugelassenen Containern und Mieten (Haufwerke) für die verschiedenen möglichst sortenrein erfassten Materialien des Schadstoffausbaus, der Entkernung und des selektiven Rückbaus der statischen Ausbaumaterialien wie Beton und Ziegel innerhalb der Umzäunung vorzusehen. Hier können auch weitere Deklarationsanalysen für die Verwertung durchgeführt werden

Informationen zu regionalen Recyclingbetrieben

Die in der Grundlagenermittlung durchgeführten Recherchen zu ortsnahen Recyclingbetrieben und deren Annahme- und Abgabepreise sollten der Ausschreibung beigelegt werden.

Gespräche im Vorfeld der Ausschreibung haben ergeben, dass gemäß Logistikkonzept [N2] mehrere Aufbereiter in der Lage wären diese Anforderungen zu erfüllen, insbesondere Firma 1, Firma 2 und Firma 3. Die darin enthaltenen bisherigen Preisangaben sind nicht verbindlich und müssen für diese Ausschreibung verbindlich angefragt und angegeben werden.

z.B.:

Beton, DIN EN 12620/DIN 4226-100

Beton sortenrein laden, transportieren und verwerten.

[...]

Lieferanten, z.B.:

Firma 1, Standort 1, Tel.: xxxx

Firma 2, Standort 1, Tel.: xxxx

Firma 3, Standort 1, Tel.: xxxx

oder gleichwertiger Art.

8.5 Anhang E

Tabelle E1. Geplante und tatsächlich erfasste Mengen der Wertstoffe und Abfälle im Pilotprojekt

Abfall-schlüssel	Bezeichnung	Menge		Einheit
		PLAN	IST	
17 05 04	Boden	8.845,0	7.821,4	t
17 01 01	Beton, DIN EN 12620/DIN 4226-100	5.000,0	6.891,4	t
170 10 1	Beton Z1.2	2.400,0	0	t
17 05 04	Kies/Splitt	2.752,2	mit Bodenmaterial entsorgt	t
17 01 07	Bauschutt	1.063,0	2.744,2	t
20 01 21*	Leuchtstoffröhrenlampen	850,0	1.437,0	Stk.
17 04 02	Aluminium	10,0	15,6	t
17 04 05	Eisen und Stahl	32,0	264,4	t
17 04 11	Kabel und Kupfer	9,0	0,9	t
17 01 07	Ziegel-, Bims-Mauerwerk, Z 1.1	401,0	2.726,2	t
17 01 07	Ziegel-, Bims-Mauerwerk, Z.1.2	360,0	0,0	t
17 02 04*	Ziegel	26,0	18,0	t
17 01 02	Ziegel	8,0	0	t
17 02 01	Holz	37,0	65,8	t

17 02 04*	Holz (verunreinigt)	131,0	123,3	t
17 03 02	Bitumengemische	56,5	250,3	t
	davon Gussasphalt		197,8	t
17 02 02	Glas	5,0	0,0	t
10 11 12	Glas (Fenster-, Türscheiben)	31,0	22,5	t
	davon Glas zur Verwertung		9,7	t
	davon Glas zur Entsorgung		12,8	t
17 02 03	Kunststoff	16,4	0	t
15 01 02	Styropor	0,0	29,78	t
17 08 02	Baustoffe auf Gipsbasis	7,0	18,2	t
17 01 03	Fliesen/Keramik	6,2	als Gemisch entsorgt	t
17 06 3*	Dämmmaterial	6,0	12,2	t
17 06 4	Dämmmaterial, Heraklit	1,5	15,3	t
17 09 02*	PCB haltige Bauabfälle	1,5	0,0	t
17 03 01*	kohlenteerhaltige Bitumengemische	1,0	54,3	t
17 03 03*	Teerhaltige Kokosmatten	0,2	0,0	t

Tabelle E2. Aufschlüsselung der Fraktion gemischte Metalle/Bewehrungsstahl nach (Lieferscheine/Wiegescheine, Excel-Tabelle zur Massenermittlung, Bautagesberichte (Bonensteffen GmbH), Protokoll Interview Funke GmbH (Flore), Leistungsbeschreibung mit Leistungsverzeichnis selektiver Rückbau / Neubau, Niederschriften der Baubesprechung (Kurkowski o. J.)

Beschreibung	Menge [t]
Gemischte Metalle Entkernung (C1)	96,17
Bewehrungsstahl Rückbau (C1)	168,23
Bewehrungsstahl aus der Baustoffaufbereitung (C3)	20,00
Eisen und Stahl Rückbau gesamt	264,43
Bewehrungsstahl gesamt	188,23

8.6 Anhang F

Tabelle F1. Sachbilanzergebnisse Entsorgung von Beton und Herstellung von RC-Gesteinskörnung

Szenario		Funktionelle Einheit				1 t Beton		1 t RC-Gesteinskörnung	
		Aufbereitungsanlage				mobil	stat	mobil	stat
		Module	Flow	Material	Einheit				
RC	BAU	C1	Input	Beton	[kg]	1.000	1.000	1.025	1.025
				Diesel	[MJ]	73	73	75	75
			Output	Stahl	[kg]	24	24	25	25
				Betonbruch	[kg]	976	976	1.003	1.003
		C2	Input	Masse	[kg]	976	976	1.003	1.003
				Transportdistanz	[km]	41	41	41	41
				Transportaufwand	[t*km]	40	40	40	40
		C3 konventionell	Input	Diesel	[MJ]	28,2	9,2	28,2	9,2
				Strom	[MJ]	0,0	8,1	0,0	8,1
			Output	Stahl	[kg]	3,0	3,0	3,0	3,0
				RC-Material	[kg]	762	49	-	-
				RC-Material zur Aufbereitung	[kg]	211	924	1.000	1.000

		C3 zusätzliche Bearbeitung	Input	Diesel	[MJ]	1,7	5,0	8,1	10,0
				Strom	[MJ]	0,0	12,5	0,0	25,1
				Wasser	[m ³]	0,0	0,2	0,0	0,4
			Output	Abfall	[kg]	0,2	0,2	0,9	0,4
				RC-Material	[kg]	0,0	424,0	-	-
				RC-Gesteins- körnung DIN 12620 / 4226-101	[kg]	211,0	499,0	1.000	1.000
		C3 gesamt	Input	Diesel	[MJ]	29,9	14,2	36,3	19,2
				Strom	[MJ]	0,0	20,6	0,0	33,2
				Energie gesamt	[MJ]	29,9	34,8	36,3	52,4

8.7 Anhang G

Tabelle G1. Standard-Emissionsfaktoren und Unsicherheitsbereiche für mobile Maschinen* mit Dieselmotoren gemäß den IPCC-Richtlinien für nationale Treibhausgasinventare (IPCC, 2006)

CO2 [kg/TJ]			CH4 [kg/TJ]			N2O [kg/TJ]		
Vorgabe	Min	Max	Vorgabe	Min	Max	Vorgabe	Min	Max
wert			wert			wert		
74.100	72.600	74.800	4,15	1,67	10,4	28,6	14,3	85,8

* Mobilen Maschinen umfasst Fahrzeuge und mobile Maschinen, die beispielsweise in der Land- und Forstwirtschaft, in der Industrie (einschließlich Bau und Instandhaltung) und in Wohngebieten eingesetzt werden.

Tabelle G2. Fußabdruckergebnisse für 1 MJ Energie mit Diesel und Strom mit GaBi-Hintergrunddaten (Sphera Solutions Inc., 2020b) und Standardwerten für die Dieselerbrennung (IPCC, 2006)

Kategorie	Indikator	Einheit	Ergebnisse	
			Diesel	Strom
Produkt-Materialfußabdruck	RMI	kg Primärrohstoffe / MJ	0,0278	0,0449
	TMR	kg Primärmaterial / MJ	0,0325	0,0753
Produkt-Wasserfußabdruck	WU	gewichteter m ³ Wasser / MJ	0,4212	1,7588
Produkt-Energiefußabdruck	KEA	MJ nicht ern. Energie / MJ	1,1072	2,0123
Produkt-Klimafußabdruck	GWI	kg CO ₂ -Äqu. / MJ	0,1004	0,2265