

Förderung des Recyclings von Beton- und Mischabbruch und der anschliessenden Wiederverwendung als Recyclingbaustoffe

Grundlagenbericht

Modul 1 - Systematische Literaturrecherche und gezielte Branchen-Interviews hinsichtlich Betonabbruch und Mischabbruch



Bilder:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bauschutt_Abruchgrundst%C3%BCck.JPG
<https://orth-recycling.de/baustoffe/>

Dr. Sandra Müller, Pascal Näf, Dirk Hengevoss und Prof. Dr. Christoph Hugi
MuttENZ, 20. Januar 2022

Kontakt:

Fachhochschule Nordwestschweiz

Hochschule für Life Sciences, Institut für Ecopreneurship

Hofackerstrasse 30, CH-4132 MuttENZ

<http://www.fhnw.ch/lifesciences>

+41 61 228 57 06 | sandra.mueller@fhnw.ch

+41 61 228 55 98 | dirk.hengevoss@fhnw.ch

+41 61 228 55 84 | christoph.hugi@fhnw.ch

Zusammenfassung

Ziel dieser Untersuchung ist es für die beiden Kantone Basel-Landschaft und Basel-Stadt Grundlagen zur Förderung des Recyclings von Beton- und Mischabbruch und einer hochwertigen Verwendung der Recyclinggranulate zu erarbeiten.

Methodisch wurde diese Grundlage anhand einer systematischen Literaturrecherche und 15 gezielten Brancheninterviews erarbeitet. Die Brancheninterviews umfassten die Bereiche: «Recycling», «Rückbau und Abbruch», «Hochbau und Tiefbau», «Forschung», «kantonale Ämter» und «Immobilien-gesellschaft mit Leuchtturmprojekt» aus der Schweiz und dem angrenzenden Deutschland.

Die Untersuchungen ergaben, dass in den Kantonen Basel-Landschaft und Basel-Stadt bereits mehrere Unternehmen Beton- und Mischabbruch mittels Trockenaufbereitung rezyklieren. Für die Herstellung von qualitativ hochwertigen Recyclinggranulaten ist eine sortenreine Trennung der mineralischen Fraktionen beim Rückbau eine Grundvoraussetzung. Nur so können die umwelt- und bautechnischen Anforderungen an die Recycling-Granulate (RC-Granulate) wirtschaftlich tragbar eingehalten werden. Die meisten befragten Baustoffrecycling-Unternehmen verarbeiten fast ausschliesslich Recyclingbeton RC-C¹ zu Betongranulat (R_c²), welcher dann meist zur Herstellung von Magerbeton verwendet wird. Für Mischgranulat (R_b³) fehlen momentan die Anwendungsmöglichkeiten. Um diese zu vergrössern, müsste von Trocken- auf Nassaufbereitung umgestellt werden. Dies ermöglicht insbesondere für Recyclingmischabbruch RC-M⁴ aber auch für RC-C eine höherwertige Anwendung in der Betonherstellung und die Erhöhung des RC-Granulatanteils, verteuert aber die Aufbereitung und ist damit wirtschaftlich problematisch. Günstige Primärkiesimporte aus dem benachbarten Elsass, sowie niedrige Deponierungskosten für mineralischen Bauschutt erschweren bis anhin die Wirtschaftlichkeit hochwertiger Anwendungen insbesondere von RC-M.

Durch Massnahmen, welche die Nachfrage für die RC-Granulate vergrössern, lassen sich die Aufbereitungskosten senken. Beispiele dafür umfassen Vorbildfunktion der Kantone Basel-Landschaft und Basel-Stadt und Leuchtturmprojekte zum Einsatz von RC-Granulaten. Eine höhere Auslastung der Produktionskapazitäten reduziert den Kapitalkostenanteil an den Gesamtkosten der RC-Granulatherstellung. Mit einer angemessenen Erhöhung der Deponiepreise wird eine Lenkungswirkung erreicht, welche den Anteil des Betons – und Mischabbruchs erhöht, welcher dem Recycling zugeführt wird.

Bezüglich der Schadstoffe sind vor allem erhöhte Chrom VI Konzentrationen im Baustoff ein Problem. Mit der Nassaufbereitung kann jedoch der lösliche Anteil ausgewaschen werden, was den Anwendungsbereich für die RC-Granulate vergrössert.

In der Literatur sind Beispiele aus der Schweiz und anderen europäischen Ländern fürs Baustoffrecycling beschrieben. Es werden hauptsächlich Anwendung für R_b und R_c in Konstruktionsbeton erläutert. Die Umweltvorteile von RC-Beton hängen vom Zementanteil und den Transportdistanzen ab. Letztere sollten in den aufgezeigten Beispielen unter 25km liegen. Der

¹ **Recyclingbeton RC-C:** «Beton nach SN EN 206-1, dessen Gesteinskörnung grösser 4 mm zu mindestens 25 Massenprozent aus R_c besteht.» (Empa, 2011).

² **R_c** «Körner aus Beton, Betonprodukten, Mörtel und Mauersteinen aus Beton, gemäss SN EN 933-11» (Empa, 2011).

³ **R_b** «Körner aus Mauerziegel (d.h. Mauersteine und Ziegel), Kalksandsteinen, nicht schwimmendem Porenbeton, gemäss SN EN 933-11» (Empa, 2011).

⁴ **Recyclingmischabbruch RC-M:** «Beton nach SN EN 206-1, dessen Gesteinskörnung grösser 4 mm zu mindestens 25 Massenprozent aus Mischgranulat besteht: R_b ≥ 5 Massenprozent und R_c + R_b ≥ 25 Massenprozent.» (Empa, 2011).

Zementanteil sollte maximal 10% höher sein als die verwendete Menge an Zement des Primärmaterials. Ein weiterer Umweltvorteil ist die Verwendung von Nebenprodukten der Baustoffaufbereitung, wie beispielsweise das Altmetall im Bauschutt.

Das Vertrauen in die RC-Baustoffe ist bei allen Befragten vom Jahr 2016 bis zum Jahr 2021 gestiegen oder auf hohem Niveau konstant geblieben. Dies ist für die Akzeptanz und Förderung des Baustoffrecyclings wichtig. Das grössere Vertrauen ist auf die gewonnenen Erkenntnisse, die positiven Erfahrungen und die Aufklärungsarbeit zurückzuführen.

In den beiden Kantonen Basel-Landschaft und Basel-Stadt können mit den gezielten Massnahmen wie z.B. den bereits angedachten Lenkungsabgaben auf Beton und Mischabbruch Anreize für vermehrtes Recycling geschaffen werden. Für hochwertige Produkte aus RC-B und insbesondere von RC-M mit höchstmöglichem RC-Anteil bedingt es eine Nassaufbereitung des Abbruchmaterials. Dadurch können aus RC-C und RC-M Magerbeton und Konstruktionsbeton hergestellt werden. Um die Nachfrage an die erforderlichen Mengen von Granulaten aus RC-C und RC-M für eine konkurrenzfähige Produktion positiv zu stimulieren, ist eine vorgeschriebene Verwendung von Betone mit hohem RC-Anteil in öffentlichen Projekten von Vorteil. Entsprechende kantonale Vorgaben für die Erstellung von Ausschreibungsunterlagen wurden in beiden Kantonen bereits eingeführt. Sie verbessern die Planungssicherheit und erhöhen damit auch die Investitionsbereitschaft der Unternehmenden in Recyclinganlagen in der Region Basel.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	2
1. Ausgangslage und Zielsetzung	5
1.1. <i>Baustoffrecycling in den Kantonen Basel-Landschaft und Basel-Stadt</i>	5
1.2. <i>Einsatzbereiche von Recycling-Beton</i>	7
1.3. <i>Zielsetzung</i>	9
2. Methode	9
2.1. <i>Experteninterviews</i>	9
2.2. <i>Systematische Literaturrecherche</i>	10
3. Resultate und Diskussion	10
3.1. <i>Ausgangsmaterial</i>	11
3.2. <i>Technik</i>	14
3.3. <i>Kosten</i>	15
3.4. <i>Schadstoffbelastung</i>	16
3.5. <i>Trennung</i>	17
3.6. <i>Betoneigenschaften</i>	18
3.7. <i>Anwendungsbereiche</i>	18
3.8. <i>Vertrauen</i>	21
3.9. <i>Ökobilanzen zum Recycling von Beton- und Mischabbruch</i>	22
4. Schlussfolgerung	26
5. Anhang	28
5.1. <i>Interviewleitfaden</i>	28
5.2. <i>E-Mail-Vorlage</i>	29
5.3. <i>Fragen der Interviews</i>	30
5.4. <i>Zusammenfassung der verwendeten Publikationen zu Ökobilanzen</i>	31
Referenzen	36

1. Ausgangslage und Zielsetzung

In diesem Kapitel werden die Situation des Baustoffrecyclings in den Kantonen Basel-Landschaft und Basel-Stadt beschrieben und die Einsatzbereiche von RC-Beton aufgezeigt.

1.1. Baustoffrecycling in den Kantonen Basel-Landschaft und Basel-Stadt

Die mineralischen Baustoffe verursachen in den Kantonen Basel-Landschaft und Basel-Stadt die grösste Menge an Abfall mit jährlich etwa 3.2 Millionen Tonnen (Baustoffkreislauf Regio Basel, 2020). Dies sind rund 6.4 Tonnen pro Einwohner und Jahr. Die Kantone Basel-Landschaft und Basel-Stadt liegen somit leicht unter dem Schweizer Durchschnitt von 7.4 Tonnen pro Kopf und Jahr (BAFU, 2021). Insgesamt werden 900'000 Tonnen Bauabfälle pro Jahr aus diesen beiden Kantonen auf entsprechenden Deponien entsorgt. Zusätzlich werden 200'000 Tonnen pro Jahr aus anderen Kantonen in diesen Deponien entsorgt. Die mineralischen Bauabfälle werden in dieser Arbeit untersucht. Weiter werden noch 900'000 Tonnen Aushubmaterial im Ausland zur Wiederauffüllung eingesetzt (Baustoffkreislauf Regio Basel, 2020). Das im Ausland verwertete Aushubmaterial wird in dieser Untersuchung nicht weiter untersucht.

Das Recycling mineralischer Bauabfälle gestattet die Nutzung von Primärkies zu reduzieren und das Wachstum des benötigten Deponievolumens zu mindern und folglich Eingriffe in die Natur und Landschaft zu vermeiden. Weiter wird durch eine lokale Herstellung mineralischer Recyclingbaustoffe die regionale Wertschöpfung gefördert (Zimmermann und Utinger, 2020). Letzteres hat in der Region Basel ein grosses Potential. Die im Jahre 2018 von den Kantonen Basel-Landschaft und Basel-Stadt gegründete «Taskforce Baustoffkreislauf Regio Basel» hat eine Strategie erarbeitet, um die Baustoffkreisläufe möglichst zu schliessen (mehr zur Gesetzlichen Entwicklung im Kapitel 3.3). Wichtig zur Schliessung der Baustoffkreisläufe ist unter anderem ein systematischer Rückbau. Eine Übersicht zum Vorgehen eines Rückbaus ist in Abbildung 1 dargestellt.

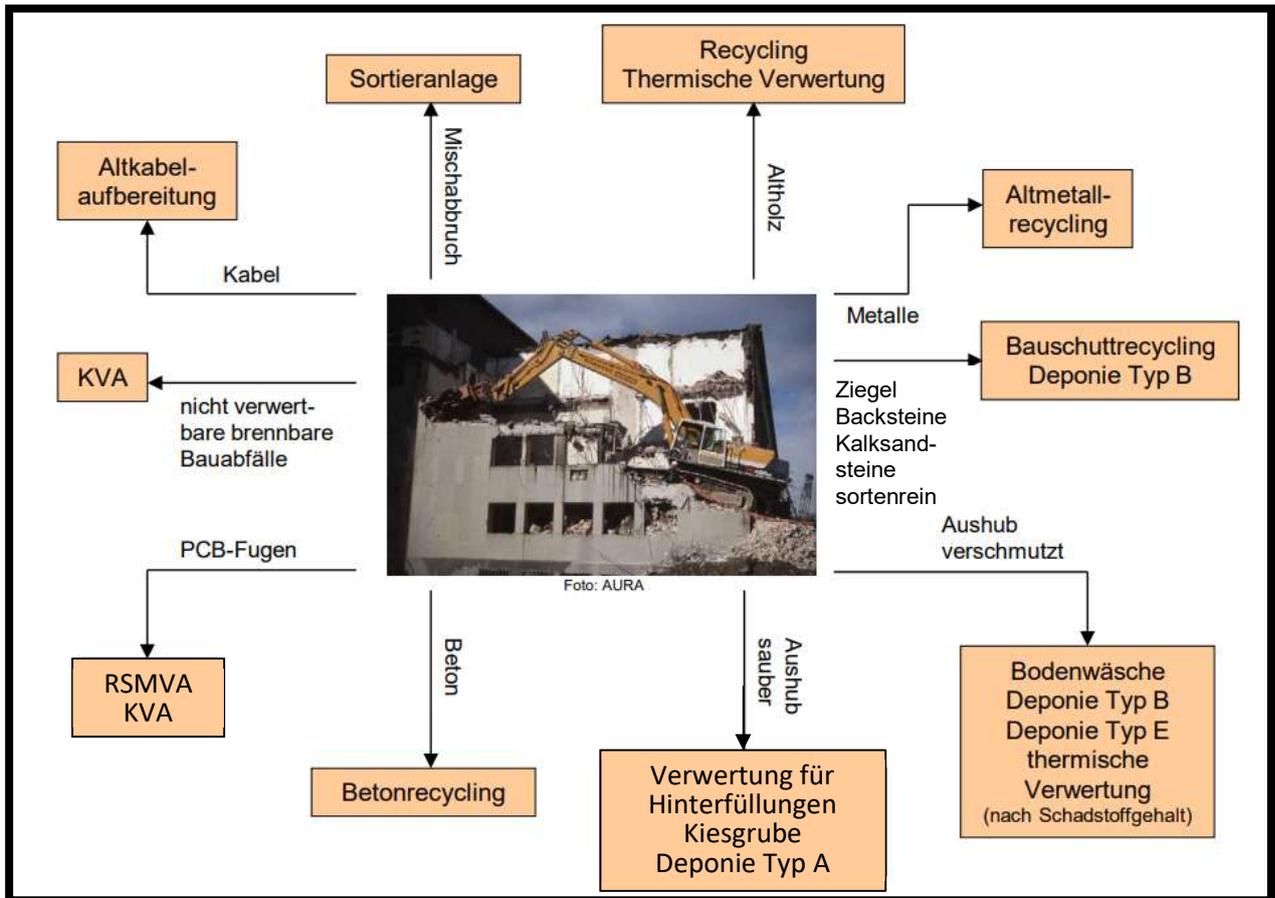


Abbildung 1: Übersicht des Vorgehens beim Rückbau (angepasst von BS, 2021a).

In der Region Basel sind einige Anlagen zum Aushubwaschen und Baustoffrecycling geplant oder bereits gebaut. Durch die Inbetriebnahme solcher Recyclinganlagen werden die Kantone Basel-Landschaft und Basel-Stadt deutlich näher an ihr Ziel einer Kreislaufwirtschaft für mineralische Baustoffe herankommen.

1.2. Einsatzbereiche von Recycling-Beton

Die Anwendungsbereiche für RC-Beton hängen von dessen Materialeigenschaften und der Exposition ab. Die beiden Materialien RC-Beton mit RC-C und RC-Beton mit RC-M haben je nach Art der Aufbereitung und Stoffzusammensetzung im Vergleich zu Beton aus Primärmaterial unterschiedliche Eigenschaften. Einen grossen Einfluss hat die Zusammensetzung der Gesteinskörnungen (Kuster, *u a.*, 2017). Die Gesteinskörnung von recyceltem Material hat im Vergleich zu primärem Material eine geringere Rohdichte. Zudem ist die Rohdichte grösseren Schwankungen unterworfen. Weiter ist die Porosität und die Wasseraufnahme von RC-Gesteinskörnungen grösser (Hoffmann, 2015). Aufgrund dieser Unterschiede in den Eigenschaften können nicht alle Arten von RC-Beton für sämtliche Expositionsklassen eingesetzt werden. Die Konstruktionsmöglichkeiten in einem Gebäude mit RC-C und RC-M sind in der Abbildung 2 ist dargestellt.

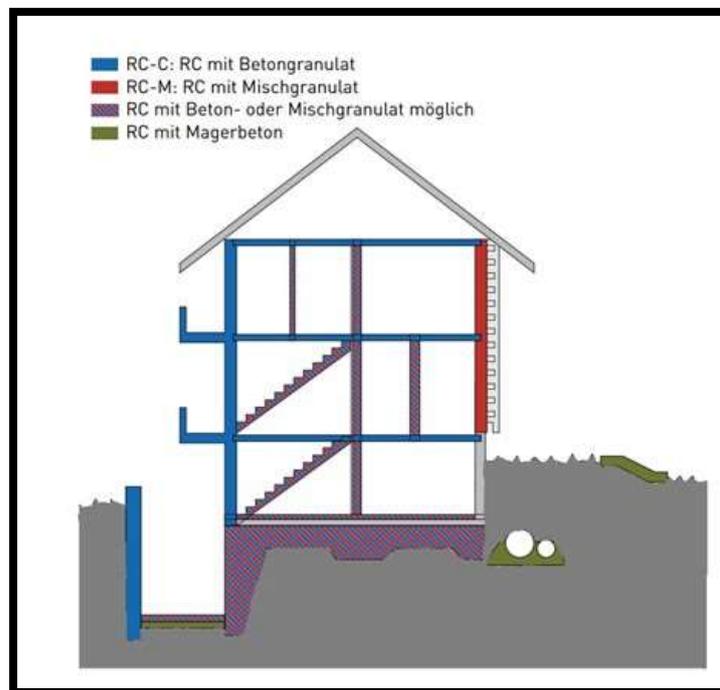


Abbildung 2: Mögliche Einsatzgebiete der verschiedenen RC-Beton Typen (angepasst von Kuster, *u a.* 2017).

Die Anforderungen an die Haltbarkeit, Bewehrung und Vermeidung von Betonkorrosion sind in den Expositionsklassen festgelegt. Die Ausbildung von Betonkorrosion hängt von physikalischen und chemischen Einwirkungen ab. Die Bezeichnung der Expositionsklassen setzt sich wie folgt zusammen. Der Buchstabe X steht für Exposition (siehe Beispiel in Tabelle 2). Dieser wird ergänzt durch einen Buchstaben für die Art der Einwirkung, und einer Ziffer 1 (tief) bis 4 (hoch) für die Intensität der schädigenden Einwirkung (BauNetz Wissen Beton, 2021). Die Bedeutung der Buchstaben ist in der Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Beschreibung der Buchstaben bezüglich der Expositionsklassen (angepasst von BauNetz Wissen Beton, 2021).

Art der Exposition	Beschreibung
0	Kein Angriffsrisiko
C	Carbonatisierung
D	Chloride beispielweise aus Streusalz
S	Meerwasser
F	Frost und Taumittel
A	Chemischer Angriff
M	Mechanischer Angriff

In der Tabelle 2 sind die zulässigen Expositionsklassen des RC-Beton nach dem Merkblatt SIA 2030 dargestellt. Das Merkblatt beinhaltet Auskünfte über die Voruntersuchung und Zulässigkeit für den Einsatz von RC-Beton (Holcim, 2019).

Tabelle 2: Einsatzmöglichkeiten von RC-Beton für die unterschiedlichen Expositionsklassen nach dem Merkblatt SIA 2030 (angepasst von Holcim, 2019). Rc steht für RC-Beton und Rb steht für Körner aus Beton, Betonprodukten, Mörtel und Mauerstein aus Beton, Rb steht für Körner aus Bauer-Dachziegeln aus gebranntem Ton, Kalksandstein, Porenbetonstein (nicht schwimmend).

RC-Beton		Expositionsklassen				
Bezeichnung	Anteile rezyklierte Gesteinskörnung	X0	XC1 (trocken)	XC1 (nass), XC2, XC3	XC4	XD, XF, XA
RC-C	$R_c \geq 25 \text{ M.-%}$ $R_b < 5 \text{ M.-%}$	zulässig				Voruntersuchungen zwingend
RC-M	$5 \text{ M.-%} \leq R_b \leq 25 \text{ M.-%}$ und $R_c + R_b \geq 25 \text{ M.-%}$	zulässig			Voruntersuchungen zwingend	Nicht zulässig
	$R_b > 25 \text{ M.-%}$	zulässig	Voruntersuchungen zwingend			

1.3. Zielsetzung

Ziel dieser Untersuchung ist eine Wissensgrundlage zur Förderung des Recyclings von Betonabbruch und Mischabbruch und der Verwendung von Recyclinggranulaten zu erarbeiten. Insbesondere soll untersucht werden, wie aus RC-C und RC-M (Fokus) hergestellten mineralische Recyclingbaustoffen möglichst hochwertigen Anwendungen (gebundene Form) in möglichst vielen Lebenszyklen im Baustoffkreislauf gehalten werden können. Dabei sollen sich durch wiederkehrendes Recycling, keine Verunreinigungen aufkonzentrieren und dadurch die Qualitätsanforderungen für eine Wiederverwendung nicht mehr erfüllen.

In den folgenden Kapiteln sind die Methode, Resultate und Diskussion, sowie die Schlussfolgerungen enthalten.

2. Methode

In diesem Kapitel werden die angewandten Methoden für die durchgeführten Experteninterviews in verschiedenen Branchen und für die systematische Literaturrecherche erläutert.

2.1. Experteninterviews

Für die Erfassung der Ist-Situation wurden Interviews mit Experten/Innen aus unterschiedlichen Branchen durchgeführt, welche in Absprache mit den Kantonen Basel-Landschaft und Basel-Stadt ausgewählt wurden. Die Auswahlkriterien sind in Tabelle 3 beschrieben. Von den 15 kontaktierten Experten konnten zwei Experten, trotz mehrmaliger Kontaktaufnahme, nicht erreicht werden. In dieser Studie werden die Begriffe «Experten», «Bauingenieure» und «Architekten» als Vertretende für männliche und weiblichen Personen verwendet.

Tabelle 3: Beschreibung der systematischen Auswahl von den Experten.

Auswahlkriterien	Beschreibung
Branchentyp und Anzahl	Recyclingbranche: 6 Hoch- und Tiefbau: 2 kantonale Ämter: 1 Immobilien-gesellschaft mit Leuchtturmprojekt: 1 Abbruch und Rückbau: 4 Forschung: 1
Region	Es wurde darauf geachtet, möglichst alle Branchen, welche mit Recyclingbaustoffen in Verbindung stehen, zu berücksichtigen. Es wurden sowohl Branchenteilnehmer aus dem Kanton Basel-Landschaft und Basel-Stadt wie auch ausserkantonale und ausserschweizerische Branchenteilnehmer befragt.
Erfahrung der Experten	Alle befragten Experten haben mindestens zwischen fünf und zehn Jahren Berufserfahrung in der jeweiligen Branche.

Zur Vorbereitung wurde für die Experteninterviews ein Leitfaden mit den Fragen ausgearbeitet (siehe Anhang 5.1 und 5.3). Die Autoren haben im Vorfeld bereits mögliche Antworten erarbeitet,

um die Fragen hinsichtlich Qualität und Relevanz zu schärfen. Als Vorinformation wurde den Experten eine E-Mail mit der Möglichkeit einer Nicht-Teilnahme gesendet (siehe Anhang 5.2). Anschliessend wurden die Experten früh morgens oder abends telefonisch kontaktiert. Zur Validierung wurde der Fragenkatalog zuerst mit zwei Unternehmen der Branche getestet. Weil diese Validierung wie geplant verlief, wurden diese zwei Interviews in die total 15 Interviews miteinbezogen.

2.2. Systematische Literaturrecherche

Für die Auswahl der Literatur wurden folgende Kriterien berücksichtigt:

- i) Untersuchung der Umweltbelastung durch das Baustoffrecycling
- ii) Untersuchung zur Wiederverwendung (reuse) von Baustoffen ohne Aufbereitung durch Recycling
- iii) Untersuchung von Baustoffkreisläufen in anderen Kantonen der Schweiz und in anderen Industriestaaten
- iv) Literatur mehrheitlich ab dem Jahr 2010 zu Baustoffkreislauf

Zur Literatursuche wurden verschiedene Plattformen mit dem einheitlichen Suchbegriff: «LCA & Construction materials waste» verwendet, um Daten zu den Umweltauswirkungen des Baustoffrecyclings zu erheben. Auf der Plattform Google wurden am 09.03.2021 ungefähr 1'570'000 Treffer erzielt. Es wurde nur die erste Trefferseite verwendet. Für die Literaturstudie wurden die Publikationen 1, 2 und 5 verwendet (siehe Tabelle 6). Weiter wurde in der Wissenschaftsdatenbank «ScienceDirect» gesucht und am 09.03.2021 insgesamt 9'703 Treffer erzielt. Von dieser Seite stammen die Publikationen Nr. 3 und 4, wobei die ersten 3 Seiten der Ergebnisse durchgesehen wurden. Weitere Ergebnisse wurden durch die Seite «Google Scholar» am 11.03.2021 gefunden. Diese Suchanfrage lieferte 68'100 Ergebnisse. Es wurden die ersten 3 Seiten durchgesehen. Gefunden wurden die Publikationen Nr. 6 und 7. Für die Nummer 8 und 9 wurde die Suche durch das Wort «reuse» erweitert. Dies lieferte 4'183 Resultate auf der Plattform «ScienceDirect». Die erste Ergebnisseite wurde durchgesehen. Weiter wurde die Publikation Nr. 10 via Literaturverweis des Wikipedia Artikels «Recyclingbeton», auf der Internetseite der Hochschule für Technik in Rapperswil (UMTEC) am 15.03.2021 gefunden. Die Nr. 11 wurde durch eine Referenzangabe im ETH-Falldossier «Förderung von mineralischen Recyclingbaustoffen und Wiederverwendung in der Schweiz» (Kuster *u a.*, 2017) gefunden. Als letztes wurde die Nummer 12 als Referenz in (Knoeri, *u a.*, 2013) gefunden.

Massgebend für diese Untersuchung zu Baustoffrecyclingszenarien und Ökobilanzen waren die Publikationen von Holcim (2010), Kleijer *u. a.* (2017) und Knoeri *u. a.* (2013). Die Schweizer Studie von Rubli und Pohl (2019) ist die einzige Ökobilanz, welche die Trocken- mit der Nassaufbereitung von Baustoffschutt vergleicht.

3. Resultate und Diskussion

In diesem Kapitel sind die Resultate und Diskussion der Experteninterviews und Literaturrecherche beschrieben. Die Expertenaussage aus den Branchen: 'Recyclingbranche', 'Hoch- und Tiefbau', 'kantonale Ämter', 'Immobilien-gesellschaft mit Leuchtturmprojekt', 'Abbruch und Rückbau' und 'Forschung' sind im Text wie folgendes Beispiel der 'Recyclingbranche' referenziert: (Recycling, 2021).

3.1. Ausgangsmaterial

Die Ausgangsmaterialien für die Herstellung von RC-C und RC-M unterscheidet sich hinsichtlich Zusammensetzung, Form und Mengen:

Zusammensetzung: Zwei Haupteinflüsse auf die Zusammensetzung konnten abgeleitet werden: i) Alter der rückgebauten Gebäude und ii) dem geplanten Nutzen, wie Lagerhalle oder Wohnhaus. Bezüglich des Alters wurde festgestellt, dass wenn die rückgebauten Gebäude älter als 40 Jahre sind, fällt oft viel Mischabbruch an. Bei jüngeren Gebäuden fällt oft mehr Betonabbruch an. In der Recyclingbranche geben vier von sechs befragten Unternehmen an, bei der Verwendung von RC-Baustoffen hauptsächlich RC-C einzusetzen. Der effektive Anteil an R_b und R_c im RC-Beton ist nicht bekannt. Eines von sechs befragten Unternehmen setzt sowohl RC-C wie auch RC-M ein. Dies wird für die Magerbetonherstellung aufbereitet (Recycling, 2021). Eine befragte Firma aus Deutschland verarbeitet ausschliesslich Mischabbruch zu Schüttmaterial. Die gesetzlichen Rahmendigungen in Deutschland erlauben diese Verwendung. In der Schweiz ist dies nicht erlaubt.

Form: In dieser Studie wurde der Einsatz von loser und gebundener Form untersucht. Die Form beim Einsatz der Materialien kann je nach Projekt und Auftragslage stark variieren (Abbruch- und Rückbau, 2021). Die befragten Firmen setzen in ihren Betrieben zwischen 5 bis 60 Massen% an gebundenen Recyclingbaustoffen ein. Dieselben befragten Firmen setzen in ihren Betrieben zwischen 40 bis 90 Massen% lose Recyclingbaustoffe ein. Tendenziell scheint gegenwärtig das Recyclingmaterial mehr lose als gebunden eingesetzt zu werden. In der Abbildung 3 sind die Verwendungsmöglichkeiten in loser und gebundener Form dargestellt. Eine Risikoabschätzung des empfohlenen Einsatzes von losem und gebundenem Recyclingmaterial ist in Kapitel 3.7 Anwendungsbereiche beschrieben.

Verwendungsmöglichkeiten Recyclingbaustoffe	Einsatz in loser Form		Einsatz in gebundener Form	
	ohne Deckschicht	mit Deckschicht	hydraulisch gebunden	bituminös gebunden
Asphaltgranulat	*	* *		
Recycling-Kiessand P				
Recycling-Kiessand A				
Recycling-Kiessand B				
Betongranulat				
Mischabbruchgranulat				

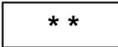
	Verwendung möglich
	Verwendung möglich mit der Einschränkung: als Planiematerial unter bituminöser Deckschicht
	Verwendung nicht zugelassen
	Verwendung nur möglich, wenn die Schichtstärke maximal 7cm beträgt und das Asphaltgranulat gewalzt wird

Abbildung 3: Verwendungsmöglichkeiten in loser und gebundener Form von Recyclingbaustoffen (BAFU, 2006).

Mengen: Die zu RC-Baustoffen verarbeiteten Mengen variieren je nach Grösse der Firmen zwischen 50 m³ bis 100'000 m³ pro Jahr (Recycling, 2021). Gemäss den Experten aus der Forschung (2021) und kantonaler Ämter (2021), bestätigt sich die hauptsächliche Verwendung von Betonabbruch. Der Betonabbruch ist reiner und kann einfacher aufbereitet werden als Mischabbruch (Forschung, 2021; kantonale Ämter, 2021). Der Mischabbruch hingegen enthält oft viele Verunreinigungen, welche den Einsatz in hochwertigem Beton erschweren (Recycling, 2021). Mischabbruch kann nicht mehr mit vertretbarem Aufwand zu den Ausgangsmaterialien wie Ziegel, Mörtel, Gips etc. aufgearbeitet werden (kantonale Ämter, 2021). Der Mischabbruch wird grösstenteils ins Ausland exportiert (kantonale Ämter, 2021). RC-M wird momentan in Magerbeton (Forschung, 2021) oder als Füll- und Schüttmaterial eingesetzt (Recycling, 2021).

Eine hochwertige Nutzung von hochqualitativem R_b und R_c für RC-Beton mit hohem Granulatanteil hilft den Baustoffkreislauf zu schliessen (kantonale Ämter, 2021). Dieser möglichst geschlossene Kreislauf sollte angestrebt werden, damit die Qualität der Baustoffe möglichst hochwertig bleibt.

Grundsätzlich ist es wichtig, sämtliche Materialflüsse und Qualitäten zu erfassen, um den zukünftigen Einsatz des RC-Baustoffs mit optimalem Nutzen zu definieren und in einen möglichst geschlossenen Kreislauf zurückzubringen (kantonale Ämter, 2021).

Europaweit ist das Recycling von Bauabfällen unterschiedlich weit entwickelt (siehe Abbildung 4). In Holland, Belgien und Dänemark werden bereits >80 Massen% recycelt. Die Recyclingquote in der Schweiz von Betonabbruch liegt bei 85 Massen% (Gauch u. a., 2016).

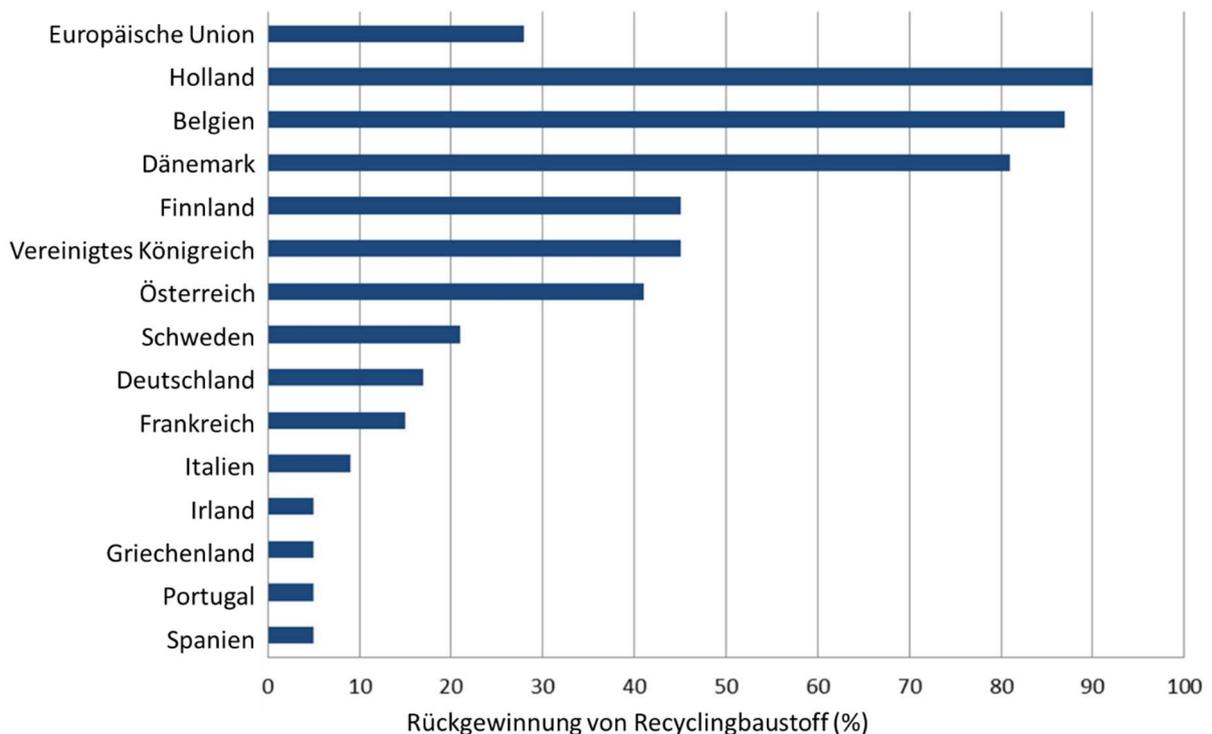


Abbildung 4: Rückgewinnung von Recyclingbaustoffen in Europa (angepasst von Mesa, Fúquene-Retamoso, & Maury-Ramírez, 2021)

Bei den hohen Recyclingraten wird momentan viel Material für den Strassenbau oder Füllmaterial verwendet, also down-gecycelt. Zudem fehlen in gewissen Regionen oft geeignete Marktnischen und klare gesetzliche Rahmenbedingungen, um insbesondere den RC-M zu etablieren. Es gibt aber auch verschiedene up-cycling Pionierprojekte im Nordwesten Europas, im schweizerischen Kanton Zürich und in der Region Basel.

In der Region Nord-West Europa wurde von 2017 bis 2020 in ein Forschungsprojekt «SeRaMCo» für vorgefertigte Betonprodukte aus 100 Massen-% recyceltem Material investiert. Die neuen Materialien wurden in drei Pilotprojekten eingesetzt:

- i) Parkour Park in Seraing Belgien für den Test von RC-Baustoff mit je 100 Massen-% Anteil RC-B und RC-M
- ii) Pavillon aus vorgefertigten Betonelementen in Pirmasens, Deutschland für den Test von RC-Baustoff mit 100 Massen-% Anteil RC-C
- iii) Mauer in einem Autobahnparkplatz in Thionville, Frankreich für den Test von RC-Baustoff mit 100 Massen-% Anteil RC-M (*SeRaMCo Technologies & Belgium, 2020; SeRaMCo, 2020*).

In Holland stellt die Firma StoneCycling qualitativ hochwertige RC-Baustoffe in unterschiedlichsten Farben her. Diese gehen von «hellem Nougat zu Black Pepper» (siehe Abbildung 5). 2016 baute StoneCycling ein Wohnhaus in Rotterdam aus 15t Recyclingbaustoffen. Heute baut StoneCycling weltweit (FG Entsorgungs- und Ressourcenmanagement, 2018; StoneCycling, 2021).

In Dänemark hat der Architekt Andres Lendager in seinem Unternehmen im Kopenhagener Hafen ein eigenes Materiallager als Quelle für u.a. die Verwendung von RC-Beton aufgebaut (ORF, 2020).

In Deutschland wurde im schwäbischen Winnenden in einer Wohnhaus-Siedlung für die Fundamente RC-Beton mit 100% RC-C gebaut (Bechmann, 2019).



Abbildung 5: Aus Recyclingbaustoffen wird innovativ up-cycled für den Hochbau von StoneCycling aus Holland (StoneCycling, 2021)

Im Kanton Zürich hat die Firma Richi AG in Weiningen (Richi AG Weiningen, 2018) ein Bürogebäude gebaut, dessen gesamte Tragkonstruktion aus RC-Beton mit einem RC-M Anteil von 75 Massen-% besteht. Ferner wird im Kanton Zürich RC-Beton seit vielen Jahren erfolgreich eingesetzt werden (kantonale Ämter, 2021).

In der Region Basel wurden zwei öffentliche Bauten mit RC-Beton erstellt. Eine private Arealüberbauung ist noch im Bau. Der 2018 eröffnete Campus der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) in Muttenz im Kanton Basel-Landschaft mit einem Anteil an RC-Beton von beinahe 60 %. Im Herbst 2021 wurde im Kanton Basel-Stadt der Neubau vom Amt für Umwelt und Energie mit einem Anteil von 74% RC-Beton eröffnet. In der Roche Arealentwicklung wurde in zwei Service- und Bürogebäuden bis zu 40% des Betonvolumens mit RC-Beton verbaut. In zwei weiteren Roche Gebäuden wurde für die Baugrubensohle RC-Beton mit RC-C aus dem RC- Beton des Vorgängergebäudes hergestellt (BS, 2021c). Eine Recycling- und Baufirma baut zudem eigene Immobilien, welche zu 100% aus RC-Beton bestehen. Sie setzen den RC-Beton dabei vom Keller bis zu den Decken ein (Recycling, 2021).

3.2. Technik

Die Aufbereitung von mineralischem RC-Baustoff erfolgt mit trocken- oder nasstechnischen Verfahren. Die Anlage für das trockentechnische Verfahren, in Kürze Trockenaufbereitung, besteht aus den folgenden Prozessen: Vorab- und Handsiebung, Brecher, Überbandmagnet und Windsicher (Rubli, Brupbacher und Rubli, 2017).. Die Trockenaufbereitung kann mobil und vor-Ort sein. Die Einsatzmöglichkeiten von trocken aufbereitetem RC-Beton sind eingeschränkt. Die Anlage für das nasstechnische Verfahren, in Kürze Nassaufbereitung, besteht aus den folgenden zusätzlichen Prozessen: Waschprozess, einem Wasseraufbereitungsprozess, einem Granulat - und Sandaufbereitungsprozess und einer Kammerfilterpresse (Rubli, Brupbacher und Rubli, 2017). Die Nassaufbereitung ist stationär. Die Einsatzmöglichkeiten von nass aufbereitetem RC-Beton sind breit.

Sechs befragte Unternehmen in der Schweiz und im angrenzenden Deutschland bereiten den Bauschutt selbst auf. Vier von diesen sechs machen dies mittels der Trockenaufbereitung. Eines der vier Unternehmen mit ausschliesslich Trockenaufbereitung wird zukünftig neben dem Trockenaufbereiten auch nass aufbereiten können. Zwei der sechs befragten Unternehmen verwenden bereits heute die Nassaufbereitung. Ein anderes Unternehmen macht sowohl Nass- als auch Trockenaufbereitung (Recycling, 2021). Die Trockenaufbereitung ist im Vergleich zur Nassaufbereitung, wegen der Wasserkreislaufführung und Schlammmentwässerung, einfacher umzusetzen.(Recycling, 2021). Mit der Nassaufbereitung können aber mehr Schadstoffe aus dem Bauschutt entfernt werden (Recycling, 2021), was sich vorteilhaft auf die Produktqualität und den Anwendungsbereich auswirkt. Ein weiterer Vorteil ist, dass bei der Produktion von RC-Beton mit RC-C derselbe Zementanteil wie für Beton mit Primärkies benötigt wird (Recycling, 2021). Möglich ist dies, weil die Schadstoffe aus dem Feinanteil (Sand) des gebrochenen Betons ausgewaschen werden und der saubere Feinanteil dem RC-Granulat wieder zugemischt wird (Recycling, 2021; Kantonales Hochbauamt Thurgau, 2021).

Im Kanton Zürich, welcher in Bezug auf das Baustoffrecycling in der Schweiz führend ist, werden sowohl die Nass- wie auch die Trockenaufbereitung erfolgreich eingesetzt (kantonale Ämter, 2021). Die Aussagen der Forschung bestätigt diese Entwicklung und sieht sowohl die Nass- wie auch die Trockenaufbereitung als zielführend an (Forschung, 2021). Gerade beim Betonabbruch, welcher oft qualitativ hochwertig ist, ist eine Nassaufbereitung nicht zwingend notwendig (Recycling, 2021). Gemäss zwei Experten aus unterschiedlichen Branchen (kantonale Ämter und Recycling, 2021) lässt sich mit der Nassaufbereitung ein hochwertiges, aber teureres Produkt herstellen (kantonale Ämter, 2021; Recycling, 2021). Aus Sicht der Forschung kann die Nassaufbereitung zur Entfernung von Gips und zur Schadstoffentfrachtung sinnvoll sein (Forschung, 2021). Gips gilt für die Herstellung von RC-Baustoffen als Störstoff, wegen dessen geringer Kornfestigkeit und geringerem Widerstand gegen Frost- und Tau-Wechsel (Müller, 2016). Die Nassaufbereitung ist zur Entfernung von Gips⁵ gut geeignet (Energie- und Ressourcen-Management GmbH, 2020).

Diese Aussagen verdeutlichen, dass die Aufbereitungsverfahren sowohl Vor- wie auch Nachteile haben und entsprechend dem anfallenden Recyclingmaterial, der Nachfrage und den finanziellen Rahmenbedingungen zum Einsatz gelangen. Zentral ist, dass das RC-C und RC-M umweltschutzbedingten und bautechnischen Qualitätsanforderungen erfüllen.

3.3. Kosten

Die Kosten der Aufbereitung sind von der Branche, Unternehmensgrösse und Region abhängig. Gemäss Aussagen der grösseren Aufbereiter, Betonhersteller und Baufirmen, ist die Aufbereitung von Recyclingmaterial zwischen 10% bis 100% teurer als bei Verwendung von Primärmaterial (Hoch- und Tiefbau, 2021; Recycling, 2021). Die Höhe der Einnahmen durch die Annahme von Bauschutt fürs Recycling entscheidet oft, ob konkurrenzfähiges RC-C und RC-M produziert werden kann. Die Annahmegebühr muss tiefer sein, als die Deponierungskosten für Bauschutt und hängt von diesen ab⁶. Gemäss einer Firma ist die Herstellung von RC-Granulaten in hoher Qualität bis zu dreifach teurer als die Kosten für Primärkies (Recycling, 2021). Die Hauptgründe dafür umfassen billige Kiesimporte aus dem nahen Elsass und die tendenziell längeren Transportdistanzen zu stationären Anlagen. Kleinere Unternehmen geben die Kosten der Herstellung von RC-Granulaten mit gleich oder sogar einem Drittel tiefer als für Primärgranulate an (Hoch- und Tiefbau, 2021; Branche: Recycling, 2021). Ein Grund scheint die lokale Verarbeitung auf der Baustelle und somit die nichtaufkommenden Transportkosten zu sein. Dies wird durch den Fokus auf die Regionalität und kurze Transportwege der kleinen Unternehmen untermauert (Recycling, 2021).

Bezüglich der Technologie gibt es zwischen der Trocken- und Nassaufbereitung deutliche Unterschiede. Den qualitativen Vorteilen der Nassaufbereitung stehen jedoch finanzielle Kosten gegenüber. Die Mehrkosten gegenüber der Aufbereitung von Primärkies betragen ca. 70 %. Die Kosten für Mischgranulat sind gegenüber Primärkies ca. 110 % höher (Hengevoss, 2010). Die aufwändigere Nassaufbereitung führt einerseits zu höheren Kosten, ermöglicht aber höherwertige Anwendungen und einen höheren RC Granulat Anteil in der Betonherstellung.

⁵ Die Rückgewinnung von Gips könnte in Zukunft an Bedeutung gewinnen, da die natürlichen Vorkommen beschränkt sind und Gips aus Kohlekraftwerken an Bedeutung verlieren wird (BR, 2021).

⁶ Der Zusammenhang von Deponierungskosten und Recyclingkosten könnte Bestandteil einer separaten Untersuchung sein.

Gemäss einer Immobiliengesellschaft mit einem Leuchtturmprojekt im Kanton Zürich, führte die Verwendung von RC-Beton zu einer Erhöhung der Gesamtkosten von +0.5% (Leuchtturmprojekt, 2021). Im Kanton Zürich sind heute nach der Etablierung von RC-C und RC-M die Kosten in etwa gleich hoch wie für Primärmaterial. Um konkurrenzfähige Produkte aus von RC-Baustoffen zu entwickeln (kantonale Ämter, 2021), zeichneten sich zwei Hauptgründe ab. Erstens wurde die Verwendung von RC-Baustoffen kantonale gefördert. Zweitens liegt der Kanton Zürich weiter entfernt von den günstigen Kiesabbaugebieten im Elsass als die Region Basel und somit sind die Transportkosten im Kanton Zürich höher.

In der Region Nordwestschweiz sind bis anhin die Deponierungskosten tief (Nittnaus, 2022). Der Kiesimport aus dem nahen Elsass ist billig (Recycling, 2021). Zudem ist die Recyclingbaustoffherstellung technisch aufwändiger als die Baustoffherstellung aus Primärmaterial. Aus diesen Gründen wird der teurere Recyclingbaustoffe, Betonabbruch und vor allem Mischabbruch oft nicht eingesetzt. Um die RC-Baustoffe konkurrenzfähig zu machen, wäre es deshalb wichtig, die Nachfrage, respektive den Absatz, dieser Produkte durch passende Rahmenbedingungen und Anreize zu erhöhen.

Massnahmen zum Erreichen dieses Ziels von regionalem und konkurrenzfähigem RC-C und RC-M sind im «Massnahmenpaket zur Förderung des Baustoffkreislaufs Regio Basel» enthalten. Darin ist die Selbstverpflichtung für den Einsatz von RC-Baustoffen bei Projekten des Kantons Basel-Landschaft festgehalten. Diese Selbstverpflichtung wurde im Jahr 2021 beschlossen. Diese beinhaltet auch Verpflichtungen für den Hochbau. Im Kanton Basel-Stadt wird eine solche Selbstverpflichtung ebenfalls umgesetzt (BS, 2021b). Durch diese Massnahmen wird der Absatz der RC-Baustoffe in der Region erhöht und die Preise können im Vergleich zum Primärmaterial wettbewerbsfähiger werden. Um zusätzlich wettbewerbsfähiger zu werden, könnten die Deponiepreise reguliert werden. Ein weiterer Vorteil der Recyclingbaustoffe ist die Regionalität der Produkte. Durch dies können weite Transportwege und somit auch Kosten und Umweltauswirkungen eingespart werden.

3.4. Schadstoffbelastung

Beton- und Mischabbruch können Schadstoffe enthalten. Vor dem eigentlichen Rückbau von Bauwerken werden Schadstoffe wie Asbest und polychlorierte Biphenyle (PCB) bei der Entkernung entfernt und entsorgt (Abbruch- und Rückbau, 2021). Jedoch können nach der Entkernung in Beton- und Mauerkonstruktionen gebundene Schadstoffe zurückbleiben. Diese Schadstoffe sind schwerlöslich. Nach der Mahlung von Beton- und Mauerkonstruktionen sind diese Schadstoffe in der Feinfraktion ungebunden und somit leichter löslich (Forschung, 2021).

Gemäss allen sechs untersuchten Unternehmen der Recyclingbranche ist der am häufigsten vorkommende Schadstoff in den RC-Baustoffen das Chrom VI. Chrom VI komme praktisch in jedem RC-Baustoff vor (Forschung, 2021; Recycling, 2021), dies weil das natürlich vorkommende Chrom III bei der Klinkerherstellung zu Chrom VI oxidiert wird (Cemsuisse, 2018; KRONOS, 2019). Danach ist das Chrom VI im Beton gebunden (Forschung, 2021; Recycling, 2021). Weitere genannte Schadstoffe umfassen die Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK). Diese kommen ebenfalls im Betonabbruch, aber auch in anderen Bauabfällen, wie zum Beispiel Kork, vor (Abbruch- und Rückbau, 2021; Recycling, 2021).

Die Entfernung allfälliger Schadstoffe aus dem Beton- und Mischabbruch ist zentral für die Herstellung eines qualitativ hochwertigen Recyclingprodukts (Recycling, 2021). Auswaschen hilft

am effektivsten eine Akkumulation von Schadstoffen im Baustoffkreislauf zu verhindern. Zink-, Chrom-, Cadmium- und Kupferkonzentrationen z.B. in Mischabbruch lassen sich mit der Trocken- und Nassaufbereitung so weit reduzieren, dass die Grenzwerte für Mischgranulat eingehalten werden können. Für die Entfernung von Blei und organischer Schadstoffe (aliphatische Kohlenwasserstoffe, PAK oder Benzo(a)pyrene) hat sich die Nassaufbereitung als effektiver erwiesen. Dennoch können auch mit der Nassaufbereitung diese Schadstoffe nicht immer ausreichend entfernt werden. (Energie- und Ressourcen-Management GmbH, 2020).

Eine niedrige Schadstoffbelastung muss durch gezielte Kontrollen der Schadstoffgehalte im Beton- und Mischgranulat, aber auch bei allen in der Baubranche verwendeten Rohstoffe sichergestellt werden, damit RC-Baustoffe langfristig auf qualitativ hohem Niveau im Kreislauf eingesetzt werden können.

3.5. Trennung

Die Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA) verlangt für Rückbau die Sortierung der Bauabfälle vor Ort, sofern dies betrieblich möglich ist. Man spricht auch vom Mehrmuldenkonzept⁷. Die Trennung der Materialien erfolgt gemäss 11 der 15 befragten Experten vor Ort, d.h. auf der Baustelle (Abbruch- und Rückbau, 2021; Recycling, 2021). Zwei Unternehmen aus der Recyclingbranche sortieren auf dem eigenen Recycling-Gelände und ein Recyclingspezialist nimmt sowohl sortierte, wie auch unsortierte Mulden an (Recycling, 2021). Die angelieferten Bauabfälle werden möglichst sortenrein getrennt. Gemäss eines Branchenteilnehmers lässt sich das Mehrmuldenkonzept in der Praxis jedoch teilweise nur schwer umsetzen. Gründe dafür sind meist Platzprobleme auf der Baustelle oder die anfallenden Baustoffe, wie schwertrennbare Verbundwerkstoffe (Abbruch- und Rückbau, 2021; Recycling, 2021). Um die Thematik zu den schwer trennbaren Verbundwerkstoffen anzugehen, sollten Gebäude gezielt rückgebaut und nicht abgebrochen werden. Durch einen Abbruch⁸ entsteht ein Gemisch von Stoffen, welche sich nur schwer wieder trennen lassen. Beim gezielten Rückbau⁹ ist eine sortenreine Trennung einfacher möglich (Recycling, 2021). Die Einführung einer entsprechenden Bewilligung ist im «Massnahmenpaket zur Förderung des Baustoffkreislaufs Regio Basel» enthalten. Bisher war im Kanton Basel-Landschaft eine Bewilligung nur für den Rückbau von Bauten und Bauteilen in der Kernzone¹⁰ erforderlich. Jedoch besteht keine generelle Bewilligungspflicht für Rückbauten. Der Kanton Basel-Stadt setzt diese anhand von der Kontrolle

⁷ **Mehrmuldenkonzept:** «Durch die systematische Trennung der Bauabfälle direkt auf der Baustelle können Wertstoffe getrennt erfasst und der Verwertung zugeführt werden. Das Mehrmuldenkonzept basiert auf vier Muldentypen und bildet die Basis für eine umfassende Abfalltrennung auf der Baustelle.» (Kanton Basel-Landschaft, 2021) Dabei werden folgende Mulden (M1-M4) unterschieden: M1: Einzelstoff-Mulde (sortenreine Erfassung von beispielsweise Aushub, Betonabbruch, Metall, Gips, Ziegelsteine, Grüngut etc.); M2: Mischabbruch (mineralische Fraktion); M3: Brennbares Material; M4: Bausperrgut (unsortierte Bauabfälle) (Kanton Basel-Landschaft, 2021).

⁸ **Abbruch:** Beim Abbruch erfolgt ein schneller Abriss des Gebäudes. Das Gebäude wird als Ganzes abgebrochen. Eine entsorgungsgerechte Trennung der Bauabfälle ist nicht oder nur schwer möglich (Eigene Beschreibung).

⁹ **Rückbau:** «Demontage- und Abbruchtechnik, die darauf ausgerichtet ist, die anfallenden Bauabfälle bereits auf der Baustelle entsorgungsgerecht zu trennen und wenn möglich einer Verwertung zuzuführen» (BAFU, 2006).

¹⁰ **Kernzone:** «Die Kernzone umfasst architektonisch und städtebaulich wertvolle Ortskerne, die in ihrem Charakter erhalten oder saniert, sowie kerngerecht baulich weiterentwickelt werden sollen» (Kanton Basel-Landschaft, 2005).

von Rückbaukonzepten um und ist aktiv im Bereich von Baustellenkontrollen (Regierungsrat Kanton Basel-Landschaft, 2021). Ein Unternehmen der Recyclingbranche würde die Einführung einer generellen Bewilligung für Rückbauten im Kanton Basel-Landschaft begrüßen (Recycling, 2021; Zimmermann *u. a.*, 2020), denn nur so sei eine Verbesserung möglich (Recycling, 2021).

3.6. Betoneigenschaften

Die Eigenschaften von RC-Beton sind unterschiedlich. Dazu gilt es zwischen den Eigenschaften von RC-Beton aus Betonabbruch und aus Mischabbruch zu unterscheiden.

RC-Beton mit einem Betongranulat Anteil von 30-40 Massen-% eignet sich für fast alle Anwendungen (Recycling, 2021). Dies bestätigen verschiedene Hersteller von Recyclingmaterial. Zum Massenanteil von Betongranulat im RC-Beton ist eine schweizweite Studie geplant. Die Studienresultate sollen anschliessend in die SIA 2030 Richtlinie einfließen.

Der RC-Beton hat eine ähnliche Druckfestigkeit wie Primärbeton. Auch das Elastizitätsmodul (E-Modul)¹¹ vom RC-Beton ist so gut wie Primärbeton, oder leicht niedriger wegen der noch vorhandenen Zementmenge im RC-Granulat (kantonale Ämter, 2021; Recycling, 2021). Folglich kann heutzutage RC-C für die meisten Betonarten eingesetzt werden. Anwendung findet der RC-C heute vor allem im Hochbau.

RC-M enthält oft mehr Störstoffe, wie Ton, welche eine Herausforderung für die Kontrolle des Wasserhaushaltes darstellen. Der Tonanteil zieht Wasser, was einen Einfluss auf den W/Z-Wert¹² im Beton hat. Deshalb ist es schwieriger RC-M von hoher Qualität zu produzieren. Die Herausforderungen bei vorhandenem Gips bezüglich des geringen Widerstands gegen Frost- und Tau-Wechsel wurden bereits erwähnt. Ein Befragter gibt an, dass aus RC-M kein Konstruktionsbeton gemacht werden könne (Recycling, 2021). Zwei Befragte hingegen geben an, dass mit einem erhöhten Anteil an Armierungseisen auch RC-M als Konstruktionsbeton eingesetzt werden kann. Um Mischgranulat für Konstruktionsbeton einzusetzen, bedarf dies einer höheren Zementzugabe von 10-15kg pro m³ RC-Beton (Recycling, 2021). Damit kann ein zu tiefer E-Modulwert verhindert werden. Jedoch verursacht diese Zementzugabe einen erhöhten Treibhausgasausstoss (mehr dazu im Kapitel 3.9).

3.7. Anwendungsbereiche

Nachfolgend wird vor allem auf den möglichen Einsatz von RC-M eingegangen. Alle Befragten geben an, dass RC-M gut für die Produktion von Magerbeton eingesetzt werden kann (Hoch- und Tiefbau, 2021; kantonale Ämter, 2021; Leuchtturmprojekt, 2021; Recycling, 2021). Die Befragten der Forschung gaben zudem an, dass RC-M hauptsächlich für Magerbeton verwendet wird (Forschung, 2021). Fünf der Befragten gaben an, RC-M auch in Konstruktionsbeton zu verwenden oder dies anzustreben (Hoch- und Tiefbau, 2021; Recycling, 2021).

Positive projektbezogene Erfahrungen gibt es aus dem Städtebau, wo RC-M vermehrt für Beton im Wohnungsbau verwendet wird (Beispiele siehe Kapitel Ausgangsmaterial 3.1) Wichtig dabei ist, dass der RC-Beton an witterungsgeschützten Orten innerhalb des Fassadenbereichs und in

¹¹ **Elastizitätsmodul (E-Modul):** «Das E-Modul eines Materials entspricht dem Verhältnis von Spannung zu Verformung. Je höher der E-Modul ist, umso mehr Kraft ist zur Verformung des Materials notwendig. Das E-Modul hat folgende Baupraktische Bedeutung: Ein hohes E-Modul ist z.B. bei biege- oder druckbeanspruchten Bauteilen (Platten, Balken, Stützen) für die Begrenzung der Verformung von Vorteil» (Holcim, 2021).

¹² **Wasserzementwert (W/Z-Wert):** «Verhältnis der Gewichtsanteile von Wasser zu Zement» (Kuster, *u a.*, 2017).

Bereichen ohne grosse Spannung verwendet wird (kantonale Ämter, 2021). Der RC-M ist wegen der Karbonatisierung¹³ weniger witterungsbeständig und anfälliger für Korrosionsschäden (kantonale Ämter, 2021; Rubli, 2021). Eine befragte Firma aus Deutschland arbeitet mit Mischabbruch und setzt diesen vor allem als Füll- und Schüttmaterial ein. Die Qualität der RC-Baustoffe wird dabei durch strenge interne Schadstoffkontrollen gewährleistet (Recycling, 2021). Der Mischabbruch wird teilweise als Wegbefestigung verwendet, was in der Schweiz nicht erlaubt ist.

Geregelt sind die Anwendungen in der Schweiz im Merkblatt SIA-2030 (mehr dazu im Unterkapitel 1.2). Das Merkblatt ist jedoch nicht auf dem neusten Stand und befindet sich seit einiger Zeit in Überarbeitung (Forschung, 2021; kantonale Ämter, 2021). Weiter ist es ein Wunsch von verschiedenen Befragten und unterschiedlichen Branchen, dass RC-Beton nur dort eingesetzt wird, wo es sinnvoll ist und nicht versucht wird, ihn für jede Anwendung zu nutzen (Forschung, 2021; kantonale Ämter, 2021; Recycling, 2021).

Um das Risiko in der Anwendung systematisch zu beurteilen, wurde eine Risikobeurteilung (Risiko = Schaden x Eintretenswahrscheinlichkeit) von verschiedenen Verwertungsoptionen erarbeitet (Energie- und Ressourcen-Management GmbH, 2020). Zur Beurteilung von «Schaden» und der «Eintretenswahrscheinlichkeit» wurden verschiedene Klassen erstellt. Die vier Schadenklassen sind in Tabelle 4 aufgelistet. Die vier Eintretenswahrscheinlichkeit sind in Tabelle 5 aufgelistet.

¹³ **Karbonatisierung:** «Karbonatisierung ist eine chemische Reaktion im Beton, die zur Abnahme der Alkalität des Betons im äußeren Bereich von Betonbauteilen führt.» Folgen: «i) Korrosionsschützende Eigenschaft des Betons geht verloren. ii) Der Bewehrungsstahl kann oberflächlich anfangen zu rosten. iii) Es kommt zu Absprengungen der Betonüberdeckung» (Pauli, 2021).

Tabelle 4: Definition und qualitative Beschreibung der Schadenklassen (angepasst von Energie- und Ressourcen-Management GmbH, 2020).

Schadenklasse	Potenzial Auswaschung organische und anorganische Schadstoffe in der Anwendung	Qualität von Mischgranulat (MAG) kann Endprodukt beeinträchtigen	Möglicher Reputationsschaden
sehr gering	Sehr geringe Mobilität der Schadstoffe in der Anwendung	Minimale Beeinträchtigung des Endprodukts	vernachlässigbar
gering	Geringe Mobilität der Schadstoffe in der Anwendung	Kleine Beeinträchtigung des Endprodukts möglich	situationsbedingt möglich
mittel	Auswaschung von Schadstoffen möglich und abhängig von der Qualität der Aufbereitung	Beeinträchtigung des Endprodukts möglich	wahrscheinlich
hoch	Auswaschung von Schadstoffen in der Anwendung wahrscheinlich	Beeinträchtigung des Endprodukts wahrscheinlich	gross und deshalb kaum marktfähig

Tabelle 5: Definition und qualitative Beschreibung der Eintretenswahrscheinlichkeit (angepasst von Energie- und Ressourcen-Management GmbH, 2020).

Eintretenswahrscheinlichkeit	Schätzung für die Zukunft in der Anwendung	Schätzung für die Zukunft in der Anwendung	Möglicher Reputationsschaden
sehr gering	Sehr langfristig kaum Auswaschung von Schadstoffen	Es ist auf langfristiger Basis mit sehr wenigen Vorfällen mit negativen Konsequenzen zu rechnen	Kein Reputationsschaden zu erwarten
gering	Langfristig kaum Auswaschung von Schadstoffen	Es sind mittelfristig wenige Vorfällen mit negativen Konsequenzen möglich	Reputationsschäden sind geringfügig und auf Projektbasis möglich
mittel	Mittelfristig kaum Auswaschung von Schadstoffen	Kurz- bis mittelfristig sind Vorfälle mit negativen Konsequenzen möglich	Reputationsschäden sind auf Projektbasis möglich
hoch	kurzfristig Auswaschung von Schadstoffen möglich	Vorfälle mit negativen Konsequenzen sind wahrscheinlich	Reputationsschäden sind auf Projekt- und Branchenebene zu erwarten

In den hell- und dunkelgrünen Feldern sind die Einsatzgebiete für Mischgranulate (MAG) dargestellt, welche ein «sehr geringes», bzw. «geringes» Risiko aufweisen. Die Nassaufbereitung (NA) schneidet grundsätzlich besser ab als die Trockenaufbereitung (TA), wegen des Auswaschens der Schadstoffe beim Nassaufbereitung. Am besten schneiden die meisten gebundenen Anwendungen, sowie die Mischgranulate aus der Nassaufbereitung für den losen Einsatz unter einer Deckschicht ab. Die gelben Felder zeigen «mittleres» Risiko und die orangen Felder die «hohen» Risiken (Energie- und Ressourcen-Management GmbH, 2020).

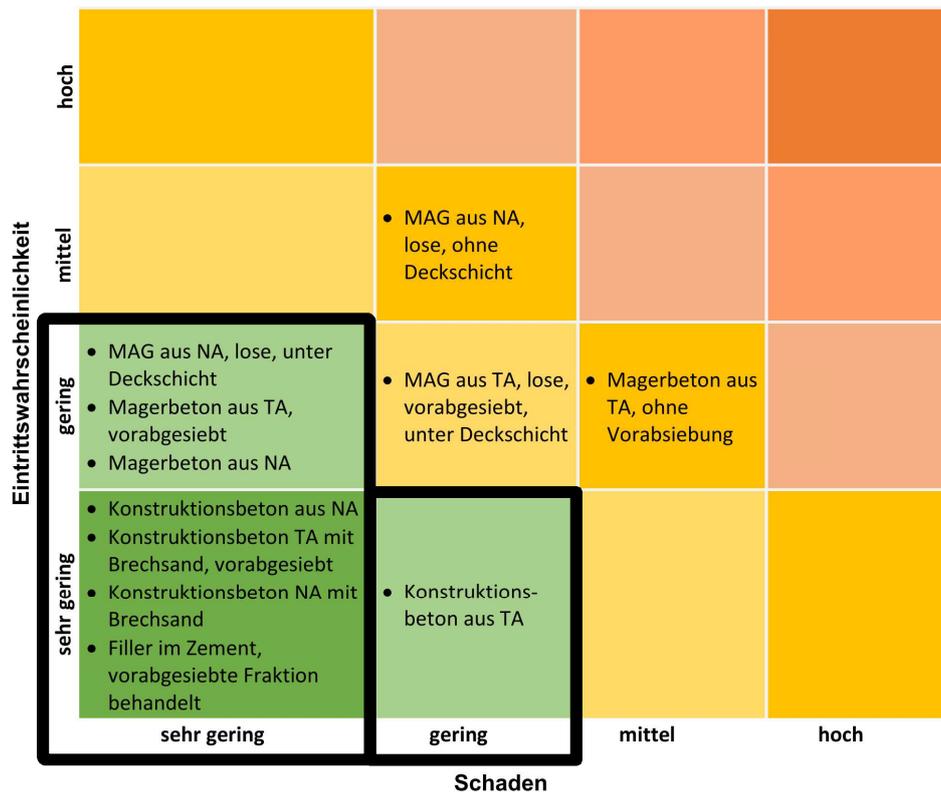


Abbildung 6: Risikomatrix zum Einsatz von Mischabbruchgranulaten (MAG) in unterschiedlichen Anwendungen. Das Risikoakzeptanzniveau wurde schwarz umrandet. TA: Trockenaufbereitung. NA: Nassaufbereitung (angepasst von Energie- und Ressourcen-Management GmbH, 2020).

3.8. Vertrauen

Das Vertrauen in die Qualität, die Anwendungsmöglichkeiten und Eigenschaften der RC-Baustoffe trägt wesentlich zu dessen Erfolg bei. Dazu wurde das Vertrauen im Jahr 2016 mit dem Vertrauen vom Jahr 2021 verglichen. Die Beurteilung erfolgt mittels einer Skala von 1 (tief) bis 10 (hoch).

In der Abbildung 7 sind die Resultate des geäußerten Vertrauens in RC-Baustoffe dargestellt. Der obere Balken (hellblau) der Grafik zeigt jeweils das Vertrauen im Jahr 2016 und der untere Balken (dunkelblau) das Vertrauen vom Jahr 2021. Die Balkenlänge bezieht sich auf die Durchschnittswerte innerhalb einer Branche. Das Vertrauen hängt von der Branche ab und war im Jahr 2016 unterschiedlicher ausgeprägt als im Jahr 2021 (siehe Abbildung 7). In allen befragten Branchen ist das Vertrauen gewachsen, oder auf hohem Niveau konstant geblieben.

Am tiefsten war das Vertrauen in der Forschung (2.5), gefolgt von den Bauingenieuren (3.5). Am höchsten war und ist das Vertrauen bei den Architekten (9). Die Bauingenieure haben auch heute noch ein tiefes Vertrauen (4) in die RC-Baustoffe. Hingegen ist in der Forschung das Vertrauen um 4 Punkte auf 6.5 am stärksten gewachsen. Vermutlich haben die in den letzten Jahren gewonnenen Forschungsergebnisse zu deutlichen Vertrauensgewinnen geführt. Im Bereich Forschung wurde mit einem Experten das Vertrauen überprüft, wodurch dieses Resultat mit einer gewissen Unsicherheit behaftet ist. Ebenfalls stark gewachsen ist das Vertrauen in der Recyclingbranche, von 5 auf 8.25 Punkte, sowie bei den Bauherren von 6.1 auf 9 Punkte. Somit haben die Bauherren und die Architekten das grösste Vertrauen in die RC-Baustoffe. Um vertiefte Gründe für die Veränderungen anzugeben, wäre eine detailliertere Untersuchung notwendig.

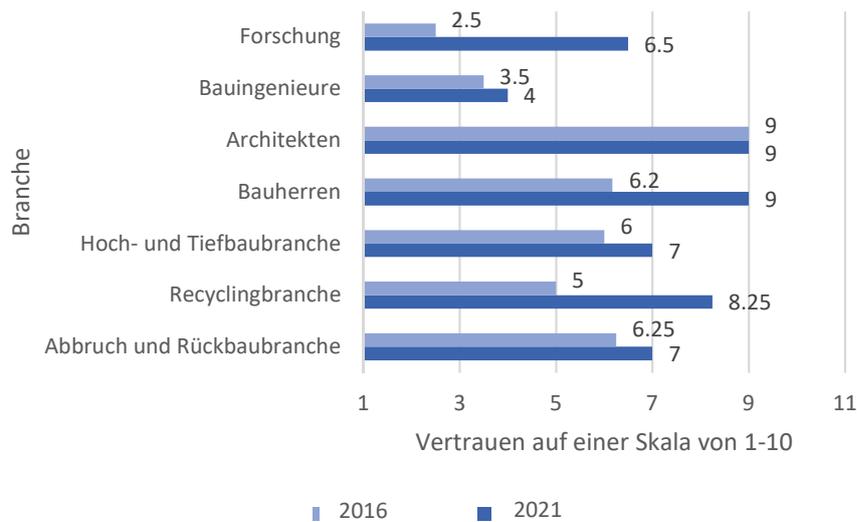


Abbildung 7: Resultate des Vertrauens im Jahr 2016 und im Jahr 2021 bei der Verwendung von RC-Baustoffen in unterschiedlichen Branchen (1 ist tief und 10 ist hoch).

Auf einem tieferen Niveau mit 4 Punkten, ist das Vertrauen der Bauingenieure in die RC-Baustoffe. Das tiefe Vertrauen lässt sich zum Teil durch die Vergangenheit erklären, wo vor allem nicht normierte RC-Baustoffe zur Reduktion des Abfallvolumens auf der Baustelle eingesetzt wurden (Recycling, 2021). Eine Normierung der RC-Baustoffe ist gemäss Vertretenden der Recyclingbranche wichtig, damit das Vertrauen in die RC-Produkte steigt. Gründe für den Anstieg des Vertrauens sind die gewonnenen Erkenntnisse, die positiven Erfahrungen, die Aufklärungsarbeit und das gezielte Lobbying (Recycling, 2021). Mittlerweile gibt es viele Referenzen, welche den erfolgreichen Einsatz von Recyclingbaustoffen belegen und so einen weiteren positiven Effekt auf das Image der RC-Baustoffe haben (mehr dazu im Kapitel 3.1). Ein grosses Vertrauen in die RC-Baustoffe ist für einen langfristigen Einsatz zentral, da nur solche Materialien eingesetzt werden.

Ein vertieftes Verständnis des Vertrauens wäre für den erfolgreichen und erhöhten Einsatz von RC-Beton wichtig. Dabei ist eine Differenzierung des Vertrauens und der Akzeptanz in Bezug auf die unterschiedlichen RC-Baustoffe wie RC-B und RC-M anzustreben. Durch dies würden spezifischere Daten zum Vertrauen in die verschiedenen RC-Baustoffe zur Verfügung stehen, was eine gezielte Förderung des Vertrauens in Bezug auf einzelne RC-Baustoffe ermöglichen würde.

3.9. Ökobilanzen zum Recycling von Beton- und Mischabbruch

Durch die in Kapitel 2 beschriebenen Kriterien, konnten zwölf Publikationen für einen Vergleich identifiziert werden (Zusammenfassungen der Publikationen, siehe Anhang 5.4). Die Ergebnisse der Literaturstudie sind in Tabelle 6 dargestellt.

Die Ergebnisse der Umweltbelastung in den Ökobilanzen können aufgrund von regionalen oder firmenspezifischen Gegebenheiten deutlich variieren (Kleijer *u. a.*, 2017). Aus diesem Grund wurde in der Literatursuche der Fokus auf Publikationen aus der Schweiz gelegt (siehe Kategorie 'Region' in Tabelle 6). Diese Literatur diente zudem als wichtige Orientierungshilfe für das Zusammenstellen der gängigen Aufbereitungspraxen und der Schadstoffbelastungen.

Es wurden folgende vier Kategorien bei der Analyse der Literatur verwendet und grundlegende Erkenntnisse erlangt:

Kategorie ‘Ziel der Publikationen’: Es wurden RC-Baustoffe mit Primärmaterial verglichen. Dabei sind Ökobilanzen für rezyklierte Gesteinskörner bis zur Wiederverwertung enthalten. Zudem wird das Down-Cycling versus das Recycling zum ursprünglichen Produkt untersucht.

Kategorie ‘Gängige Aufbereitungspraxis’: In fünf Studien wurde jeweils die Nass- oder Trockenaufbereitung untersucht. In zwei Studien wurde das Aufbereitungsverfahren nicht spezifiziert. Bei der einen Studie war der Fokus auf den Managementoptionen für das Abfallmanagement und bei der zweiten Studie war der Fokus auf den Umweltauswirkungen. In zwei Studien wurde der Einfluss von unterschiedlichen Fraktionsgrößen untersucht.

Kategorie ‘Recycling-Anteil und Schadstoffbelastung’: In einer Studie war der Recycling-Anteil 15% als Magerbeton. In den anderen Studien wurde der Konstruktionsbeton mit folgenden Massen-% untersucht: in fünf Studien mit 25%, in zwei Studien mit 40% und in drei Studien mit 100%. Eine Reduktion der Schadstoffbelastung von Recyclingprodukten kann die gesamten Umweltauswirkungen deutlich verringern (Di Maria, Eyckmans und Van Acker, 2018). Insbesondere zentral sind die Entfernung der Schadstoffe: Asbest, Blei-basierte Farben, Phenole, PCBs und PAHs, z.B. durch die Nassaufbereitung und das fachgerechte Entsorgen des Waschwassers.

Kategorie ‘Einzigartigkeit’: Die Studien von Häfliger *u. a.* (2017) und von der EC IES (2011) erhaltenen Hilfestellungen zum Erstellen von Ökobilanzen. Die Studien von Kleijer *u. a.* (2017), Knoeri *u. a.* (2013), sowie von Hossain *u. a.* (2016) enthalten übersichtliche Prozess- und Materialflussdiagramme, welche die relevanten Prozesse für die Herstellung von Beton aus Primär- oder Recyclingmaterial passend veranschaulichen. Knoeri *u. a.* (2013) folgerte zudem, dass der Zementanteil in Recyclingbaustoffen maximal 10% höher sein solle, als die verwendete Menge an Zement des konventionellen Betons. Ein weiterer Umweltvorteil ist die Verwendung von Nebenprodukten der Baustoffaufbereitung, wie beispielsweise das Altmetall im Bauschutt (Knoeri, *u. a.*, 2013).

In den beiden Veröffentlichungen von De Wolf *u. a.* (2020) und von Xia *u. a.* (2020) wurde die Wiederverwendung von Baustoffabfällen behandelt. Weiter enthält der Bericht von Holcim (2010) viele Daten und Prozesse, welche auf die Schweizer Gegebenheiten angepasst sind.

Tabelle 6: Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse der Literaturstudie zum Thema Recyclingbaustoffe und Ökobilanz.

Nr.	Referenz	Region	Ziel der Publikationen	Gängige Aufbereitungspraxis	Recycling-Anteil und Schadstoffbelastung	Einzigartigkeit
1.	(Zanni u. a., 2018)	Italien	Vergleich verschiedener Strategien von Baustoffrecycling für die Stadt Bologna	Vergleich Betonherstellung aus Recyclingmaterial (Trockenaufbereitung) und Primärmaterial	25% Anteil an Recycling Material mit wenig Zement-Ersatz (wegen grossen Umweltauswirkungen vom Zement)	Vergleich verschiedener Rezepturen für Recyclingbetonmischungen. Vergleich von verschiedenen Managementoption für das Abfallmanagement.
2.	(Butera u. a., 2015)	Dänemark	Vergleich von zwei Szenarien für die Verwendung von Bauschutt	Nassaufbereitung für die Verwendung als Strassenfüllmaterial im Vergleich zur Deponierung	Beton und Mauerwerk, welches mit der Nassaufbereitung gereinigt wurde. Die Entsorgung des Washwassers mit den aufkonzentrierten Schadstoffen ist wichtig für eine niedrige Umweltbelastung.	Studie legt einen Fokus auf die toxikologischen Auswirkungen des Baustoffrecyclings wie z.B. Auswaschung.
3.	(Häfliger u. a., 2017)	Schweiz	Aufzeigen der Sensitivität der Umweltauswirkungen von Gebäuden in Bezug auf die Auswahl der Baumaterialien in der Ökobilanz-Modellierung	Vergleich von Produkten basierend auf Zement und Gips.	Einfluss der möglichst reinen Materialien. Keine genaueren Angaben.	Liefert sensitive Aspekte bezüglich des Erstellens von Ökobilanzen im Bereich des Baustoffrecyclings.
4.	(Hossain u. a., 2016)	Hongkong	Ökobilanz als vergleichende Umweltbewertung der Zuschlagstoffproduktion aus recycelten Abfällen und Material aus primären Quellen	Vergleich von Trockenaufbereitung in folgende zwei Fraktionen: <5mm feine Zuschlagstoffe; 5-20mm grobe Zuschlagstoffe	Hoher Recycling-Anteil und gute Qualität fürs Recycling gemäss lokalen Richtlinien in Hongkong. Keine genaueren Angaben.	Enthält übersichtliche Prozessflussbilder für die Veranschaulichung der Prozesse, zur Herstellung von Primärbaustoffen und Recyclingbaustoffen.
5.	(EC IES, 2011)	Europa	Richtlinie und Leitfaden für Life Cycle Thinking und Life Cycle Assessment, in Bezug auf Baustoffabfälle	Vergleich von hauptsächlich Trockenaufbereitung und teilweise auch Nassaufbereitung. Das Letztere wird nach dem Transportdistanz als wichtigster Einfluss bezüglich der Umweltbelastung betrachtet	Keine Angabe zum Recycling-Anteil. Die Schadstoffbelastung kann hauptsächlich durch folgende Stoffe negativ beeinflusst werden: Asbest, Blei-basierte Farben, Phenole, PCBs und PAHs.	Hilfsmittel zum Aufzeigen der Konsistenz und Glaubwürdigkeit sowie der Vergleichbarkeit von eigenen und bestehenden Ökobilanzen. Praktischen Tipps zur Durchführung der Ökobilanzen
6.	(Di Maria, Eyckmans und Van Acker, 2018)	Belgien	Vergleich von Downcycling versus Recycling von Bau- und Abbruchabfällen: Kombination von Ökobilanz und Lebenszykluskostenrechnung zur Unterstützung einer	Trockenaufbereitung in folgende zwei Fraktionen für die Verwendung als Hochbaumaterialien: >4mm Feinfraktion; Strassenbau: <4mm Feinfraktion	Je nach Verarbeitungsmethode und Korngröße für den Hochbau ohne den Zementanteil zu erhöhen Material für den Strassenbau Eine niedrige Schadstoffbelastung von Recyclingprodukten kann die	Kombination von Ökobilanz und Lebenszykluskostenrechnung. Enthält ein Literaturreview.

Nr.	Referenz	Region	Ziel der Publikationen	Gängige Aufbereitungspraxis	Recycling-Anteil und Schadstoffbelastung	Einzigartigkeit
			nachhaltigen Politikgestaltung		gesamten Umweltauswirkungen deutlich verringern.	
7.	(Kleijer u. a., 2017)	Schweiz	Vergleich von Ökobilanz für Recyclingbeton und Primärbeton in der Schweiz	Nassaufbereitung von Ecobeton® im Vergleich zur Nassaufbereitung von Primärbeton	25 – 40% Anteil an Recycling Material beim Ecobeton® Vorsichtig entwickelter Recyclingbeton ist von gleicher Qualität wie Primärbeton.	Detaillierte Angaben zur Erstellung eines Inventars, aktuelle Schweizer Daten.
8.	(De Wolf, Hoxha und Fivet, 2020)	Schweiz	Vergleich von den Szenarien Recycling und Wiederverwendung von Baustoffabfällen	Vergleich von Recycling und Wiederverwendung von Baustoffabfällen	Wiederverwendung von Baustoffabfällen als möglichst gleichwertige Produkte. Die Schadstoffbelastung der wiederverwendeten Produkte muss gleicht den neuen Produkten sein.	Lokale Daten über die Wiederverwendung von Baustoffen.
9.	(Xia, Ding und Xiao, 2020)	China	Ökobilanzierung von Betonbauwerken mit Wiederverwendungs- und Recycling Strategien: Eine Fallstudie und eine neue Rahmenstruktur	Vergleich von Recycling und Wiederverwendung von Baustoffabfällen	Wiederverwendung von Baustoffabfällen und Design für Rückbau als möglichst gleichwertige Produkte. Keine Angabe zur Schadstoffbelastung.	Vorschlag für eine neue Rahmenstruktur für Ökobilanzen in Bezug auf Recyclingstrategien sowie Wiederverwendung von Baustoffabfällen.
10.	(Rubli und Pohl, 2019)	Schweiz	Vergleich Recyclingbeton aus Trockenaufbereitung mit Nassaufbereitung	Vergleich von Trocken- und Nassaufbereitung	Vergleich von Primärgesteinskörner für Konstruktionsbeton, 25%-Anteil Recycling-Konstruktionsbeton C30/37 und 65-100% Recycling Konstruktionsbeton (NovoCon) Keine Angabe zur Schadstoffbelastung.	Einzig gefundene Studie zu einem Vergleich der Trocken- und Nassaufbereitung von Bauschutt.
11.	(Knoeri, u a., 2013)	Schweiz	Vergleich von verschiedenen Sorten Recyclingbeton mit konventionellem Beton.	Vergleich von Trockenaufbereitung von verschiedenem Recyclingbeton: Magerbeton (150/200 kg Zement/m ³), Beton für den Innenbereich und Beton für den Aussenbereich).	25%, 40%, 100%- Anteilen an Recycling Konstruktionsbeton. Keine Angabe zur Schadstoffbelastung.	Vollständige Ökobilanz zu Recyclingbetonarten mit Daten aus der Schweizer.
12.	(Holcim, 2010)	Schweiz	Ökobilanzen von rezykliertes Gesteinskörnung für Beton	Vergleich von Nassaufbereitung von rezykliertes Gesteinskörnung für Beton und RC-Beton (25% Betongranulat), Magerbeton 15% RC zu Magerbeton 100% RC, fiktives Bauprojekt mit 25% Betongranulat und Primärbetongranulat	Verschiedene Anteile und Gesteinskörnungen von Recycling und Primärmaterial (siehe gängige Aufbereitungspraxis). Keine Angabe zur Schadstoffbelastung.	Ausführlich beschriebene Ökobilanzen, über verschiedene Szenarien in der Schweiz. Ebenfalls eine Ökobilanz für ein Bauprojekt.

4. Schlussfolgerung

Aus der Literaturrecherche und den Brancheninterviews zum Baustoffrecycling in den Kantonen Basel-Landschaft und Basel-Stadt lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

Recycling beginnt beim Rückbau, Betonabbruch bevorzugt, Chrom VI beachten: Wichtig für eine qualitativ hochwertige Aufbereitung ist ein sortenreiner Rückbau des Abbruchgebäudes. Nur durch eine sortenreine Trennung der rückgebauten Materialien können qualitativ hochwertige RC-Baustoffe hergestellt werden. Die meisten befragten Recycling-Unternehmen verarbeiten gegenwärtig hauptsächlich Betonabbruch (ca. 90% der befragten Unternehmen) zu RC-C, meist zur Verwendung in Magerbeton. Betonabbruch ist im Vergleich zu Mischabbruch reiner und lässt sich mit geringerem Aufwand zu RC-Granulat aufbereiten. Mischabbruch wird u.a. in der Region Basel noch selten zu RC-M aufbereitet, was sich durch die höheren Aufbereitungskosten im Vergleich zu Primärkies und den fehlenden Erfahrungen eine für hochwertige Anwendung begründen lässt. Beispiele aus der Schweiz (Kanton Zürich) und Europa dokumentieren aber, dass durch ein gut etabliertes Recyclingsystem und eine hochwertige Aufbereitung auch Mischgranulat in Konstruktionsbeton eingesetzt werden kann. Seit 2018 gibt es auch Praxisbeispiele aus der Region Basel. Dies vor allem für Anwendungen die witterungsgeschützt sind, wie zum Beispiel für Ortbetonbauteile wie Fundationsplatten, Kellerwänden, Decken und Böden. In Bezug auf die Schadstoffe ist vor allem die durch das Recycling entstehende Feinfraktion mit Chrom VI eine Herausforderung. Mit der Nassaufbereitung können Chrom und andere Schadstoffe ausgewaschen werden.

Trockenaufbereitung dominiert, Nassaufbereitung mit Vorteilen: Zur Aufbereitung nutzt die Mehrheit der befragten Unternehmen momentan die Trockenaufbereitung. Die Nassaufbereitung wird von wenigen Firmen angewendet, obwohl dies Vorteile für die Qualität von RC-C und RC-M hat. Gewaschenes RC-M ermöglicht die Herstellung von Konstruktionsbeton. Die Nassaufbereitung ist aber wegen der Kreislaufführung des Wassers und der Aufbereitung des Schlammes aufwändiger als die Trockenaufbereitung, welches höhere Kosten zur Folge hat.

Kosten ein wesentlicher Treiber, Anreize notwendig: Ein wichtiger Grund für die geringe Verwendung der RC-C und RC-M sind oftmals höhere Kosten. Durch die bis anhin günstigen Deponierungskosten und die billigen Kiesimporte aus dem Elsass sind die Recyclingprodukte oft nicht konkurrenzfähig, weshalb sich eine Aufbereitung bei tiefem Absatz meist nicht lohnt. Um preislich attraktiv zu werden, müsste die Nachfrage für die RC-Baustoffe erhöht werden, wie zum Beispiel mittels der vom Kanton eingeführten Selbstverpflichtung zum Einsatz von RC-Baustoffen. Ein weiteres relevantes Instrument wäre eine Regulierung zu höheren Deponiepreisen, welche es den Recyclern ermöglicht die Annahmgebühren für den Beton und Mischabbruch zu erhöhen. Die Annahmgebühren tragen zur Deckung der Recyclingkosten bei.

Beitrag zur Kreislaufwirtschaft mit Umweltvorteilen: Mehrheitlich werden in der Literatur Umweltvorteile durch das Recycling von Bauschutt dokumentiert. Die Vorteile von mineralischen Recyclingbaustoffen hängen jedoch insbesondere vom verwendeten Zementanteil und den Transportdistanzen ab. Der Zementanteil in Recyclingbaustoffen soll maximal 10% höher sein als die verwendete Menge an Zement bei konventionellem Beton (Knoeri, *u a.*, 2013). Die Transportdistanzen sollten unter 25km liegen. Ein weiterer Umweltvorteil ist die Verwendung von Nebenprodukten der Baustoffaufbereitung, wie beispielsweise das Altmetall im Bauschutt (Knoeri, *u a.*, 2013). Zudem werden Primärressourcen und Deponievolumen geschont.

Vertrauen in RC-Baustoffe steigt mit den vermehrten Anwendungen: Bei der Betrachtung des Vertrauens in die RC-Baustoffe hat diese Untersuchung ergeben, dass bei allen befragten Branchen das Vertrauen vom Jahr 2016 bis zum Jahr 2021 gestiegen oder auf hohem Niveau konstant geblieben ist (siehe Abbildung 7). Dies ist für die Förderung des Baustoffrecyclings wichtig. Der Vertrauensanstieg ist den gewonnenen Erkenntnissen, den positiven Erfahrungen und der Aufklärungsarbeit zu verdanken.

Entwicklungspotential vorhanden: Zusammenfassend zeigt sich, dass es im Bereich des Baustoffrecyclings in den Kantonen Basel-Landschaft und Basel-Stadt Entwicklungspotenzial gibt. Vielversprechend wäre der erhöhte Einsatz von Mischgranulat als Magerbeton sowie Konstruktionsbeton und die vermehrte Nassaufbereitung. Durch die Nassaufbereitung könnten auch mit Mischgranulat qualitativ hochwertige RC-Baustoffe hergestellt werden, welche sich für Anwendungen als Konstruktionsbeton eignen. Durch eine gezielte Erhöhung der Nachfrage und somit des Absatzes solcher hochwertiger RC-Baustoffe, könnten die Preise längerfristig konkurrenzfähiger werden. Viele Entwicklungen in den Kantonen Basel-Landschaft und Basel-Stadt, wie etwa die Umsetzung des «Massnahmenpakets zur Förderung des Baustoffkreislaufs Regio Basel» oder der Bau der geplanten oder bereits gebauten Baustoffaufbereitungsanlagen in der Region Basel, sind vielversprechend. Durch diese und weitere, gezielte Massnahmen lässt sich längerfristig eine nachhaltigere Kreislaufwirtschaft etablieren.

5. Anhang

5.1. Interviewleitfaden

1. Vorbereitung:

Alle Experten wurden zuerst via E-Mail kontaktiert und über das Vorgehen sowie den Hintergrund des Projekts informiert. Danach wurde in einem vorgegebenen Zeitraum angerufen. Das E-Mail für die Kontaktierung ist im Anhang 5.2 abgebildet.

2. Anrufen:

a. Vorstellen:

- (i) Pascal Näf und Sandra Müller, Fachhochschule Nordwestschweiz etc.

b. Information um was es geht:

- (ii) Wir haben uns bereits per E-Mail gemeldet. Es geht um eine Expertise zum Thema ...
- (iii) Haben Sie 10 Minuten Zeit oder ist es ungünstig?

3. Variante A (keine Zeit):

Wann wäre es für Sie passend? Termine vorschlagen/ Randzeiten/ Fragen können im Vorfeld zugestellt werden.

→ Neuer Termin, anrufen und dann wie Variante B.

4. Variante B (Interview durchführen):

a. Kontext der Arbeit erläutern:

- (iv) Für die Kantone Basel-Landschaft und Basel-Stadt erarbeiten wir grundlegende Informationen zum Thema Baustoffrecycling. Sie sind für diese Arbeit eine wichtige Unterstützung.

b. Aufnahmebedingungen Erläutern:

- i. Das Gespräch wird nicht aufgenommen, ich mache mir Notizen.
- ii. Ihre Angaben werden anonym behandelt.
- iii. Wenn gewünscht können die Antworten nach dem Interview zugesendet werden.

Sobald 10 Minuten aufgebraucht sind, folgendes mitteilen:

Danke es ist sehr interessant, ich sehe die Zeit ist bereits um. Haben Sie noch einen Augenblick oder darf ich Sie ein anderes Mal nochmals anrufen?

5. Abschluss

Danke für Ihre Zeit und Ihre Informationen. Dies hilft uns sehr weiter.

5.2. E-Mail-Vorlage

Baustoff-Recycling: Anfrage für Expertise zu den gängigen Praxen der Verwertung von Beton- und Mischabbruch (10 min)

Liebe/r «Herr/ Frau Name»

Für die Kantone Basel-Landschaft und Basel-Stadt erstellen wir eine Übersichtsanalyse von gängigen Praxen hinsichtlich der Beton- und Mischabbruchverwertung. Wir hoffen, dass Sie dies unterstützen. Weil Sie möglicherweise beschäftigt sind, erlauben wir uns, Sie in den nächsten drei Wochen zwischen 07:30 und 10:00 Uhr oder zwischen 15:30 und 17:30 Uhr unter der «Nummer» zu erreichen. Selbstverständlich werden alle Beiträge des Telefonats anonymisiert.

Mehr Informationen zur aktuellen kantonalen Förderung von Beton- und Mischabbruchverwertung finden Sie unter: <https://www.bs krb.ch/>.

Falls Sie nicht kontaktiert werden möchten, teilen Sie uns dies bitte mit.

Vielen Dank im Voraus für Ihre Mithilfe.

Gerne können Sie uns bei Fragen jederzeit kontaktieren.

Herzlich

Pascal Näf und Sandra Müller

Fachhochschule Nordwestschweiz

Hochschule für Life Sciences Muttenz

Tel.

5.3. Fragen der Interviews

Tabelle 7: Interviewfragen zur Ist-Situation in unterschiedlichen Branchen

Fragen	Antwortauswahl
<p>Ausgangsmaterial: In welcher Zusammensetzung, Menge und Form liegt das Ausgangsmaterial vor?</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Zusammensetzung: Betonabbruch oder Mischabbruch • Zusammensetzung in RC: Beton • Zusammensetzung in RC: Mörtel • Zusammensetzung in RC: Mauerstein • Menge pro Jahr • Form: gebunden • Form: lose
<p>Technik und Kosten: Was ist der Stand der Technik und Kosten für die Aufbereitung?</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Technik: Trockenaufbereitung (TA) • Technik: Nassaufbereitung (NA) • Technik: Brechen und Mahlen • Kosten: Kosten der Aufbereitung in [% zu Primärmaterial]
<p>Schadstoffbelastung: Welche Schadstoffe sind enthalten?</p> <p>Anmerkung: der Titel dieser Frage war zu Beginn «Qualität» wurde jedoch angepasst, da es bei der Frage eigentlich um «Schadstoffbelastung» geht.</p>	<p>Welche drei Schadstoffe kommen am häufigsten vor?</p> <ul style="list-style-type: none"> • PAK • KW (Kohlenwasserstoff-Index) • Chrom VI
<p>Trennung: Wie sortenrein wird mineralischer Abbruch in der Praxis auf der Baustelle getrennt?</p>	<ul style="list-style-type: none"> • vor Ort, Trennung nach Abfallkategorien • Bei Rückbaufirma • Bei Recycling-Firma
<p>Betoneigenschaften: Welche Schwierigkeiten gibt es in Bezug auf die Anforderungen der Betoneigenschaften/ Baustoffnormen?</p> <p>Anmerkung: der Titel dieser Frage war zu Beginn «Baustoffnormen» wurde jedoch angepasst, da es bei der Frage eigentlich um «Betoneigenschaften» geht.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Elastizitätsmodul sinkt bei höherem Anteil von RC-Granulat ab. Wird teilweise zu tief (Recycling, 2021). • Je höher der Anteil an rezykliertem Gesteinskörnung ist, desto geringer ist die Druckfestigkeit. • Die geringere Rohdichte der rezyklierten Gesteinskörnung führt zu einem tieferen E-Modul (Holcim, 2019).
<p>Anwendungsbereiche: Für welche hochwertigen Anwendungen (insbesondere Mischgranulat) gibt es positive Erfahrungen</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mischgran. Gem. 0/45 • Magerbeton exkl. Fraktion <8mm • Magerbeton • Konstruktionsbeton • Konstruktionsbeton (Brechsand)
<p>Vertrauen: Wie hat sich das Vertrauen in mineralische Recyclingbaustoffe in den letzten fünf Jahren (2016 bis 2021) verändert?</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Vertrauen auf Skala 1-10 vor 5 Jahren • Wie vertrauen heute auf Skala 1-10 • Würden Sie das Ihren Kunden empfehlen?
<p>Weitere?</p>	
<p>Sonstiges</p>	

5.4. Zusammenfassung der verwendeten Publikationen zu Ökobilanzen

Tabelle 8: Auflistung der Zusammenfassungen der verwendeten Publikationen zu Ökobilanzen

Nr. Referenz	Zusammenfassung in Originalsprache
(Zanni <i>u. a.</i> , 2018)	<p>Following the Waste Framework Directive, new solutions must be identified for the management of Construction and Demolition waste. Circular economy would provide the strategic key for addressing this issue: construction industry may, in fact, become an elective consumer of its own waste, where construction materials are circular and eco-designed.</p> <p>A comprehensive case study has been built, starting from evaluation of different management options for this waste to be applied in the municipality of Bologna and prosecuting with the design of concrete mixes, implementing construction and demolition derived aggregates as partial replacement for natural aggregates. Life Cycle Assessment (LCA) has been applied to evaluate the environmental impact of the options designed, in comparison with standard concrete already on the market. In particular, 25% replacement of natural aggregates leads to almost equal decrease in respiratory inorganics related impact and more than 39% decrease in land occupation indicator, even though ozone layer depletion impact indicator shows a negative performance. Nevertheless, partial aggregates replacement should be coupled by a limited cement replacement, in order to trigger a substantial decrease of the environmental impact in concrete production.</p>
(Butera, Christensen und Astrup, 2015)	<p>Life cycle assessment (LCA) modelling of construction and demolition waste (C&DW) management was carried out. The functional unit was management of 1 Mg mineral, source separated C&DW, which is either utilised in road construction as a substitute for natural aggregates, or landfilled. The assessed environmental impacts included both non-toxic and toxic impact categories. The scenarios comprised all stages of the end-of-life management of C&DW, until final disposal of all residues. Leaching of inorganic contaminants was included, as was the production of natural aggregates, which was avoided because of the use of C&DW. Typical uncertainties related to contaminant leaching were addressed. For most impact categories, utilisation of C&DW in road construction was preferable to landfilling; however, for most categories, utilisation resulted in net environmental burdens. Transportation represented the most important contribution for most nontoxic impacts, accounting for 60–95 per cent of these impacts. Capital goods contributed with negligible impacts. Leaching played a critical role for the toxic categories, where landfilling had lower impacts than utilisation because of the lower levels of leachate per ton of C&DW reaching the groundwater over a 100-year perspective. Leaching of oxyanions (As, V and Sb) was critical with respect to leaching. Typical experimental uncertainties in leaching data did not have a pivotal influence on the results; however, accounting for Cr immobilisation in soils as part of the impact assessment was critical for modelling the leaching impacts. Compared with the overall life cycle of building and construction materials, leaching emissions were shown to be potentially significant for toxicity impacts, compared with contributions from production of the same materials, showing that end-of-life impacts and leaching should not be disregarded when assessing environmental impacts from construction products and materials. CO₂ uptake in the C&DW corresponding to 15 per cent carbonation could out-balance global warming impacts from transportation; however, carbonation would also likely result in increased toxicity impacts due to higher leaching of oxyanions.</p>
(Häfliger <i>u. a.</i> , 2017)	<p>The assessment of the environmental performance of buildings is now commonly using a life cycle approach, based on a growing number of databases and methods in Life Cycle Assessment (LCA). Recent studies have, however, highlighted the problems related to uncertainties in the LCA results. The aim of this study is to assess the sensitivity of construction materials to the different modelling choices in order to highlight their consequences at the building scale. In particular, we focused on the different modelling options in terms of database choices, system boundary definitions and replacement scenarios of building materials during the whole service life of the buildings. The assessment of uncertainties was conducted at two levels: the material or element level and the building level. The results clearly show the importance of these modelling choices. Variations on the overall assessment of buildings are significant, but the details at the material scale show that not all materials are similarly sensitive to these choices. We identified those materials that have a large contribution to the environmental impact of the buildings and which are also sensitive to different modelling choices. This can help for a better understanding of these modelling choices and can be used in upcoming regulations or public policies.</p>
(Hossain <i>u. a.</i> , 2016)	<p>The management of construction and demolition (C&D) waste and waste glass is a serious concern in Hong Kong, as well as other countries due to their non-combustible and non-putrescible nature, and the running out of disposal outlets. However, mineral wastes derived from C&D activities and waste glass are considered to have potential to be re-used as construction materials, especially as aggregates. In addition, Hong Kong urgently needs alternative and sustainable sources of aggregate, as the local quarry sites for aggregate production are expected to be exhausted soon. Many experimental studies have demonstrated that recycled aggregates from C&D</p>

waste and waste glass can be potentially recycled for various engineering applications in Hong Kong, but no study has yet attempted to assess the sustainability by lifecycle assessment (LCA) techniques. In order to increase the environmental awareness in the construction industry, assessment of the environmental performance of construction materials by LCA is therefore needed. The present study was conducted to assess and compare the environmental consequences of recycled aggregates production from C&D waste and waste glass, and natural aggregate production from virgin materials by LCA by using case specific and first hand data. The results reveal that compared with natural coarse aggregates, recycled coarse aggregates produced from C&D waste reduce 65% greenhouse gases (GHGs) emission with a saving of 58% non-renewable energy consumption. Similar environmental benefits are observed for producing recycled fine aggregates from C&D waste. In addition, compared with the production of natural fine aggregates from river sand, producing recycled fine aggregates from waste glass saves 54% energy consumption and reduces 61% GHGs, and 46% SO₂ eq emissions. According to the IMPACT 2002+ Method, significant health, resource, climate change and ecosystem damages can be saved in producing recycled aggregates from both waste materials compared to producing and importing aggregates from virgin sources. This is the first ever LCA study on producing recycled aggregates from waste glass. Therefore, it can be concluded that substantial net environmental benefits can be realized for producing recycled aggregates from C&D waste and waste glass. The results can provide a guidance to maximize C&D waste and waste glass recycling, resourceful treatment of wastes and conserve natural resources.

(EC IES 2011)

Overview

Large quantities of waste are generated during the construction of developments, and when buildings and structures are decommissioned and demolished at the end of their lives. Improper management of these construction and demolition (C&D) wastes often results in considerable environmental impacts. Using alternative management routes could result in both environmental and cost savings. The “waste hierarchy”, established in article 4(1) of the Waste Framework Directive (2008/98/EC), sets the legally binding order of management preference: prevention, preparing for re-use, recycling, other recovery, and disposal as the least desirable option. Generally, applying the waste hierarchy should lead to the waste being dealt with in the most resource-efficient way. However, as supported by Article 4(2) the Waste Framework Directive, Life Cycle Thinking (LCT) can be used to complement the waste hierarchy in order to make sure that the best overall environmental option is identified. The Life Cycle Thinking (LCT) concept and quantitative tools such as Life Cycle Assessment (LCA) can provide an informed and science-based support to a more environmentally sustainable decision-making in waste management. Within the concept of LCT, Life Cycle Assessment (LCA) is a structured and internationally standardised method that quantifies all relevant emissions, resources consumed/depleted, and the related environmental and health impacts associated with any goods or services.

About This Guidance Document

This guidance document provides waste policy makers, waste managers, and businesses with the background to Life Cycle Thinking (LCT) and Life Cycle Assessment (LCA) approaches which can be implemented when considering C&D waste management options. The guidance does not seek to be comprehensive, but outlines the key principles that are useful to understand, and to signpost readers to further sources of information. It will provide you with an overview of what is Life Cycle Thinking, and how to implement this in practice. Implementation can be through tools and criteria that are developed from existing information or through more detailed quantified LCAs. As there are already well-established methods and sources of data to guide you in undertaking a life cycle assessment, this guidance will help you to identify these and to ensure the consistency, credibility and comparability of your results with those of others. This document is a waste-specific text, building on the more general ISO 14040 series of standards for LCA, the International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook and the JRC guide “Supporting environmentally sound decisions for waste management – A technical guide to Life Cycle Thinking (LCT) and Life Cycle Assessment (LCA) for waste experts and LCA practitioners”.

Key target audience

This guidance document is useful for anyone involved in the management of C&D waste, or involved in making decisions that could affect its generation – policy makers, developers, contractors and site managers alike. About Life Cycle Thinking (LCT) and Life Cycle Assessment (LCA) Over their life-time, products (goods and services) contribute to various environmental impacts. Life Cycle Thinking (LCT) is a concept that accounts for the upstream and downstream benefits and trade-offs. LCT seeks to identify environmental improvement opportunities at all stages across its life cycle, from raw material extraction and conversion, through product manufacture, product distribution, use and fate at the end-of-life stage. Its fundamental aim is to provide a structured and comprehensive approach in support of the

overall reduction of product impacts and to help optimise benefits. Life Cycle Assessment (LCA) is a structured and internationally standardised method that transposes Life Cycle Thinking (LCT) principles into a quantitative framework. LCA quantifies all relevant emissions, resources consumed/depleted, and the related environmental and health impacts associated with any goods or services. Therefore, within the concept of LCT, LCA is a vital and powerful tool to effectively and efficiently help make consumption and production globally more sustainable. When LCT/LCA are applied to waste management services, typically the assessments focus on a comparison of different waste management options, not covering the entire life cycle of the products which have become waste. Therefore, LCT/LCA applied to waste management services can differ from product LCT/LCA, which accounts for the entire life cycle of a product, in which waste management may play only a minor role. However, if one of the evaluated waste management options includes that materials are given back into the life cycle of a product, a product life cycle perspective has to be taken into account also in LCT/LCA for waste management services.

Key issues addressed in this document

The document is set out in sections that cover the following topics:

- Overview of the Life Cycle Thinking (LCT) concept and of the derived quantitative tool Life Cycle Assessment (LCA)
- The common principle of waste management, the “waste hierarchy”
- An overview of C&D wastes: definition, quantities, composition, management methods, environmental issues, etc. • How to derive straightforward criteria to support environmentally sound management of C&D waste
- How LCA can be used to support the environmentally-sound management of C&D wastes
- How to conduct an LCA in C&D waste management

Remarks

This document focuses on the environmental aspects of waste management services. While economic, social/societal aspects are mentioned, no detailed guidance on how to include them is provided in this document. The recommendations given in this document are intended to help model a limited set of typical waste management and treatment activities, focussing on those processes, parameters and impacts that typically matter most. However, the LCA/LCT results, and conclusions cannot be generalised and it is the responsibility of the expert to judge whether existing studies and information are relevant and can thus be extrapolated to a new situation not covered in this LCA/LCT study. Links to specific chapters of the International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook provided in this guidance refer to the current edition of the ILCD Handbook (Edition 1).

(Di Maria, Eyckmans und Van Acker, 2018)

Urgent solutions are needed in Europe to deal with construction and demolition waste (CDW). EU policy has contributed to significantly reducing the amount of CDW going to landfill, but most of the effort has been put in downcycling practices. Therefore, further policies are needed to stimulate high-quality recycling of CDW. The present paper presents a combined life cycle assessment (LCA) and life cycle costing (LCC) methodologies to analyse the environmental and the economic drivers in four alternative CDW end-of-life scenarios in the region of Flanders, in Belgium. The four analysed alternatives are (i) landfilling, (ii) downcycling, (iii) advanced recycling and (iv) recycling after selective demolition. LCA results show that landfilling is the scenario having the highest environmental impacts in terms of person equivalent (PE), followed by downcycling and recycling (-36%) and recycling after selective demolition (-59%). The decrease in environmental impacts is mostly due to the avoided landfilling of CDW and the recovery of materials from selective demolition. LCC results indicate that landfilling is the scenario bearing the highest total economic costs. This is due to the high landfill tax in Flanders. The recycling after selective demolition bears the second highest cost. The increase of high-quality CDW recycling can significantly reduce the overall environmental impact of the system. Implementing a high landfill tax, increasing the gate fee to the recycling plant, and boosting the sales price of recycled aggregates are the most effective drivers to facilitate a transition towards a more sustainable CDW management system. The paper demonstrates that the combined LCA and LCC results can highlight the environmental and economic drivers in CDW management. The results of the combined analysis can help policymakers to promote the aspects contributing to sustainability and to limit the ones creating a barrier.

(Kleijer *u. a.*, 2017)

Recycled concrete is one of the most efficient answers to the shortage of natural aggregate in highly populated and protected regions, such as Switzerland. Although the technology has evolved and today a number of certified recycled concretes are available in the ready mix concrete market, there are still many barriers to its use for structural purposes. These are caused by early tests that, analyzing non-optimized or non-commercial products, reached the conclusion that the performances of recycled concrete would not match the ones of ordinary concrete. Furthermore, early studies on the environmental impact of recycled concrete seemed to confirm an identical

environmental impact for recycled and ordinary concrete (Viviani 2011; Viviani 2014). In this paper, is presented a thorough Life Cycle Assessment (LCA) for a commercialized recycled concrete and a commercialized ordinary concrete of the same strength class, both certified, both deeply characterized, showing virtually identical physical and rheological properties and sold at the same price (recycled concrete price being slightly lower than the ordinary). This LCA study shows that recycled concrete is only slightly better than ordinary concrete in terms of greenhouse gases emissions. This difference is yet not enough significant (1%) as well as for the cumulative energy demand (4%). In opposite, it performs better with around 12% less environmental impacts according to the Swiss Ecological Scarcity 2006 Method. So, current actions taken to promote their use are fully in the direction of a more sustainable construction industry if the transportation distance to the construction site is minimized and below e.g., 25 km as recommended in the Swiss Minergie ECO label.

(De Wolf, Hoxha und Fivet, 2020) The building industry is responsible for 35 % of all solid waste in Europe and more than a third of greenhouse gas (GHG) emissions. To address this, applying circular economy principles to the building sector is crucial, for example by reusing building elements from demolition sites rather than extracting and producing new materials. However, most current life-cycle assessment (LCA) tools are not appropriate to evaluate the environmental impact of a building when its components originate from prior buildings and/or will be used in future unknown ones. Still, robust measurement is needed to demonstrate the benefits of reuse towards environmentally sustainable cities. This paper compares existing methodologies to quantify the global warming potential (GWP, expressed in kgCO₂e/unit) of recycled/recyclable and reused/reusable products, selected within widely recognised standards, rating schemes, and academic studies, such as the cut-off method, the end-of-life method, the distributed allocation (PAS-2050) method, the Environmental Footprint method, the Degressive method and the SIA 2032 method. Based on these recognised approaches for assessing the GWP of products, new equations are written and applied to buildings with reused/reusable materials for each of the methods. The Kopfbau Halle 118 building (Winterthur, CH, 2021), which is designed with reclaimed elements from local demolition sites, is chosen as a case study. Discrepancies in LCA methods are highlighted by applying them to three different life cycles corresponding to the first, intermediate, or final use of building components. This paper shows that current quantification methods to assess reuse give wide-ranging results and do not address the full spectrum of the reuse practice, that their boundaries are too limited, and that a number of critical features are currently hardly quantifiable, such as embedded use value, versatility, storage and transformation impacts, user-owner separation, dis/re-mountability, or design complexity.

(Xia, Ding und Xiao, 2020) In the construction industry, reuse and recycling strategies help reducing waste, saving energy and cutting down emissions by converting construction and demolition (C&D) waste into resources. This study proposes a novel framework to guide the life cycle assessment (LCA) of concrete structures with reuse and recycling strategies. The material flow in recycling strategies is clarified explicitly. A new definition of degradation rate is introduced to set a nonlinear allocation rule for reusable components based on the durability feature of concrete structures. Reusable rate and replacement percentage are adopted to provide a convenient way to adjust the type and level of the strategies. As a result, a unified system boundary and corresponding indicator functions can be established for various strategies, combing the closed-loop analysis and the open-loop analysis. In the case study, design for deconstruction (DfD) and recycled aggregate concrete (RAC) are taken as examples of reuse and recycling strategies, respectively. With the proposed framework, LCA of various strategy combinations are conducted considering the global warming potential (GWP) and abiotic depletion potential (ADP) indicators. Results show that the maximal environmental benefit of DfD is 1.8–2.8 times compared to that of RAC. When adopting DfD and RAC simultaneously, the environmental benefit level of each strategy will decline, whereas the overall benefits will be increased. LCA with the proposed framework avoids some assumptions in conventional LCA and provides more reliable results for various strategy combinations.

(Rubli und Pohl, 2019) Faktenblatt Ökologie NovoCon (keine Zusammenfassung)

(Knoeri, u a., 2013) *Purpose* Construction and demolition (C&D) waste recycling has been considered to be a valuable option not only for minimising C&D waste streams to landfills but also for mitigating primary mineral resource depletion. However, the potentially higher cement demand due to the larger surface of the coarse recycled aggregates challenges the environmental benefits of recycling concrete. Furthermore, it is unclear how the environmental impacts depend on concrete mixture, cement type, aggregates composition and transport distances.
Methods We therefore analysed the life cycle impacts of 12 recycled concrete (RC) mixtures with two different cement types and compared it with corresponding conventional concretes (CC) for three structural applications. The RC mixtures were selected according to laws, standards and construction practice in Switzerland. We compared the environmental impacts of ready-for-use concrete on the construction site, assuming equal lifetimes for recycled and conventional concrete in a full life cycle assessment. System expansion and substitution are considered to achieve the same functionality for all systems.

Results and discussion The results show clear (~30 %) environmental benefits for all RC options at endpoint level (ecoinicator 99 and ecological scarcity). The difference is mainly due to the avoided burdens associated to reinforcing steel recycling and avoided disposal of C&D waste. Regarding global warming potential (GWP), the results are more balanced and primarily depend on the additional amount of cement needed for RC. Above 22 to 40 kg additional cement per cubic metre of concrete, RC exhibits a GWP comparable to CC. Additional transport distances above 15 km for the RC options do result in environmental impacts higher than those for CC.

Conclusions In summary, the current market mixtures of recycled concrete in Switzerland show significant environmental benefits compared to conventional concrete and cause similar GWP, if additional cement and transport for RC are limited.

(Holcim, 2010)

In der Schweiz wird in den kommenden Jahrzehnten mit einer markanten Zunahme von Betongranulat und Mischgranulat gerechnet als Folge des Rückbaus von Gebäuden, die ab 1950 errichtet worden sind. Gleichzeitig wird prognostiziert, dass sowohl der verfügbare Deponieraum als auch die für den Kiesabbau bewilligten Reserven knapp werden. Als Reaktion auf diese Entwicklung wird vorgeschlagen, Mischgranulat und Betongranulat vermehrt als Kiesersatz zu verwenden. Die Holcim (Schweiz) AG hat das Institut für Bau und Umwelt an der Hochschule Rapperswil beauftragt, durch die Analyse von vergleichenden Ökobilanzen für den Einsatz von rezykliertem und natürlicher Gesteinskörnung an ausgewählten Beispielen Informationen über die ökologische Bewertung des Einsatzes von rezykliertem Gesteinskörnung in Betonen bereitzustellen. Zum diesem Zweck werden in diesem Projekt vier Ökobilanzen für den Einsatz von rezykliertem und natürlicher Gesteinskörnung erstellt und analysiert, mit denen der Einsatz von rezykliertem Gesteinskörnung aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet wird. Diese Ökobilanzen sollen den Grundsätzen der ISO 14040 entsprechen und werden im vorliegenden Bericht dokumentiert. Die Ökobilanzen wurden von einem unabhängigen Prüfungsausschuss auf ihre ISO-Konformität überprüft. Darüber hinaus wurde eine Wirkungsabschätzung mit der Methode der Ökologischen Knappheit (nicht ISO-konform) durchgeführt, deren Ergebnisse in Anhang A dargestellt sind und welche nicht Bestandteil des vom Prüfungsausschuss auf ISO-Konformität geprüften Berichtsteils sind.

Referenzen

- Abbruch- und Rückbau (2021) «Experteninterviews mit der Abbruch-/ und Rückbaubranche».
- BAFU (2006) «Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle», *Umwelt -Vollzug Nr. 0631. Bundesamt für Umwelt, Bern*, S. 34.
- BAFU (2021) *Abfall und Rohstoffe: Das Wichtigste in Kürze*.
- BauNetz Wissen Beton (2021) *Expositionsklasse*.
- Baustoffkreislauf Regio Basel (2020) *Mengen_Verteilung der Bauabfälle*.
- Bechmann, R. (2019) «Bauen für das Leben in der Zukunft».
- BR (2021) «Endliche Ressource Gips: Warum Recycling den Bauboom retten könnte | IQ - Wissenschaft und Forschung |». Deutschland. Verfügbar unter: <https://www.br.de/radio/bayern2/sendungen/iq-wissenschaft-und-forschung/endliche-ressource-gips-100.html> (Zugegriffen: 18. Januar 2022).
- BS (2021a) *Amt für Umwelt und Energie des Kantons Basel-Stadt - Bauabfälle/Bauschutt*. Verfügbar unter: <https://www.aue.bs.ch/abfaelle/industrie-gewerbe/bauabfaelle.html> (Zugegriffen: 19. Dezember 2021).
- BS (2021b) *Anzug Patricia von Falkenstein betreffend «Förderung des Bau-stoff-Kreislaufs im Kanton Basel-Stadt»*.
- BS (2021c) *Projektbeispiele – Baustoffkreislauf Regio Basel*. Verfügbar unter: <https://www.bskrb.ch/verwertung/projektbeispiele/> (Zugegriffen: 19. Dezember 2021).
- Butera, S., Christensen, T. H. und Astrup, T. F. (2015) «Life cycle assessment of construction and demolition waste management», *Waste Management*. Elsevier Ltd, 44, S. 196–205. doi: 10.1016/j.wasman.2015.07.011.
- Cemsuisse (2018) *Herstellung von Beton: Umweltgerechter Umgang mit chromathaltigen Betonschlämmen Worum es geht*.
- EC IES (2011) *Supporting Environmentally Sound Decisions for Construction and Demolition (C & D) Waste Management, JRC Scientific and Technical Reports*. doi: 10.2788/54618.
- Empa (2011) «Grundlagen für die Verwendung von Recyclingbeton mit Mischgranulat», *Cemsuisse*, (September).
- Energie- und Ressourcen-Management GmbH (2020) *Mischabbruchverwertung in der Schweiz - Schlussbericht 2020*.
- FG Entsorgungs- und Ressourcenmanagement (2018) «Rohstoff».
- Forschung (2021) «Experteninterviews mit der Forschung».
- Gauch, M. u. a. (2016) «Material- und Energieressourcen sowie Umweltauswirkungen der baulichen Infrastruktur der Schweiz».
- Häfliger, I. F. u. a. (2017) «Buildings environmental impacts' sensitivity related to LCA modelling choices of construction materials», *Journal of Cleaner Production*, 156, S. 805–816. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.04.052.
- Hoch- und Tiefbau (2021) «Experteninterviews mit der Hoch- und Tiefbaubranche».
- Hoffmann, C. H. S. A. (2015) *Stand von Forschung und Entwicklung in der Schweiz Cathleen Hoffmann*.

- Holcim (2010) *Ökobilanzen rezyklierter Gesteinskörnung für Beton*.
- Holcim (2019) «Recyclingbeton», 11.
- Holcim (2021) *Mechanische Eigenschaften des Festbetons*.
- Hossain, M. U. u. a. (2016) «Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA», *Resources, Conservation and Recycling*. Elsevier B.V., 109, S. 67–77. doi: 10.1016/j.resconrec.2016.02.009.
- Immobilien-gesellschaft mit Leuchtturmprojekt (2021) «Experteninterviews mit Experten zu Leuchtturmprojekten».
- Kanton Basel-Landschaft (2005) «Teilzonenreglement Ortskern».
- Kanton Basel-Landschaft (2021) *Muldenkonzept*.
- kantonale Ämter (2021) «Experteninterviews mit Kantonalen Ämtern».
- Kantonales Hochbauamt Thurgau (2021) *Einsatz von Recyclingbeton im Hochbau*.
- Kleijer, A. L. u. a. (2017) «Resources , Conservation and Recycling Product-specific Life Cycle Assessment of ready mix concrete : Comparison between a recycled and an ordinary concrete», «*Resources, Conservation & Recycling*». Elsevier B.V., 122, S. 210–218. doi: 10.1016/j.resconrec.2017.02.004.
- Knoeri, C., Sanyé-Mengual, E. und Althaus, H. J. (2013) «Comparative LCA of recycled and conventional concrete for structural applications», *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(5), S. 909–918. doi: 10.1007/s11367-012-0544-2.
- KRONOS (2019) *Reduktion von Chrom-VI in Reststoffen wie Aschen , Schlacken und Stäuben Reduktion von Chrom-VI*.
- Kuster, Aurelia; Guyer, Lukas; Arpagaus, P. E. Z. (2017) *Förderung von mineralischen Recyclingbaustoffen und Wie- derverwendung in der Schweiz – Häuser aus Häusern bauen*.
- Di Maria, A., Eyckmans, J. und Van Acker, K. (2018) «Downcycling versus recycling of construction and demolition waste: Combining LCA and LCC to support sustainable policy making», *Waste Management*. Elsevier Ltd, 75, S. 3–21. doi: 10.1016/j.wasman.2018.01.028.
- Mesa, J. A., Fúquene-Retamoso, C. und Maury-Ramírez, A. (2021) «Life Cycle Assessment on Construction and Demolition Waste: A Systematic Literature Review», *Sustainability*, 13(14), S. 7676. doi: 10.3390/su13147676.
- Müller, A. (2016) «Endbericht - Erschließung der Ressourceneffizienzpotenziale im Bereich der Kreislaufwirtschaft Bau».
- Nittnaus, M. (2022) *Landrat fordert Regierung auf, bei Deponieabgabe Gas zu geben*. Verfügbar unter: <https://www.bzbasel.ch/basel/volle-deponien-bauschutt-im-baselbiet-erster-mini-schritt-erreicht-doch-landrat-fordert-nun-tempo-bei-neuer-deponieabgabe-ld.2238443> (Zugegriffen: 16. Januar 2022).
- ORF (2020) *Wenn die Rohstoffe knapp werden - Bauen mit Schutt*. Verfügbar unter: <https://www.3sat.de/gesellschaft/politik-und-gesellschaft/wenn-die-rohstoffe-knapp-werden-110.html> (Zugegriffen: 16. August 2021).
- Pauli, P. F. M. (2021) *Carbonatisierung*.
- Recycling (2021) «Experteninterviews mit der Recyclingbranche».
- Regierungsrat Kanton Basel-Landschaft (2021) «Vorlage an den Landrat», S. 1–8.

Richi AG Weiningen (2018) «Grosses Potential für Konstruktionsbeton aus Mischabbruch im Hochbau», S. 58–59.

Rubli, Stefan; Pohl, T. (2019) *Faktenblatt Ökologie NovoCon*.

Rubli, S. (2021) «Entwicklung einer Recyclingbaustoff- strategie für den Kanton Luzern».

Rubli, S., Brupbacher, A. und Rubli, D. (2017) *Umweltleistungen von Bauschutttaufbereitungsanlagen (BSAA)*. Zürich, Schweiz.

SeRaMCo (2020) *Interreg NWE: SeRaMCo*. Verfügbar unter: <https://www.nweurope.eu/projects/project-search/seramco-secondary-raw-materials-for-concrete-precast-products> (Zugegriffen: 16. August 2021).

SeRaMCo Technologies & Belgium (2020). Verfügbar unter: https://www.youtube.com/results?search_query=SeRaMCo+Technologies+%26+Belgium (Zugegriffen: 16. August 2021).

StoneCycling (2021) *Transforming waste into high-end brick design — StoneCycling®*. Verfügbar unter: <https://www.stonecycling.com/our-projects> (Zugegriffen: 16. August 2021).

De Wolf, C., Hoxha, E. und Fivet, C. (2020) «Comparison of environmental assessment methods when reusing building components: A case study», *Sustainable Cities and Society*. Elsevier, 61(June), S. 102322. doi: 10.1016/j.scs.2020.102322.

Xia, B., Ding, T. und Xiao, J. (2020) «Life cycle assessment of concrete structures with reuse and recycling strategies : A novel framework and case study», *Waste Management*. Elsevier Ltd, 105, S. 268–278. doi: 10.1016/j.wasman.2020.02.015.

Zanni, S. u. a. (2018) «Life Cycle Assessment Applied to Circular Designed Construction Materials», *Procedia CIRP*. Elsevier B.V., 69(May 2018), S. 154–159. doi: 10.1016/j.procir.2017.11.040.

Zimmermann, Y. und Utinger, D. (2020) «Kanton Basel-Landschaft fördert den Baustoffkreislauf Regio Basel», *Bau und Umweltzeitung*, S. 2–4.