

HTL1 Bau & Design
Goethestraße 17
4020 Linz



Diplomarbeit 2020/2021

Recycling von Mineralischem Bauschutt- Technische Qualitäten/Marktanalyse/Hemmnisse

mit Schwerpunkt auf Recyclingbeton

Verfasser: Mathias Binder
Franziska Fuchs

Betreuer: Robert Kernöcker
Elke Steinbrecher

Höhere Abteilung: Bautechnik-Hochbau

Eidesstattliche Erklärung

Wir erklären eidesstattlich, dass wir die vorliegende Diplomarbeit selbstständig angefertigt und die mit ihr unmittelbar verbundenen Tätigkeiten selbst erbracht haben. Wir erklären weiters, dass wir keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt haben. Alle aus gedruckten, ungedruckten Quellen oder dem Internet im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt übernommenen Formulierungen und Konzepte sind gemäß den Regeln für wissenschaftliche Arbeiten zitiert und durch Fußnoten bzw. durch andere genaue Quellenangaben gekennzeichnet.

Diese Arbeit wurde in gedruckter und elektronischer Form abgegeben. Wir bestätigen, dass der Inhalt der digitalen Version vollständig mit dem der gedruckten Version übereinstimmt.

Wir sind uns bewusst, dass eine falsche Erklärung rechtliche Folgen haben wird.

Linz, im April 2021

Mathias Binder

Franziska Fuchs

Danksagung

An dieser Stelle wollen wir uns herzlich bei allen bedanken, die uns beim Verfassen dieser Diplomarbeit unterstützt und geholfen haben.

Unser größter Dank gilt unserem Betreuungslehrer Herrn Prof. Robert Kernöcker, der uns bei allen auftretenden Problemen stets weitergeholfen hat und unserer Co- Betreuungslernerin Frau Prof. Elke Steinbrecher, die uns bei der Ausführung der Versuche tatkräftig unterstützt hat. Ohne ihrem Engagement hätte die Durchführung der Versuche nicht in diesem Rahmen stattfinden können.

Großen Dank möchten wir auch den Herrn Dipl.-Ing. Franz Haidinger und Philipp Grestenberger von der Abteilung Umweltschutz des Landes Oberösterreich für die fachliche Unterstützung bei Abfall- und Recyclingthemen aussprechen.

Ganz besonderer Dank gilt der Firma BPS und ihrem Geschäftsführer Herrn Dipl.-Ing. Erwin Rockenschaub für die fachliche und prüftechnische Unterstützung.

Weiters möchten wir uns bei Herrn Rudolf Ecklmayr, Geschäftsführer des Ziegelverbands und Herrn Dr. Dipl.-Ing. Gottfried Stimmeder, Standortleiter von der Firma Eurofins Oberösterreich und Salzburg, bedanken, die uns mit vielen Informationen weitergeholfen haben.

Ebenfalls möchten wir uns bei der Firma Wopfinger Transportbeton und vor allem dem Geschäftsführer Herr Dr. Dipl.-Ing. Franz Denk und seinen Mitarbeitern Herrn Martin Bernhard und Herrn Johann Salzman für die fachliche Hilfestellungen und die kostenlose Bereitstellung von rezyklierten Gesteinsmaterial bedanken.

Der Firma Hasenöhr, namentlich Herrn Ing. Karl Hasenöhr, wollen wir ebenfalls großen Dank aussprechen, da sie uns auch mit der kostenlosen Bereitstellung von Recyclingmaterial unterstützt haben.

Mathias Binder und Franziska Fuchs

Linz, im April 2021

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit gibt einen Überblick über das Recycling von mineralischen Baurestmassen im Hochbau und über Recyclingbeton. Dadurch soll die Wichtigkeit der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen und die Verwendung von Recycling-Material in den Vordergrund rücken und mehr an Bedeutung erlangen. Das Aufbereiten von Baurestmassen gewinnt in der heutigen Zeit immer mehr an Bedeutung, denn das Abfallaufkommen wird immer mehr und die Entsorgungsprobleme werden immer größer. Im Jahre 1990 wurde mit dem Abfallwirtschaftsgesetz der erste Schritt in die richtige Richtung gesetzt. Das Wort „Recycling“ ist heute nicht mehr wegzudenken, vielmehr bekommt es einen immer größeren Stellenwert.

Der Umgang mit Baurestmassen stellt hohe Anforderungen an die Rechtsordnung, wie Gesetze, Verordnungen, Normen oder Richtlinien, um den hohen Ansprüchen der Recyclingbaustoffe gerecht werden zu können. Zu Beginn dieser Arbeit werden grundlegende Informationen zu Abbruch und Trennung, Aufbereitung, Einsatzgebiete des Recyclingmaterials und die rechtlichen Bestimmungen aufgezeigt und erläutert.

In einem weiteren Teil der Diplomarbeit wird das Thema Kreislaufwirtschaft genauer erläutert. Dabei liegt der Schwerpunkt auf dem Stoffkreislauf im Bausektor. Es werden erforderliche Schritte und Forderungen aufgezeigt, damit eine geschlossene Kreislaufwirtschaft in ferner Zukunft zur Realität werden könnte.

Ein wesentlicher Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Thematik rund um den Recyclingbeton. Hierzu wird zwischen Recyclingbeton, hergestellt mit Anteilen von rezyklierten Gesteinskörnungen aus Betonabbruch, und Recyclingbeton, hergestellt mit Anteilen von rezyklierten Gesteinskörnungen aus Beton-Ziegel-Splitt, unterschieden. Es werden die Eigenschaften, gesetzlichen Vorgaben (national sowie international), Einsatzgebiete und Hemmnisse des Recyclingbetons dargestellt, erläutert und diskutiert.

Ein besonderes Augenmerk wird dabei auf den Einsatz von Beton-Ziegel-Splitt für Recyclingbeton gelegt, da in diesem Bereich noch viele Fragen ungeklärt sind.

Die systematische Untersuchung der technischen Eigenschaften von Recyclingbeton in Abhängigkeit des Beimischungsanteils von Recycling-Material bildet den Kern dieser Diplomarbeit. Um dazu neue Erkenntnisse zu erlangen, haben wir eine Versuchsreihe mit verschiedenen Recyclingbetonproben durchgeführt und diese auf Frisch- und Festbetoneigenschaften geprüft.

Abstract

The present work gives an overview of recycling of mineral construction waste in building construction and of recycled concrete. This should bring the importance of the circular economy in construction and the use of recycled material to the fore and gain more importance.

The processing of construction waste is becoming more and more important now day, because the amount of waste is increasing and the disposal problems are increasing. In 1990s the Waste Management Act was the first step in the right direction. The word “recycling” would be indispensable today because it is becoming more and more important.

Dealing with construction waste puts many rights and regulations in the foreground, such as laws, ordinances, standards or guidelines that place high demands on recycled building materials. At the beginning of this work, basic information on demolition and separation, processing, areas of application of the recycling material and the legal provisions are shown and explained.

In a further part of the thesis, the topic of circular economy is explained in more detail. The focus is on the material cycle in the construction sector. Future steps and requirements show that a closed circular economy could become a reality in the distant future.

A major focus of this work is the topic of recycled concrete. For this purpose, a distinction is made between recycled concrete, made with proportions of recycled aggregates from concrete demolition, and recycled concrete, made with proportions of recycled aggregates from concrete-brick chippings. The properties, legal requirements (national and international), areas of application and obstacles of recycled concrete are presented, explained and discussed.

Particular attention is paid to the use of concrete and brick chippings for recycled concrete, as many questions in this area are still unanswered.

The systematic investigation of the technical properties of recycled concrete depending on the admixture of recycled material forms the core of this diploma thesis. In order to gain new knowledge, we carried out a series of tests with various recycled concrete samples and checked them for properties of fresh and hardened concrete.

Ziel und Veranlassung

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist es, den aktuellen Stand zu Recyclingbeton und Recyclingbaustoffen darzustellen und künftige Potenziale aufzuzeigen.

Hierbei war es uns wichtig, einen Bogen von der Herstellung des Recyclingmaterials, über die Aufbereitung bis hin zur Weiterverarbeitung zu spannen, um die Arbeit als ein Großes und Ganzes behandeln zu können. Dabei ist uns besonders wichtig zu erfahren, wo die Massen an Bauschutt herkommen, wie sie weiterverarbeitet werden, und was mit dem aufbereiteten Material passiert.

Am 01.01.2016 ist in Österreich die Recycling-Baustoffverordnung in Kraft getreten. Im Rahmen dieser Arbeit wollen wir bezüglich dieser Verordnung Nachforschungen anstellen, ob die gesetzlichen Vorgaben einen wirtschaftlichen Einsatz von Recyclingbeton zulassen. Dabei werden Aspekte wie die Aufbereitung des Recyclingmaterials, die Hemmnisse des breiten Einsatzes, internationale Vergleiche, Best-Practice Projekte sowie die nationale Normenlage und der ökologische Einfluss bei der Anwendung von Recyclingbeton behandelt.

Um sich genauer mit dem Thema Recyclingbeton auseinanderzusetzen, werden Betonproben mit Anteilen von Gesteinskörnungen aus Betonabbruch und aus Hochbaurestmasse (Beton-Ziegel-Splitt) anhand von Versuchen miteinander verglichen. Bei den Zusammensetzungen werden die gesetzlichen Vorgaben bewusst überschritten, um neue Erkenntnisse feststellen zu können.

Ein weiterer Bereich dieser Arbeit soll der Umweltaspekt und die damit zusammenhängende Kreislaufwirtschaft im Bauwesen darstellen. Damit soll erläutert werden, was sich in Zukunft ändern muss, um auch in der Baubranche einen positiven Einfluss auf die Umwelt zu bewirken.

Wir haben uns deswegen für dieses Thema entschieden, weil wir während unserer fünfjährigen Ausbildung in der HTL 1 kaum mit dem Thema Recycling, Abbruch, Recyclingbeton oder Kreislaufwirtschaft in Berührung gekommen sind. Mit dem Verfassen dieser Arbeit wollen wir auf den bisher unbeachteten Baustoff aufmerksam machen und dadurch neue Erkenntnisse über den Einsatz mit rezykliertem Gesteinskörnung erlangen. Weiters sind wir der Überzeugung, dass Recyclingbeton zu einem Baustoff der Zukunft wird, über den wir jetzt schon gerne mehr erfahren wollen.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung.....	II
Danksagung	III
Kurzfassung	IV
Abstract	V
Ziel und Veranlassung	VI
Inhaltsverzeichnis.....	VII
1 Recycling von mineralischem Bauschutt.....	1
1.1 Motivation und Gründe für Recycling	1
1.2 Überblick über Bau- und Abbruchabfälle.....	2
1.3 Rechtliche und normative Vorgaben.....	3
1.3.1 Abfallrahmenrichtlinie der EU.....	3
1.3.2 Bundesverfassungsgesetz (BVG)	3
1.3.3 Abfallwirtschaftsgesetz	3
1.3.4 Recycling-Baustoffverordnung.....	4
1.3.5 Deponieverordnung	9
1.3.6 ÖNORM B 3140	9
1.3.7 Richtlinie Recycling- Baustoffe	11
1.4 Einsatzgebiete von Recycling-Baustoffen.....	13
1.5 Abbruch und Trennung von Bau- und Abbruchabfällen	16
1.5.1 Demontage und Schadstoffentfrachtung.....	16
1.5.2 Maschineneinsatz beim Rückbau.....	20
1.5.3 Abtransport zur Aufbereitungsanlage.....	20
1.6 Massenstromanalyse von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen.....	22
1.7 Technische Aufbereitung des mineralischen Bauschuttes.....	27
1.7.1 Mobile Aufbereitungsanlagen.....	29
1.7.2 Semimobile Aufbereitungsanlagen	29
1.7.3 Stationäre Aufbereitungsanlagen	30
1.7.4 Zerkleinerungsanlagen	30
1.7.5 Trennung von Fremdstoffen	31
1.7.6 Klassierungsanlagen	32
1.7.7 Platzinfrastruktur	32
1.7.8 Einsatzgebiete von mobilen Aufbereitungsanlagen	33
1.7.9 Einsatzgebiet von stationären Aufbereitungsanlagen	33

2	Recycling-Beton.....	34
2.1	Herkömmlicher Primärbeton.....	34
2.1.1	Beton und seine Geschichte.....	34
2.1.2	Bestandteile von Beton	35
2.2	Vorgaben für Recyclingbeton	37
2.2.1	ÖNORM B 4710-1 Anhang E	37
2.3	Ökologische Kennwerte und internationaler Vergleich von Recyclingbeton	41
2.3.1	Ökologische Kennwerte von Recyclingbeton.....	41
2.3.2	Internationale Best-Practice Beispiele von Recyclingbeton	43
2.3.3	Internationaler Vergleich der Normung anhand des Beispiels Schweiz	44
2.4	Technische Eigenschaften von Recyclingbeton.....	49
2.4.1	Druckfestigkeit	49
2.4.2	Biegezugfestigkeit	50
2.4.3	Steigerung des Wassergehalts	50
2.4.4	Spaltzugfestigkeit	50
2.4.5	Elastizitätsmodul	50
2.5	Einsatzgebiete von Recyclingbeton	51
2.6	Hemmnisse für den breiten Einsatz von Recyclingbeton.....	53
3	Umweltaspekt	55
3.1	Kreislaufwirtschaft.....	55
3.1.1	Lebenszyklus am Beispiel eines Gebäudes	56
3.1.2	Probleme der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen.....	58
3.1.3	Ausblick in die Zukunft	59
4	Versuche.....	61
4.1	Veranlassung und Zielsetzung	61
4.2	Versuchskonzept	62
4.2.1	Übersicht	62
4.2.2	Erläuterung.....	63
4.3	Rezyklierte Gesteinskörnungen.....	63
4.3.1	RH-B Material	63
4.3.2	RB-A2 Material	67
4.4	Mischberechnung	68
4.4.1	Betonsorte.....	68
4.4.2	Konsistenz und Größtkorn	68
4.4.3	Oberflächenwassergehalt und Kernfeuchteansatz.....	69
4.5	Betonprüfungen	71

4.5.1	Frischbetonprüfungen.....	71
4.5.2	Festbetonprüfungen.....	72
4.6	Ergebnisse.....	73
4.7	Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	77
4.7.1	Ausbreitmaß und Konsistenz	77
4.7.2	Druckfestigkeit	78
4.7.3	Spaltzugfestigkeit	80
4.7.4	Biegezugfestigkeit	80
4.7.5	Elastizitätsmodul	80
4.7.6	Einfluss der Aufbereitung von RH-B.....	81
4.8	Schlussfolgerungen zu den Versuchen.....	81
4.9	Offene Fragen	82
5	Zusammenfassung.....	83
	Quellenverzeichnis	86
	Abbildungsverzeichnis.....	88
	Tabellenverzeichnis.....	91

1 Recycling von mineralischem Bauschutt

1.1 Motivation und Gründe für Recycling

Der bekannte Begriff „Recycling“ den wir alle kennen, gibt es schon seit etwa Mitte der 1970-er Jahre. Dieses Wort kommt aus dem Lateinischen und bedeutet: re- = wieder, zurück und der Zyklus => recycling.

„Recycling ist ein Kunstwort und heißt so viel wie „die Gewinnung von Schadstoffen und Rohmaterialien aus Abfall und deren Einführung in einen Wiederverwendungskreislauf“.¹

Die weltweite Nachfrage nach Recycling - und Entsorgungstechnologien steigt immer weiter an, denn die Rohstoffe werden immer knapper und das Thema „Umweltaspekt“ rückt immer mehr in den Vordergrund. Das Ziel ist es, die Abfallmassen so gering wie nur möglich zu halten. Daher gewinnt das Recyceln von Materialien immer mehr an Bedeutung. Die einzelnen Unternehmen sind und werden in Zukunft verstärkt gesetzlich zur Einsparung und Wiederverwendung von natürlich vorkommenden Ressourcen gezwungen. Mit abfallarmen Produktionsweisen und geeigneten Recyclingverfahren ist es möglich den Anstieg der Abfallmengen zu reduzieren.

Beachtet man die angeführten Aspekte nicht, kann es zur Umweltzerstörung und zu negativen sozialen Auswirkungen kommen. Die Recyclingbranche ist aufgrund der hohen Anforderungen in den meisten Bereichen auf einem guten Weg und befriedigt somit den weltweiten Bedarf. Im Kreislauf des umweltgerechten Bauens in der Bauwirtschaft ist der letzte und wichtige Punkt die Verwendung und Wiederverwertung von Recyclingbaustoffen. Der Nachweis von Recycling und Baurestmassen in Bauwerken lässt sich bis in die 1990-er Jahre zurückführen.²

Wirtschaftlich nüchtern betrachtet wird erst dann recycelt, wenn die Verwertung der Reststoffe günstiger ist als die Entsorgung und Neubeschaffung von Rohstoffen. Recycling von Baustoffen und Baurestmassen liegt daher in hohem Maß auch in der Verantwortung der Unternehmen, die Baustoffrecycling betreiben. Die meisten Unternehmen in der Bauwirtschaft sprechen sich dafür aus, da der Umweltgedanke und die Ökologie im Baugewerbe immer mehr an Bedeutung gewinnen.³

¹ 2016_Book_Recyclingtechnik, S. 21

² Vgl. 2016_Book_Recyclingtechnik, S. 22,23

³ Vgl. 2016_Book_Recyclingtechnik, S. 21,22

1.2 Überblick über Bau- und Abbruchabfälle

Bei Bau- und Abbruchabfällen handelt es sich um Abfälle, die bei Bau- und Abbruchtätigkeiten anfallen (z. B. bei Umbau, Renovierung, Sanierung, Reparatur, etc.). Grundsätzlich können mineralische Abfälle, nicht-mineralische Abfälle, gefährliche Abfälle und (Boden)Aushubmaterialien unterschieden werden.⁴

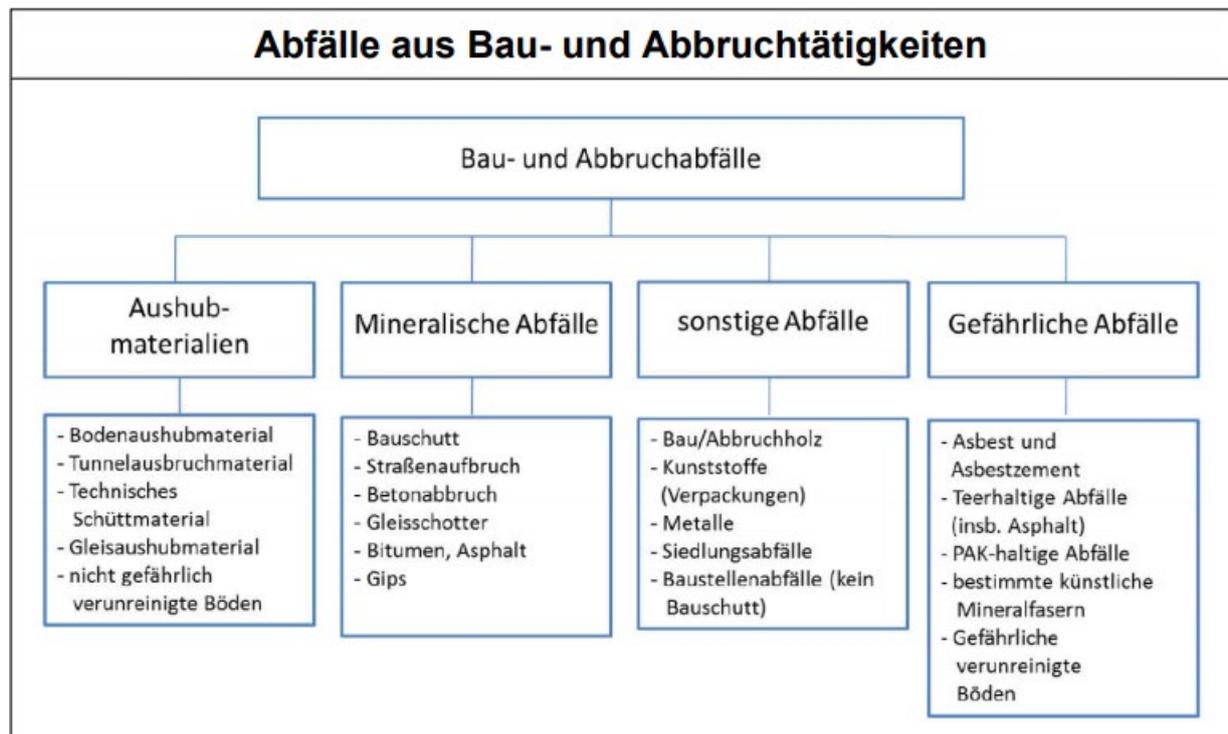


Abbildung 1.: Abfälle aus Bau- und Abbruchtätigkeiten

“Mineralischer Bauschutt” ist demnach streng genommen gemischter, mineralischer Abfall beim Bau- und Abbruch von Bauten (in der Grafik als “Bauschutt” in der Rubrik “Mineralische Abfälle” angeführt).

In dieser Arbeit wird aber auch “Betonabbruch” unter dem Begriff “Mineralischer Bauschutt” geführt. Mengenmäßig stellt mineralischer Bauschutt nach den Aushubmaterialien die größte Abfallmenge dar (siehe Abschnitt 1.6 Massenstromanalyse).⁵

⁴ Vgl. UBA-Datenanalyse zur Behandlung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen in Österreich, S.9

⁵ Vgl. UBA-Datenanalyse zur Behandlung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen in Österreich, S.9

1.3 Rechtliche und normative Vorgaben

1.3.1 Abfallrahmenrichtlinie der EU

Gemäß Abfallrahmenrichtlinie der EU (RL 2008/98/EG in der Fassung der RL 2018/851/EU) sind Bau- und Abbruchabfälle, Abfälle, die durch Bau- und Abbruchtätigkeiten entstehen. Die Abfallrahmenrichtlinie ist in nationales Recht umzusetzen. Entsprechend einer der Zielvorgaben sind bis zum Jahr 2020 mindestens 70% der nicht gefährlichen Bau- und Abbruchabfälle (ausgenommen sind die Materialmengen aus Bodenaushub) einer Wiederverwendung oder einem Recycling zuzuführen sind. Diese Forderung ist voraussichtlich erfüllt, weil in Österreich der allergrößte Anteil der Gesamtmenge an nicht gefährlichen Bau- und Abbruchabfällen einer Aufbereitung zu Recyclingbaustoffen zugeführt wird.

Mit der Recycling-Baustoffverordnung des Bundes (i.d.F. BGBl. II 290/2016) wurde in Richtung Kreislaufwirtschaft bereits ein wichtiger Schritt gesetzt (siehe Abschnitt 1.3.4).⁶

1.3.2 Bundesverfassungsgesetz (BVG)

Das Bundesverfassungsgesetz ist ein wesentlicher Bestandteil des heute geltenden Rechtsbestandes. Darin wird darauf verwiesen, dass die Sauberhaltung der Umwelt, Reinhaltung der Luft, des Wassers und des Bodens für uns Menschen wichtig ist.

Um dies zu gewährleisten, wurden eine Reihe von Bundes- und Landesgesetzen beschlossen.⁷

1.3.3 Abfallwirtschaftsgesetz

Das aktuelle Abfallwirtschaftsgesetz AWG, das im Jahre 2002 das AWG BGBl. Nr. 325/1990 ablöste, dient als Grundlage für die behördlichen Tätigkeiten. Das AWG beinhaltet die Ziele und Grundsätze der Abfallwirtschaft, Definitionen, den grundsätzlichen Abfallbegriff, sowie die Einrichtung und Pflichten.

⁶ Vgl. UBA-Datenanalyse zur Behandlung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen in Österreich, S.23,24,25

⁷ Vgl. Siegfried Schneller, Diplomarbeit- Baustoff-Recycling im Hochbau, S.14

Das AWG 2002 basiert auf einer Anwendungshierarchie:



Abbildung 2.: Anwendungshierarchie des Abfallwirtschaftsgesetz 2002

- Abfallvermeidung

Die Abfallvermeidung bedeutet das Verhindern von Abfall. Durch diese Verhinderung bzw. eine Verlängerung der Lebensdauer von Produkten kann die Abfallmenge eingedämmt werden. Dadurch wird die schädliche Einwirkung auf die Umwelt reduziert.

- Vorbereitung zur Wiederverwendung

Dies beschreibt den Vorgang, in dem Materialien geprüft, gereinigt oder repariert wird.

- Recycling

„(...) jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfallmaterialien zu Produkten, Sachen oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden. Es schließt die Aufbereitung organischer Materialien ein, aber nicht die energetische Verwertung und die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind“⁸

- Sonstige Verwertung

Darunter versteht man die energetische Verwertung, Aufbereitung und die Verfüllung.

- Beseitigung

Davon spricht man, wenn man trotz der Rückgewinnung von Stoffen oder Energie die Abfälle nicht wiederverwerten kann.⁹

1.3.4 Recycling-Baustoffverordnung

Die Recycling- Baustoffverordnung (RBV) wurde am 29. Juli 2015 im Bundesgesetzblatt II 181/2015 erstmals kundgemacht und mit dem Bundesgesetzblatt II 290/2016 kurze Zeit später novelliert. Sinn der Verordnung ist, eine Kreislaufwirtschaft zu bilden und die Materialeffizienz zu steigern.

⁸ Siegfried Schneller, Diplomarbeit- Baustoff-Recycling im Hochbau, S.15-16

⁹ Vgl. Siegfried Schneller, Diplomarbeit- Baustoff-Recycling im Hochbau, S.14-16

Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Wiederverwertung von Bauteilen. Dabei sollen Recyclingprodukte mit möglichst hoher Qualität entstehen. Die Recycling-Baustoffverordnung gilt für alle Bau- und Abbruchtätigkeiten und die davor herausgehenden Abfälle, für die Herstellung und Verwertung von Recyclingbaustoffen natürlicher oder industriell hergestellter Gesteinskörnungen und für alle Recycling-Baustoffe die im Abfallwirtschaftsgesetz § 5 Abs.2 aufgelistet sind.¹⁰

„§3 Begriffsbestimmung

16. Recycling-Baustoff- eine aus Abfällen hergestellte natürliche, industriell hergestellte oder rezyklierte Gesteinskörnung, die gemäß der EU-Bauprodukte-Verordnung als Baustoff verwendet werden kann;

17. Recycling-Baustoff-Produkt- ein Recycling-Baustoff, welcher entsprechend dieser Verordnung das Ende der Abfalleigenschaft erreicht hat;“¹¹

Nach dem § 7 Abs. 3 der Verordnung sollen für Verwendung und Herstellung von Recycling- Baustoffen folgende Stoffe vermieden werden: Asbest, künstliche Mineralfaser, (H)FCKW, PAK, PCB, Phenole, Mineralöle, Gips (führt oft zu Problemen bei Mauerwerksabbrüchen, die so nicht recycelt werden können, da eine Trennung nicht möglich ist), Magnesit- und Zementgebundene Holzwoolledämmplatten, Zementgebundener Holzspanbeton, Brandschutzplatten und Kunstmarmor. Abfälle, die mit diesen Stoffen verunreinigt sind oder aus offensichtlich kontaminierten Bereichen stammen, dürfen nicht für die Herstellung von Recycling-Baustoffe herangezogen werden.

Um dies auch sicherzustellen, hat der Produzent der Recycling-Baustoffe bei der Übernahme von dem abgebrochenen Material, welches aufbereitet werden soll, eine visuelle Kontrolle durchzuführen, ob die Restmassen zur Weiterverarbeitung geeignet sind. Weiters hat der Recycler sicherzustellen, dass die hergestellten Recycling-Baustoffe umweltverträglich sind.

Um die Umweltverträglichkeit der Recycling-Baustoffe zu garantieren, müssen die Baustoffe einer analytischen Untersuchung unterzogen werden. Diese Untersuchung muss nach dem Standardverfahren zur Qualitätssicherung von Recycling- Baustoffen ausgeführt werden. Dieses Verfahren ist im Anhang 3 Punkt 1 der Recycling- Baustoffverordnung erläutert. Erst nach dieser Untersuchung kann das Recyclingmaterial einer Qualitätsklasse entsprechend seiner Eluatgehalte und Gesamtgehalte zugeordnet werden.

¹⁰ Vgl. Bundesgesetzblatt für die österreichische Republik: Recycling-Baustoffverordnung, Wien: Ministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2016, S.1

¹¹ Bundesgesetzblatt für die österreichische Republik, Recycling-Baustoffverordnung, S.2

Im §13 „Zulässige Einsatzbereiche und Verwendungsverbote“ werden den Qualitätsklassen Einsatzbereiche zugeordnet. Für die Herstellung von Recyclingbeton darf Abbruchmaterial der Klassen U-A, U-B, U-E und H-B verwendet werden. Jedoch dürfen Normalbetone und Schwerbetone mit rezyklierten Gesteinskörnungen nicht in Schutzgebieten gemäß Wasserschutzgesetz, in ausgewiesenen Kernzonen von Schongebieten, in Oberflächengewässern oder unterhalb der Kote des höchsten Grundwasserstandes verwendet werden.¹²

Weiters hat die Herstellung aller Recycling-Baustoffe nach §11 immer dem aktuellen Stand zu entsprechen. Im Fall von Recyclingbeton bezieht sich der neueste Stand auf die ÖNORM B 4710-1 Anhang E (Beton und Recyclingbeton, siehe Abschnitt 2.2.1) und der ÖNORM B 3140 (Rezyklierte Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Anwendungen sowie für Beton; siehe Abschnitt 1.3.6).¹³

In den Abbildungen 4 und 5 im Kapitel 1.4 ist ein Überblick über das gesamte Einsatzgebiet von mineralischem Bauschutt dargestellt.

Die Anwendung der Recycling-Baustoffe hängt natürlich auch von der Qualitätsklasse ab. Die Zuordnung zur Qualitätsklasse erfolgt nach den Vorgaben der Baustoff-Recyclingverordnung auf Basis von chemischen Analysen:

¹² Vgl. Bundesgesetzblatt für die österreichische Republik, Recycling-Baustoffverordnung, S.6

¹³ Vgl. Bundesgesetzblatt für die österreichische Republik, Recycling-Baustoffverordnung, S.4,5

Recycling von mineralischem Bauschutt

Parameter	Einheit	Qualitätsklasse	
		U-A	U-B
Eluat bei L/S 10			
pH-Wert		7,5 1) bis 12,5 2)	
el. Leitfähigkeit	mS/m	150 2) 3)	150 2) 3)
Chrom ges.	mg/kg TM	0,60	1,0 4)
Kupfer	mg/kg TM	1,0	2,0
Nickel	mg/kg TM	0,40	0,60
Ammonium-N	mg/kg TM	4,0	8,0
Chlorid	mg/kg TM	800	1 000
Nitrit-N	mg/kg TM	2,0	2,0
Sulfat	mg/kg TM	2 500	6 000 4) 3)
TOC	mg/kg TM	100	200
Gesamtgehalt			
Blei	mg/kg TM	150	150/500 6) 7)
Chrom ges.	mg/kg TM	90/300 7)	90/700 7)
Kupfer	mg/kg TM	90/300 7)	90/500 7)
Nickel	mg/kg TM	60/100 7)	60 8)
Quecksilber 9)	mg/kg TM	0,70	0,70
Zink	mg/kg TM	450	450
KW-Index 10)	mg/kg TM	150	200
∑16PAK (EPA)	mg/kg TM	12,0	20
Verunreinigung			
FL 11)	cm ³ /kg	≤ 4	≤ 5
Rg+X 12)	M-%	≤ 1	≤ 1

Tabelle 1. Parameter und Grenzwerte für Gesteinskörnungen für den ungebundenen sowie für den hydraulischen oder bituminösen gebundenen Einsatz

Parameter	Einheit	Qualitätsklasse
		H-B
Eluat bei L/S 10		
pH-Wert	mg/kg TM	bis 12,5 2)
Chrom ges.	mg/kg TM	1,0 4)
Kupfer	mg/kg TM	2,0
Ammonium-N	mg/kg TM	8,0
Chlorid	mg/kg TM	1 000
Sulfat	mg/kg TM	6 000
TOC	mg/kg TM	200
Gesamtgehalt		
Blei	mg/kg TM	150/500 6) 7)
Chrom ges.	mg/kg TM	90/700 7)
Kupfer	mg/kg TM	90/500 7)
Nickel	mg/kg TM	60 8)
Quecksilber	mg/kg TM	0,70
Zink	mg/kg TM	450
KW-Index 10)	mg/kg TM	200
∑16PAK (EPA)	mg/kg TM	20
Verunreinigung		
FL 11)	cm ³ /kg	≤ 5
Rg+X 12)	M-%	≤ 1

Tabelle 2. Parameter und Grenzwerte für Gesteinskörnungen, die ausschließlich zur Herstellung von Beton ab der Festigkeitsklasse C 12/15 oder für die Herstellung von Beton der Festigkeitsklasse C 8/10 ab der Expositionsklasse XC1 gemäß ÖNORM B 4710-1 verwendet werden.

Dem entsprechend darf Recycling-Material entsprechend seiner Qualitätsklasse für folgende Einsatzbereiche verwendet werden:

Qualitätsklasse	Beschreibung	ungebundene Anwendung ¹⁾ ohne gering durchlässige, gebundene Deck- oder Tragschicht	ungebundene Anwendung ¹⁾ unter gering durchlässiger, gebundener Deck- oder Tragschicht	Herstellung von Beton ab der Festigkeitsklasse C 12/15 oder der Festigkeitsklasse C 8/10 ab der Expositionsklasse XC1	Herstellung von Asphaltmischgut
U-A (ungebunden – A)	Gesteinskörnungen für den ungebundenen sowie für den hydraulisch oder bituminös gebundenen Einsatz	Ja	Ja	Ja	Ja
U-B (ungebunden – B)	Gesteinskörnungen für den ungebundenen sowie für den hydraulisch oder bituminös gebundenen Einsatz	Nein	Ja ²⁾	Ja	Ja
U-B (ungebunden – E)	Gesteinskörnungen für den ungebundenen sowie für den hydraulisch oder bituminös gebundenen Einsatz	Ja ³⁾	Ja ²⁾	Ja	Ja
H-B (für hydraulische Bindung – B)	Gesteinskörnungen ausschließlich zur Herstellung von Beton ab der Festigkeitsklasse C 12/15 oder der Festigkeitsklasse C 8/10 ab der Expositionsklasse XC1	Nein	Nein	Ja	Nein
B-B (für bituminöse Bindung – B)	Gesteinskörnungen (insbesondere Ausbaupasphalt) zur Herstellung von Asphaltmischgut	Nein	Nein ⁴⁾	Nein	Ja
B-C (für bituminöse Bindung – C)	Gesteinskörnungen (insbesondere Ausbaupasphalt) zur Herstellung von Asphaltmischgut	Nein	Nein	Nein	Ja ⁵⁾
B-D (für bituminöse Bindung – D)	Gesteinskörnungen (insbesondere Ausbaupasphalt) zur Herstellung von Asphaltmischgut	Nein	Nein ⁴⁾	Nein	Ja ⁵⁾
D (Stahlwerksschlacke D)	Gesteinskörnungen aus Stahlwerksschlacken direkt aus der Produktion ausschließlich zur Herstellung von Asphaltmischgut	Nein	Nein	Nein	Ja ⁶⁾

¹⁾ Einschließlich Herstellung von Beton unter der Festigkeitsklasse C 12/15 oder bis zur Festigkeitsklasse C 8/10 unter der Expositionsklasse XC1.

²⁾ Verwendung gemäß § 13 Z 1 (sofern nicht eine wasserrechtliche Bewilligung für den Einsatz des Recycling-Baustoffes vorliegt; nicht in Schutzgebieten, nicht in ausgewiesenen Kernzonen von Schongebieten, nicht in ausgewiesenen engeren Schongebieten, nicht im und unmittelbar über dem Grundwasser und nicht in Oberflächengewässern).

³⁾ Nur im Trapez des Gleiskörpers als Tragschicht (§ 13 Z 4).

⁴⁾ Ein Recycling-Baustoff der Qualitätsklasse B-B und B-D aus Asphalt, der durch Fräsen gewonnen wird, darf auch für die Herstellung von ungebundenen oberen Tragschichten gemäß § 13 Z 9 verwendet werden.

⁵⁾ Bei einem PAK-Gesamtgehalt (16 PAK nach EPA) zwischen 20 mg/kg TM und 300 mg/kg TM ist die Verwendung ausschließlich in eingehäuteten Heißeischanlagen mit Dämpferfassung und -behandlung aus dem Mischprozess zulässig. Die Dämpferfassung und -behandlung muss die Freisetzung von Schadstoffen, insbesondere TOC, KW und PAK, nach dem Stand der Technik verhindern. Das Asphaltmischgut hat den Grenzwert von 20 mg/kg TM einzuhalten.

⁶⁾ Verwertung nur zulässig unter Einhaltung der Einsatzbereiche und Verwendungsverbote des § 17.

Tabelle 3. Tabellarische Zuordnung der Qualitätsklassen zu den Einsatzbereichen und Verwendungsverböten

1.3.5 Deponieverordnung

Die Deponieverordnung ist im Jahr 2008 erschienen und behandelt das Deponieren mit den ausgehenden Gefahren für Menschen, Tiere unter Umwelt. Diese Verordnung regelt den Stand der Technik sowie die Ausstattung und die Betriebsweise von Abfalldeponien. Bei Baurestmassendeponien dürfen Metalle, Kunststoffe, Holz oder andere organische Materialien maximal 10% des Volumens ausmachen.¹⁴

1.3.6 ÖNORM B 3140

Die ÖNORM B 3140 "Rezyklierte Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Anwendungen sowie für Beton" ist 2020-11-01 neu erschienen. Demnach hat die Klassifizierung der Bestandteile von groben, rezyklierten Gesteinskörnungen nach den Bestimmungen der ÖNORM EN 12620 und der ÖNORM EN 13242 zu erfolgen. Man unterscheidet:¹⁵

- R_c Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauersteine aus Beton
- R_u ungebundene Gesteinskörnung, Naturstein, hydraulische gebundene Gesteinskörnung
- R_b Mauerziegel (d. h. Mauersteine und Ziegel), Kalksandsteine, nichtschwimmender Porenbeton
- R_a bitumenhaltige Materialien
- R_g Glas
- FL schwimmendes Material, als Volumenanteil angegeben
- X sonstige Materialien:
 - Bindige Materialien (d.h. Ton und Böden)
 - verschiedene Materialien: (eisen. Und nicht eisenhaltige) Metalle, nichtschwimmende Holz, Kunststoff und Gummi, Gips

Für die Betonerzeugung darf nur eine rezyklierte Gesteinskörnung eingesetzt werden, die die Anforderungen der ÖNORM B 4710-1 erfüllt. Die Mindestanforderungen werden in der unten angeführten Abbildung dargestellt.¹⁶

¹⁴ Vgl. Siegfried Schneller, Diplomarbeit- Baustoff-Recycling im Hochbau, S.21-22

¹⁵ Vgl. ÖNORM-B 3140- Rezyklierte Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Anwendungen sowie für Beton, S.6

¹⁶ Vgl. ÖNORM B 3140, S.7

Recycling von mineralischem Bauschutt

Bezug zur ÖNORM EN 12620:2014		Bei CE-Kennzeichnung anzugebende Kategorien ^a bzw. Werte	
Abschnitt	Merkmal		
6.4.1	Bestandteile gemäß ÖNORM EN 12620, die das Erstarrungs- und Erhärtungsverhalten des Betons verändern:		
	a) Humusgehalt gemäß ÖNORM EN 1744-1:1998, 15.1	bestanden	
	b) Fulvosäuregehalt (bei Anzeige eines hohen Humusgehaltes) gemäß ÖNORM EN 1744-1:1998, 15.2. Diese Prüfung ist nur durchzuführen, falls die Prüfung gemäß a) nicht bestanden wird.	bestanden	
	c) Druckfestigkeitsprüfung - Erstarrungszeit gemäß ÖNORM EN 1744-1:1998, 15.3. Diese Prüfung ist nur durchzuführen, falls die Prüfung gemäß b) nicht bestanden wird.	bestanden	
	d) Leichtgewichtige, organische Verunreinigungen gemäß ÖNORM EN 1744-1:1998, 14.2	feine Gesteinskörnung: $\leq 0,3\%$ der Masse, $\leq 0,5\%$ der Masse, angegebener Wert, keine Anforderung	grobe Gesteinskörnung: $\leq 0,1\%$ der Masse, angegebener Wert, keine Anforderung
	e) Einfluss auf den Erstarrungsbeginn von Zement gemäß ÖNORM EN 1744-6	A_{10} Wenn diese Kategorie eingehalten wird, kann davon ausgegangen werden, dass die Anforderungen gemäß 6.4.1, a) und b) erfüllt sind.	
6.4.2.1	Zerfall von Dicalciumsilikat gemäß ÖNORM EN 1744-1	keine Anforderung; bei Verdacht auf Hochofenstüchschlacke kein Zerfall gemäß ÖNORM EN 1744-1:2013, 19.1	
6.4.2.2	Eisenzerfall gemäß ÖNORM EN 1744-1	keine Anforderung; bei Verdacht auf Hochofenstüchschlacke kein Zerfall gemäß ÖNORM EN 1744-1:2013, 19.2	
6.5	Karbonatgehalt von feinen Gesteinskörnungen, CO ₂ -Gehalt gemäß ÖNORM EN 196-2	auf Anforderung anzugeben: $\leq 5,0\%$, $\leq 15,0\%$, keine Anforderung	
^a	Die Kategorie „NR“ oder „nicht gefordert“ führt in der Herstellererklärung zur Angabe „NPD“ („no performance determined“).		
^b	Bei Gesteinskörnungen, mit denen Erfahrung bei der Betonherstellung vorliegt, gilt SC ₁₀ ohne gesonderten Nachweis als erfüllt.		
^c	Aufgrund der Begrenzung des Feinanteilgehaltes (f_3) gilt diese Anforderung als bestanden.		
^d	Im Allgemeinen an der Korngruppe 8/16, wenn die anderen gleichwertig sind. Der Nachweis der Frostbeständigkeit durch eine Prüfung der Wasseraufnahme nach ÖNORM EN 1097-6 ist nicht zulässig.		

Tabelle 4.: Mindestanforderungen an rezyklierte Gesteinskörnungen

Bezug zur ÖNORM EN 12620:2014		Bei CE-Kennzeichnung anzugebende Kategorien ^a bzw. Werte	
Abschnitt	Merkmal		
4.2	Korngrößen zur Festlegung von Korngruppen	0, 1, 2, 4, 5, 8, 11, 16, 22, 32, 45 und 63 (Grundsiebsatz + Ergänzungssiebsatz 1)	
4.3	Korngrößenverteilung gemäß ÖNORM EN 933-1	$G_{C85/20}$, $G_{C90/15}$, G_{F85} , G_{A90}	
4.3	Verminderte Grenzabweichungen für die vom Hersteller angegebene typische Kornzusammensetzung von feinen Gesteinskörnungen	gemäß ÖNORM EN 12620:2014, Tabelle C.1	
4.4	Kornform von groben Gesteinskörnungen gemäß ÖNORM EN 933-3	F_{NR}	
4.4	Kornform von groben Gesteinskörnungen gemäß ÖNORM EN 933-4	SI_{15} , SI_{20} , SI_{40} oder SI_{NR}	
4.5	Muschelchalengehalt grober Gesteinskörnungen gemäß ÖNORM EN 933-7	SC_{10}^b , SC_{NR}	
4.6	Gehalt an Feinanteilen gemäß ÖNORM EN 933-1	grob: $f_{1,5}$ Kornmisch: f_3 fein: f_3	
4.7	Qualität der Feinanteile	bestanden ^c , keine Anforderung	
5.2	Widerstand gegen Zertrümmerung von groben Gesteinskörnungen gemäß ÖNORM EN 1097-2:1998, Abschnitt 5, geprüft an der Korngruppe 8/11	LA_{20} , LA_{NR}	
5.3	Widerstand gegen Verschleiß von groben Gesteinskörnungen gemäß ÖNORM EN 1097-1	M_{DENR}	
5.4.1	Widerstand gegen Polieren gemäß ÖNORM EN 1097-8	PSV_{50} , PSV_{NR}	
5.4.2	Widerstand gegen Oberflächenabrieb gemäß ÖNORM EN 1097-8:1998, Anhang A	AAV_{NR}	
5.4.3	Widerstand gegen Abrieb durch Spikereifen gemäß ÖNORM EN 1097-9	AN_{NR}	
5.5	Kornrohichte gemäß ÖNORM EN 1097-6 bzw. ONR 23303	als ρ_a anzugeben: geforderte Bandbreite 0,06 Mg/m ³ (z. B. 2,70 Mg/m ³ bis 2,76 Mg/m ³)	
5.7.1	Frost- und Tauwiderstand von groben Gesteinskörnungen gemäß ÖNORM EN 1367-1	F_{1d} , F_{2d} , F_{NR}	
–	Frost- und Tauwiderstand von feinen Gesteinskörnungen gemäß ONR 23303	FS_7 , keine Anforderung	
5.7.2	Raumbeständigkeit - Schwinden infolge von Austrocknen gemäß ÖNORM EN 1367-4	bestanden ($\leq 0,075\%$)	
5.7.3	Alkali-Kieselsäure-Reaktivität gemäß ÖNORM B 3100	Beanspruchungsklasse 1 oder 2, keine Anforderung	
5.8	Klassifizierung der Bestandteile von groben, rezyklierten Gesteinskörnungen gemäß ÖNORM EN 933-11	gemäß Tabelle 2	
6.2	Gehalt an säurelöslichen Chloriden gemäß ÖNORM EN 1744-5	chloridfrei (bei Chlorid-Gehalten $\leq 0,01\%$) bzw. ermittelter Wert, anzugeben auf 0,01 % genau	
6.3.1	Gehalt an säurelöslichen Sulfaten gemäß ÖNORM EN 1744-1	$AS_{0,8}$	
6.3.2	Gesamtschwefelgehalt gemäß ÖNORM EN 1744-1:1998, Abschnitt 11	bei Verdacht auf Hochofen-Stüchschlacke: $\leq 2\%$ der Masse, andere Gesteinskörnungen: keine Anforderung	
6.3.3	Gehalt an wasserlöslichen Sulfaten gemäß ÖNORM EN 1744-1	$SS_{0,2}$	

Tabelle 5.: Mindestanforderungen an rezyklierte Gesteinskörnungen (fortgesetzt)

Die Bestandteile einer rezyklierten Gesteinskörnung gemäß ÖNORM EN 12620 lassen sich infolgende Kategorien einteilen:

Materialbezeichnung	Beispiel	Kategorien nach Bestandteilen					
		<i>Rc</i>	<i>Rc +Ru</i>	<i>Rb</i> ^a	<i>Ra</i>	<i>X + Rg</i>	<i>FL</i>
RB-A1	sortenreiner Betonbruch, z. B. im Fertigteilwerk, Betonstraßen	<i>Rc</i> ₉₀	<i>Rcu</i> ₉₅	<i>Rb</i> _{NR}	<i>Ra</i> ₁₋	<i>XRg</i> ₁₋	<i>FL</i> _{0,2-}
RB-A2	Betonbruch	<i>Rc</i> ₉₀	<i>Rcu</i> _{NR}	<i>Rb</i> _{NR}	<i>Ra</i> ₁₀₋	<i>XRg</i> ₁₋	<i>FL</i> ₂₋
RG-A3 ^b	wiederaufbereitete, natürliche Gesteinskörnungen, z. B. gebrochener Gleis-schotter	<i>Rc</i> _{NR}	<i>Rcu</i> ₉₅	<i>Rb</i> _{NR}	<i>Ra</i> ₅₋	<i>XRg</i> ₁₋	<i>FL</i> _{0,2-}
RH-B	aufbereiteter Hochbausplitt (mindestens 50 % Betonanteile)	<i>Rc</i> ₅₀	<i>Rcu</i> ₇₀	<i>Rb</i> ₃₀₋	<i>Ra</i> ₅₋	<i>XRg</i> ₁₋	<i>FL</i> ₂₋
RMH-C	aufbereitete mineralische Hochbaurestmasse	<i>Rc</i> _{NR}	<i>Rcu</i> _{NR}	<i>Rb</i> _{NR}	<i>Ra</i> ₁₀₋	<i>XRg</i> ₁₋	<i>FL</i> ₂₋

^a Masseanteil von glasierter Keramik höchstens 5 %
^b Masseanteil von mindestens 50 % *Ru*

Tabelle 6: Kategorien für die Bestandteile von rezyklierten Gesteinskörnungen

1.3.7 Richtlinie Recycling- Baustoffe

Diese Richtlinie des Österreichischen Baustoff-Recycling Verbandes (ÖBRV) beinhaltet Regelungen und Anforderungen zum Herstellen von Recycling-Baustoffen im Sinne des Güteschutzes. Das Gütezeichen für Recycling-Baustoffe ist eine gesetzlich geschützte Marke und wird zur Kennzeichnung von Recycling-Baustoffen vergeben. Es ist ein Zeichen dafür, dass diese die umwelt- und bautechnischen Anforderungen einhalten und die darüberhinausgehenden Vorgaben des Güteschutzes, wie Transparenz und zusätzliche unabhängige Überwachung, erfüllen. Gütegeschützte Recycling-Baustoffe unterliegen den Kontrollen durch den unabhängig agierenden, gemeinnützigen Verein "Österreichischer Güteschutzverband Recycling-Baustoffe (GSV)".

Obwohl sie keine gesetzliche Richtlinie darstellt, haben sich alle namhaften Recycling-Betriebe diesen Qualitätskriterien angeschlossen. Die Richtlinie stellt somit die Qualitätsbasis im Handel von Recycling - Baustoffen dar.¹⁷

Die Qualitätsanforderungen müssen als erstes bei der Anlieferung, Sortierung, Aufbereitung und Lagerung erfüllt werden.

¹⁷ Vgl. Siegfried Schneller, Diplomarbeit- Baustoff-Recycling im Hochbau, S.43,44

- Anlieferung

Bei der Anlieferung werden die Baurestmassen mittels einem Baurestmassennachweis-Formular, das zum Nachweis der Herkunft dient, überprüft. Dabei wird festgestellt, ob dieses Material zum Recyceln geeignet ist. Handelt es sich um kontaminiertes Material, wird eine Vorsortierung durchgeführt. Danach sieht man, ob dieses Material die erforderlichen Qualitätskriterien erfüllt.

- Sortierung und Lagerung

Eine Sortierung ist notwendig, um die Qualitäts- und Güteklassen überprüfen zu können. Die Richtlinie weist darauf hin, dass man die Materialien getrennt nach Klassen lagern muss.

- Aufbereitung

Nur jene Aufbereitungsanlagen und Anlageteile dürfen verwendet werden, die auch dafür vorgesehen sind.¹⁸

Güteklassen

- Güteklasse 1

Dieser Recycling-Baustoff wird für die obere und untere Tragschicht im Straßenbau, sowie für eine hydraulisch gebundene Tragschicht verwendet.

- Güteklasse 2

Dieser Recycling-Baustoff wird für die untere ungebundene Tragschicht im Straßenbau, sowie für eine hydraulisch gebundene Tragschicht verwendet.

- Güteklasse 3,4

Dieser Recycling-Baustoff wird für eine hydraulisch gebundene Tragschicht und für Schüttmaterialien für den Straßenbau, Parkplätze, Auffüllungen verwendet.

- Güteklasse S

Dieser Recycling-Baustoff wird für die obere und untere ungebundene Tragschicht im Straßenbau verwendet.

- Sieblinienbereich

Beim Zeitpunkt der Anlieferung muss ein Nachweis der Verdichtbarkeit und der Tragfähigkeit, sowie der Gesteinskörnungen vorzuweisen sein.¹⁹

¹⁸ Vgl. Siegfried Schneller, Diplomarbeit- Baustoff-Recycling im Hochbau, S.44

¹⁹ Vgl. Siegfried Schneller, Diplomarbeit- Baustoff-Recycling im Hochbau, S.46

1.4 Einsatzgebiete von Recycling-Baustoffen

In der unten angeführten Tabelle werden die Recycling-Baustoffe nach deren Zusammensetzung und deren Verwendung anschaulich dargestellt.²⁰

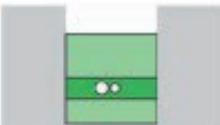
<p>ZIEGELBRUCH Herkunft: Ziegelproduktion, Abbruch</p> 	<p>RZ Recycelter Ziegelsand, Recycelter Ziegelsplitt (vorwiegend Ziegel)</p> 	<p>Qualitätsbaustoff für Zuschlagstoff für die Produktion von Mauerwerksteinen, Beton u. Leichtbeton; Stabilisierungen, Drainageschichten, Füllungen, Schüttungen</p>  <p><i>weitere für:</i> - Dachbegrenzungen - Landschaftsbau</p>
<p>HOCHBAU/ZIEGELBRUCH Herkunft: Wohnbau- und Hochbauabbruch</p> 	<p>RHZ Recycelter Hochbauziegelsand Recycelter Hochbauziegelsplitt (Ziegel [über 30 %] mit z.B. Betonanteil)</p> 	<p>Qualitätsbaustoff für Zuschlagstoff für die Produktion von Mauerwerksteinen, Beton u. Leichtbeton; Stabilisierungen, Füllungen, Schüttungen, Estriche</p> 
<p>HOCHBAUABBRUCH Herkunft: Industriebau- und Allgemeiner Hochbauabbruch</p> 	<p>RH Recycelter Hochbausand Recycelter Hochbausplitt (Ziegel [unter 30 %] mit z.B. Betonanteil)</p> 	<p>Qualitätsbaustoff für stabilisierte Schüttungen, stabilisierte Künnettenverfüllungen, Bauwerkshinterfüllungen, Sportplatzbau</p>  <p><i>weitere für:</i> - Sportplätzebau - Landschaftsbau - Lad- und forwirtschaftlichen Wegebau</p>
<p>MINERALISCHE HOCHBAU-RESTMASSEN Herkunft: Industriebau- und Allgemeiner Hochbauabbruch</p> 	<p>RMH Recycelte mineralische Hochbau-Restmassen (Beton, Ziegel, natürliches Gestein)</p> 	<p>Qualitätsbaustoff für Künnettenverfüllungen, Hinterfüllungen, Schüttungen, Sportplatzbau-Drainage</p> 
<p>RECYCLING-SAND Herkunft: Industriebau- und Allgemeiner Hochbauabbruch</p> 	<p>RS Recycling-Sand</p> 	<p>Qualitätsbaustoff für die Bettung von Energie- und Fernmeldekabeln (Kabelsand), von Leitungsrohren, z.B. von Kanal-, Gas- und Wasserleitungsrohren; sowie für weitere Infrastruktureinrichtungen</p> 

Abbildung 3: 10 Qualitätsbaustoffe der Baurestmassenverwertung

²⁰ Vgl. GSV 2020-Güteschutz in Österreich, S.14,15

ASPHALTAUFBRUCH

Herkunft: Straßenbau



RA

Recyciertes gebrochenes Asphaltgranulat (vorwiegend Asphalt)



Qualitätsbaustoff für

ungebundene obere Tragschichten, ungebundene untere Tragschichten, gebundene Tragschichten, landwirtschaftlichen Wegebau, Zuschlagstoff für Asphaltproduktion



BETONABBRUCH

Herkunft: Straßenbau, Brückenbau, Industriebau



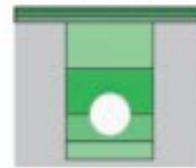
RB

Recyciertes gebrochenes Betongranulat (vorwiegend Beton)



Qualitätsbaustoff für

ungebundene obere und untere Tragschichten, zementgebundene Tragschichten, landwirtschaftlichen Wegebau, Zuschlagstoff für Betonproduktion, hochwertiges Künettenfüllmaterial, Drainageschichten



ASPHALT/BETONABBRUCH

Herkunft: Straßenbau, Parkplätze, Brückenbau



RAB

Recyciertes gebrochenes Asphalt/Beton-Mischgranulat (Asphalt und Beton)



Qualitätsbaustoff für

ungebundene obere Tragschichten, ungebundene untere Tragschichten, gebundene Tragschichten, landwirtschaftlichen Wegebau



MINERALISCHE RESTMASSEN

Herkunft: Straßenbau



RM

Recyciertes gebrochenes Mischgranulat aus Beton, Asphalt und natürlichem Gestein



Qualitätsbaustoff für

ungebundene obere Tragschichten, ungebundene untere Tragschichten, gebundene Tragschichten



RECYCLIERTES GESTEIN

Herkunft: Eisenbahnbau, Straßenbau



RG

Recyciertes Granulat aus Gestein, Beton und/oder Asphalt



Qualitätsbaustoff für

ungebundene obere Tragschichten, ungebundene untere Tragschichten, gebundene Tragschichten



Abbildung 4: 10 Qualitätsbaustoffe der Baurestmassenverwertung

Diese Materialien finden Verwendung im:

Tiefbau:

- Straßen- und Wegebau
 - Frostschutzschichten
 - Schottertragschichten
 - Hydraulisch gebundene Tragschichten
 - Deckschichten
 - Baustraßen
 - RC-Gesteinskörnung in Rückenstützbeton
 - Bankettmaterial
 - Dammschüttungen
 - Rampen

- Erd-/ Deponiebau
 - Lärm- und Sichtschutzwälle
 - Deponieersatzbaustoff
 - Untergrundverbesserung, Bodenaustausch
 - Bettungsmaterial
 - Ver- und Hinterfüllmaterial
 - Garten- und Landschaftsbau

Hochbau:

- Recycling-Beton / ressourcenschonender Beton
- Sauberkeitsschicht unter Fundament

Sonstiges:

- Block- und Pflastersteine aus Recycling-Beton
- Ziegelherstellung mit RC-Ziegelsand²¹

²¹ 04-11_Broschüre_Einsatz_von_mineralischen_Recycling-Baustoffen_im_Hoch-_und_Tiefbau, S.8

Die unten angeführte Tabelle gibt nochmals einen groben Überblick über die Einsatzgebiete der Recycling-Baustoffe. Die Abkürzungen der Baustoffe wurden bereits zuvor erklärt.²²

Einsatzgebiet		RZ	RHZ	RH	RMH	RS	
		III	III	III	III	IV	III
hydraulisch gebunden	Mauer-, Hohlblocksteine	●	●	●			
	Beton	○	○	○	□		
	Leichtbeton	○	○	○	□		
	Estrich, Estrichschüttungen	○	○	○	□		
	Untergrundverbesserung/Stabilisierung	□	□	□	□		
ungebunden	Schüttungen	○	○	○	●	○	
	Verfüllungen von Leitungsgräben und Überschütten von Leitungen	○	○	○	●	○	●
	Bettungsmaterial für Leitungszonen	○	○	○	○		
	Hinterfüllungen und Überschüttungen von Bauwerken				●	○	
	Sportstättenbau als Deckschicht und Streuschicht	●	● ¹	● ¹	● ¹		
	Substrate zur Begrünung	●	● ¹	● ¹	● ¹		
	Recycling-Baustoffe im Deponiebau				●	○	
	Drainagematerial (ausgenommen Deponiebau)				□	○	
	Fließfähiges selbstverdichtendes Künnettenmaterial	□	□	□	□	□	□
● ... Geeignet ○ ... Eignung muss nachgewiesen werden □ ... Zur Eignung bedarf es einer Prüfung gemäß anwendungsspezifischer Regelwerke (ÖNORM, RVS,...) ¹ ... Ziegelanteil muss angegeben werden							

Abbildung 5.: Einsatzbereiche für Recycling-Baustoffe

1.5 Abbruch und Trennung von Bau- und Abbruchabfällen

1.5.1 Demontage und Schadstoffentfrachtung

Die Technischen Vorschriften für Abbrucharbeiten und die Vertrags- und Vergabeordnung für Bauleistungen bilden die Grundlage zur Ausführung der Abtrags- und Beseitigungsarbeiten und deren sinnvollen Einsatz von Maschinen. Die Wahl der Rückbau- und Abbruchmethoden richtet

²² Vgl. Siegfried Schneller, Diplomarbeit- Baustoff-Recycling im Hochbau, S.76

sich je nach Gegebenheiten am Einsatzort. Daher ist der Abbruch von einem Gebäude eine große Aufgabe im Bauwesen.

Die Demontage wird in vier verschiedene Schritte eingeteilt. Im ersten Schritt erfolgt der zerstörungsfreie Abbau von Geräten, Türen oder Fenstern, um einen Weiterverkauf zu ermöglichen. Der zweite Schritt ist die Demontage und Materialtrennung bei technischen Einbauten wie Dach und Dachstuhl. Betrachtet man diesen Schritt genauer kann man in zwei Gruppen unterscheiden. Zum einen gibt es die lösbaren Verbindungen wie Schrauben, Stifte, Welle-Nabe-Verbindungen, Pressverbindungen und Schnappverbindungen. Zum anderen die nicht lösbaren Verbindungen wie Klebungen, Lötverbindungen, Schweißnähte oder Nieten. Bei nicht lösbaren Verbindungen muss eine zerstörende Zerlegmethode angewandt werden. Bei Klebe- und Lötverbindungen können auch thermische Verfahren zur Trennung verwendet werden. Allgemein kommt es bei diesem Schritt zu einem geregelten Ablauf an Arbeitsschritten, die je nach Möglichkeit mechanisiert sind. Es verbleibt jedoch meist ein erheblicher Anteil, der händisch verarbeitet werden muss.

Der dritte Schritt ist der Abbau von Schadstoffen, die in dem Gebäude enthalten sind. Dies stellt eine schwere Aufgabe dar, da man verhindern sollte, dass Schadstoffe in die Umwelt freigesetzt werden. Die Schadstoffentfrachtung erfolgt meist als händischer Arbeitsschritt. Teilweise wird das auch unter Einsatz von speziellen Entnahmegерäten erleichtert. Die Schadstoffentnahme umfasst die Betriebsmedien, Batterien, Quecksilber oder andere Komponenten.

Als vierter und letzter Schritt erfolgt die Abtragung des Bauwerkes, der sogenannte sukzessive und selektive Rückbau und der Abbruch des Gebäudes. Die einzelnen Komponenten werden anschließend mit den anderen Baustoffen in den Wiederverwendungszyklus eingeführt.^{23 24}

Detaillierte Informationen zu den einzelnen Schritten finden sich auch in dem Leitfaden des Landes Oberösterreich zur Recycling-Baustoffverordnung (https://www.land-oberoesterreich.gv.at/files/publikationen/AUWR_Leitfaden_Recycling_Baustoffverordnung.pdf)

²³ Vgl. 2016_Book_Recyclingtechnik, S. 29,30,31

²⁴ Vgl. Thomas Kühn: Anwendungsmöglichkeiten von Recyclingbeton im Hochbau- und Ingenieurbau, Akademiker Verlag, S.23,77

1.5.1.1 Abbruchverfahren für reine Baustoffe:

Abtragen:

Unter Abtragen versteht man das schichtweise Abbrechen von Mauerwerk, Beton, Holz, Stahl und anderen Baustoffen mit der Hand oder besonderen Maschinen. Mit einem Abbruch-Hammer am Hydraulikbagger kann man schneller ein Gebäude abbrechen als manuell mit der Hand.

Abgreifen:

Beim Abgreifen werden Bauwerksteile mittels Greifer oder Zange mechanisch abgetragen. Dieses Verfahren erfordert den Einsatz schwerer Geräte, die eine hohe Standfestigkeit besitzen. Bis heute werden fast ausschließlich Seilbagger verwendet.

Einschlagen:

Abbrechen eines Bauwerks mittels einer Fallbirne. Diese Fallbirne ist meistens an einem Seilbagger montiert. Um eine Gefährdung durch herabfallende Bauwerksteile zu vermeiden sollten die Trümmer in das Innere des Bauwerks fallen.

Eindrücken

Das Eindrücken erfolgt mittels eines hydraulischen Gerätes. Dadurch wird das Bauwerk zum Einsturz gebracht. Das Eindrücken erfolgt durch eine direkte Kraftübertragung von einer hydraulischen Maschine. Bei flachen Bauwerken wird ein Flachbagger oder ein Radlader verwendet. Bei hohen Bauwerken kommt ein Hydraulikbagger zum Einsatz.

Einreißen

Beim Einreißen wird das Gebäude durch Ziehen zum Einsturz gebracht. Es wird eine Zugvorrichtung oder ein Hydraulikbagger verwendet. Voraussetzung dafür ist ein freier Raum und ein ausreichender Abstand der Zugvorrichtung zum Bauwerk. Als Zugvorrichtung kommt ein Bagger, Raupe, Lader oder LKW zum Einsatz.

Demontieren

Unter Demontieren versteht man das zerstörungsfreie Zerlegen einer baulichen Anlage. Dies funktioniert durch Lösen der vorhandenen Verbindungen oder durch Abtrennen, Sägen oder autogenes Schneiden. Diese Art wird verwendet, um die Konstruktionsteile wiederzuverwenden.

Sprengen

Beim Sprengen werden Bauwerke mit Hilfe von Explosionen oder Spaltgeräten in Teile zerlegt oder zum Einstürzen gebracht. Dieses Verfahren kommt zum Einsatz, wenn andere Methoden zu umständlich sind oder kein Platz vorhanden ist. Drei Methoden, die Lockerungssprengung, die Zertrümmerungssprengung oder die Einsturzsprengung werden unterschieden. Bei einer Sprengung muss die Umgebung abgesichert werden.

Bohrung

Mit Kernbohrungen werden tiefe Löcher erstellt. Mit einem Rohrbohrer, der mit Diamanten besetzt ist, wird unter Zugabe von Wasser die Kernbohrung durchgeführt.

Betonsäge

Das Trennen mittels einer Säge wird beim Abbruch als vorbereitende Maßnahme verwendet, um das Einschlagen oder das Eindrücken zu erleichtern. Man unterscheidet Fugenschneiden, Wandsägen, Stichsägen oder Seilsägen.

Thermisches Trennen

Thermisches Trennen ist das Schmelzen von Baustoffen bei sehr hohen Temperaturen. Diese Methode wird beim Abbruch von Spannbetonteilen oder beim Abbruch, wo kein Lärm verursacht werden darf, verwendet. Diese Anwendung setzt ein gewisses Fachkenntnis bzw. Erfahrung voraus.

Pressen- Hydraulisches Spalten

Dabei kommen Hydraulikzylinder, Pressen und Hydraulikteile zum Einsatz. Voraussetzung dafür ist ein geringer Bewehrungsgrad.

Hochdruckwasserstrahlbearbeitung

Bei dieser Methode wird mit einem Wasserstrahl zwischen 1000 und 4000 bar unter Hochdruck auf den Beton gezielt. Der Einsatz dieser Methode wird bei kleinen Vorhaben verwendet, wo die Dicke 35 cm nicht überschreitet.

Schrämmfräsen

Bei dieser Methode wird die Oberfläche von Beton mit Schleif- und Fräsmaschinen bearbeitet.²⁵

²⁵ Vgl. Sonja Mayer- Bestandserfassung und Planung von Abbruchmaßnahmen unter besonderer Berücksichtigung von schadstoffhaltigen Baustoffen und kontaminierten Bereichen, S. 46-52

1.5.1.2 Abbruchverfahren für schadstoffhaltige Baustoffe

Beim Abbruch von schadstoffhaltigen Baustoffen werden 2 Maßnahmen unterschieden, nämlich Reinigen und Rückbau.

Reinigen

Bei besonders stark kontaminierten Flächen müssen diese vor dem Abbruch gereinigt werden. Dies erfolgt durch Absaugen oder durch eine Nassreinigung. Beim Reinigen muss eine persönliche Schutzausrüstung getragen werden. Vor und nach dem Reinigen muss eine Raumluftmessung durchgeführt werden, um den Erfolg der Arbeit zu überprüfen.

Rückbau

Beim Rückbau wird das Bauwerk einzeln und Schicht für Schicht abgetragen. Durch den schrittweisen Abbau des Objektes kann man die Bauteile die Schadstoffe enthalten einzeln demontieren. Zu den Schadstoffen zählen u.a. PCB, PCP und Lindan behandelte Hölzer.²⁶

1.5.2 Maschineneinsatz beim Rückbau

Für den Abbruch von Gebäuden und Bauwerksteilen müssen Geräte und Maschinen mit verschiedensten Funktionen eingesetzt werden. Meistens werden Mobil- und Raupenbagger, Radlader und Planiertrauben eingesetzt. Diese Baufahrzeuge haben meistens keine Straßenzulassung, daher dürfen sie nur auf der Baustelle in Betrieb genommen werden. An den baulichen Fahrzeugen können verschiedene Anbauten wie Greifer, Schaufeln, Meißeln oder Scheidewerkzeuge montiert werden. Diese Anbauten werden an den Bagger je nach örtlichen Gegebenheiten verwendet. Der Radlader ist wichtig zum Anhäufen von Material und zum Beladen von Kippern. Er verfügt über verschiedenste Anbauten wie Schaufel, Gabeln oder anderen Hebewerkzeugen. Zum Beräumen oder auch zum Ebnen von Flächen wird die Planiertraube verwendet.²⁷

1.5.3 Abtransport zur Aufbereitungsanlage

Für die Herstellung von Qualitäts-Recyclingbaustoffen wird meist eine aufwendige Aufbereitungstechnik verwendet. Der Bauschutt muss in der Regel zu einer anderen Örtlichkeit gebracht werden, um ihn dort weiter behandeln zu können. Für den Transport von Schüttgütern wie Erdaushub, Sand, Kies, Schutt, Schotter und Abbruchmaterial werden verschiedenste Nutzfahrzeuge mit speziellen Anbauten verwendet. Die Produktpalette umfasst Kippaufbauten, Sattelaufleger, Asphalt- und Gesteinsmulden sowie einen Abroll- und Absetzkipper. Die Fahrzeuge

²⁶ Vgl. Sonja Mayer- Bestandserfassung und Planung von Abbruchmaßnahmen unter besonderer Berücksichtigung vonschadstoffhaltigen Baustoffen und kontaminierten Bereichen, S.52-55

²⁷ Vgl. 2016_Book_Recyclingtechnik, S. 30

müssen eine hohe Qualität aufweisen um die Zuverlässigkeit, Robustheit und Langlebigkeit zu garantieren. Der Baustellenkipper zählt zu den bekanntesten und meistverwendeten Transportgeräten im Baugewerbe. Der Baustellenkipper beinhaltet auch mehrere Ausführungen. Er kann als mehrachsiger Baustellenkipper oder auch als Baukipper-Sattelzug verwendet werden. Mit hydraulischen Bewegungen der Ladefläche kann diese meist nach hinten oder auch seitlich abgeladen werden. Die Kipper werden mittels Radlader oder Baggern beladen. Der Baukipper ist eine spezielle Form des Lastkraftwagens und besitzt eine Straßenzulassung.²⁸

²⁸ Vgl. 2016_Book_Recyclingtechnik, S. 32.33.34

1.6 Massenstromanalyse von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen

Vom Österreichischen Umweltbundesamt (UBA) wurde im Jahr 2019 eine “Datenanalyse zu Behandlung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen in Österreich” als Detailstudie zum Bundes-Abfallwirtschaftsplan publiziert, unter anderem auch Input-Output-Analysen (Massenstromanalyse).

Die Grundlage für die Auswertungen sämtlicher abfallwirtschaftlicher Daten, wie beispielsweise der Input in Behandlungsanlagen für mineralische Bau- und Abbruchabfälle bzw. der entsprechende Output, basiert auf dem Abfallwirtschaftlichen Datawarehouse (AWDWH), welches wiederum auf die Basisdaten des “Elektronisches Datenmanagement Umwelt (EDM)” des Bundesministeriums zugreift.²⁹

In Gesamt-Österreich werden von den Abfallbehandlern sehr hohe Mengen, insgesamt 12,8 Mio. to, an mineralischen Bau- und Abbruchabfällen (Output-Massen) bearbeitet (siehe folgende Grafik, Anmerkung: in diesen Mengen ist auch Bodenaushub enthalten). Es handelt sich bei diesen Angaben ausschließlich um Mengen, die in Aufbereitungsanlagen für Baurestmassen eingegangen sind. Erhebliche Abfallmengen an Bodenaushub oder Abbruchholz werden direkt deponiert oder einer thermischen Verwertung zugeführt. Diese werden in dieser Aufstellung jedoch nicht berücksichtigt³⁰

²⁹ Vgl. Datenanalyse zur Behandlung von mineralischem Bau- und Abbruchabfällen in Österreich S. 55

³⁰ Vgl. UBA-Datenanalyse zur Behandlung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen in Österreich S.57,58

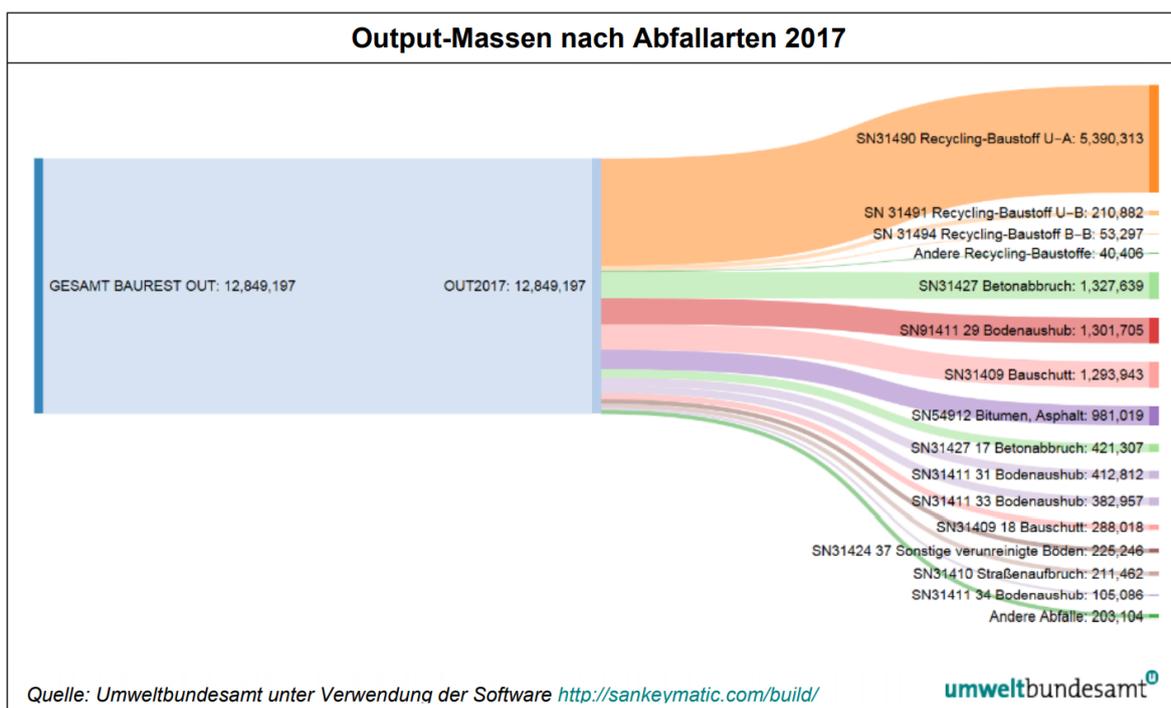


Abbildung 6.: Output-Massen 2017 nach Abfallarten aus Behandlungsanlagen für mineralische Bau- und Abbruchabfälle entsprechend Bundes-Abfallwirtschaftsplan (Angaben in Tonnen)

In der folgenden Grafik ist in Prozenten die Massenstromanalyse von für Österreich repräsentativ ausgewählten 20 Anlagen dargestellt.³¹

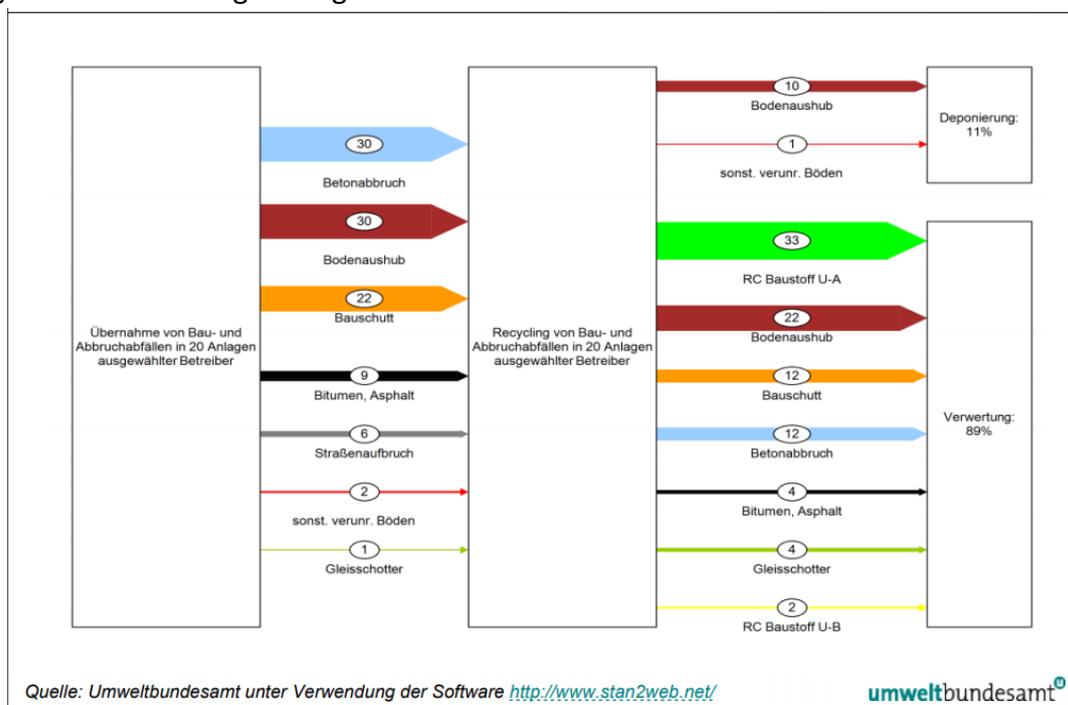


Tabelle 7.: Zusammenfassung der Detailauswertungen von 20 Anlagen ausgewählter Betreiber [Angaben in %] Die Aufteilung der Input-Materialien wird prozentuell in der folgenden Tabelle näher beschrieben.

³¹ Vgl. UBA-Datenanalyse zur Behandlung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen in Österreich, S.51

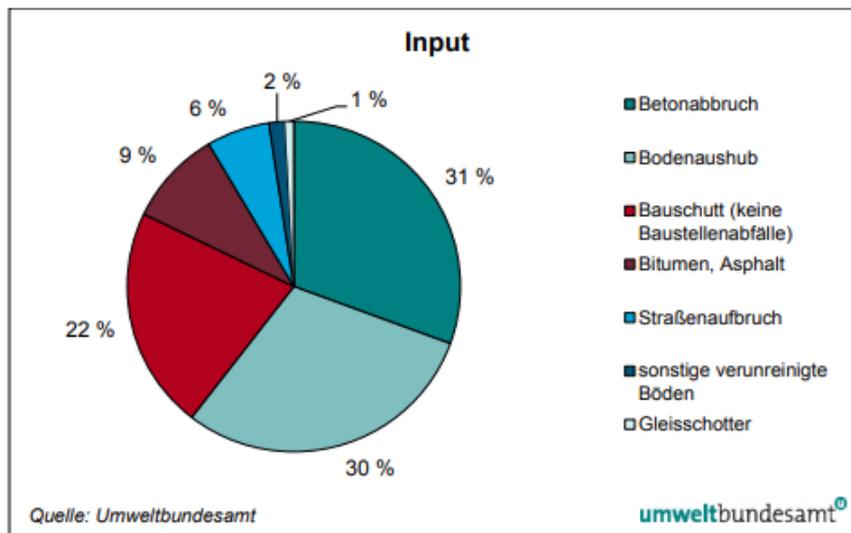


Tabelle 8: Prozentuelle Zusammenstellung der an die analysierten Anlagen übergebenen Bau- und Abbruchabfälle

Bei den Output-Mengen werden die deponierten Massen zwar richtig gemeldet, jedoch kommt es bei den nicht deponierten Massen oft zu einer Fehlbuchung bzw. zu unvollständigen Buchungen. In der folgenden Tabelle wird zwischen Verwertung und Deponierung der Output-Materialien unterschieden.³²

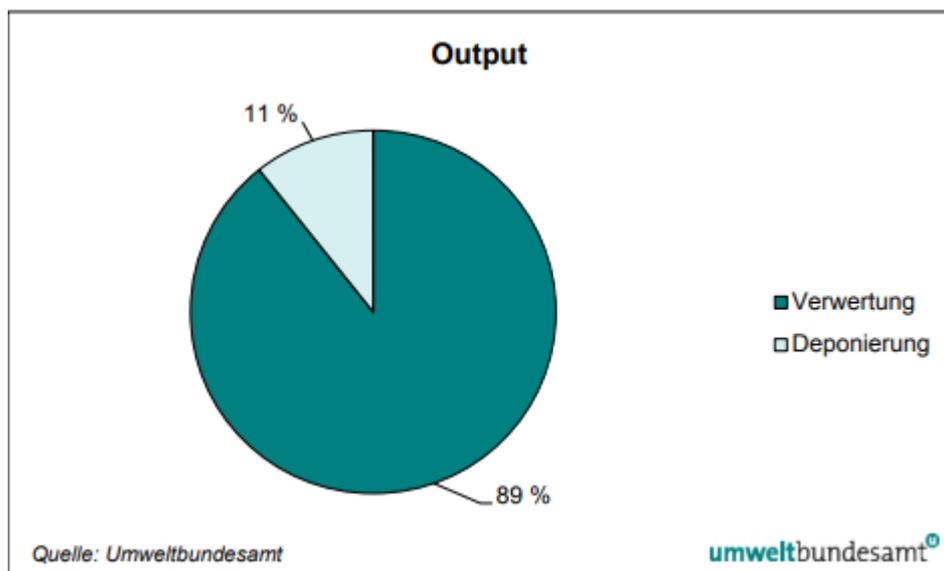


Tabelle 9: Verwertung und Deponierung der Output-Materialien aus den analysierten Anlagen zur Behandlung von Bau- und Abbruchabfällen.

Demnach werden 89% der von den Betreibern von Abfallbehandlungsanlagen übernommen Mengen einer Verwertung zugeführt (Darstellung inkl. Bodenaushub).

³² Vgl. UBA-Datenanalyse zur Behandlung von mineralischem Bau- und Abbruchabfällen in Österreich, S.52

Daten zu Oberösterreich:

Allein in Oberösterreich wurden im Jahr 2019 von den Abfallbehndlern rund 1,89 Mio. Tonnen Bau- und Abbruchabfälle sowie Aushubmaterial als Input angegeben. Als Output wurden rund 1,94 Mio. Tonnen aufgezeichnet. In der folgenden Tabelle werden die Abfallart, Bezeichnung, Input- und Output-Mengen dargestellt (Achtung: Angaben in kg).

Es handelt sich bei diesen Angaben ausschließlich um Mengen, die in Aufbereitungsanlagen für Baurestmassen eingegangen sind. Erhebliche Abfallmengen an Bodenaushub oder Abbruchholz werden direkt deponiert oder einer thermischen Verwertung zugeführt. Diese werden in dieser Aufstellung jedoch nicht berücksichtigt.

Input-Output Analyse OÖ Baurestmassenaufbereitungsanlagen 2019				
Abfallart SN	gef	Bezeichnung	Input	Output
			Gesamt	Gesamt
			[kg]	
			2019	
17201		Holzembalagen und Holzabfälle, nicht verunreinigt	0	1 420
17202		Bau- und Abbruchholz	79 450	41 340
17202-1		Bau- und Abbruchholz z.B.: aus lackiertem oder beschichtetem	0	2 980
17202-2		Bau- und Abbruchholz	1 580	154 280
31220		Konverterschlacke	1 000 000	0
31409		Bauschutt	355 991 936	111 305 860
31409 18		Bauschutt	35 859 822	19 600 180
31410		Straßenaufbruch	45 566 463	9 362 220
31411 29		Bodenaushub	12 360 490	16 678 310
31411 30		Bodenaushub	4 934 280	8 275 600
31411 31		Bodenaushub	258 074 690	204 508 050
31411 32		Bodenaushub	45 499 140	42 591 020
31411 33		Bodenaushub	45 160 260	9 200 020
31411 34		Bodenaushub	1 200 000	0
31412	g	Asbestzement	0	60
31414		Schamotte	60 890	1 200
31423 36		ölverunreinigte Böden	0	96 940
31424-37		sonstige verunreinigte Böden	23 744 710	5 127 110
31427		Betonabbruch	636 242 234	143 364 880
31427 17		Betonabbruch	82 999 790	43 493 380
31434		verbrauchte Filter und Aufsaugmassen mit anwendungsspez	3 860	3 860
31437	g	Abestabfälle, Asbeststäube, auch schwach gebundene Asbe	0	220
31438		Gips	23 980	0
31467		Gleisschotter	38 915 710	49 860
31489		Gießformen und -sande nach dem Gießen	1 127 760	1 118 040
31490		Recycling - Baustoff U-A	11 551 000	1 093 860 200
31491		Recycling - Baustoff U-B	1 705 500	49 310 990
31492		Recycling - Baustoff U-E	0	342 920
31493		Recycling - Baustoff H-B	0	20 871 500
31495		Recycling - Baustoff B-B	20 565 668	10 282 834
31496		Recycling - Baustoff B-D	736 780	33 521 300
31498 10		schlackenhaltiger Ausbausphalt	5 239 650	0
35103		Eisen- und Stahlabfälle verunreinigt	44 894	2 847 736
35310		Kupfer	0	80
35314		Kabel	0	1 020
35315		NE-Metallschrott, NE-Metallembalagen	2 020	58 780
35339	gn	Gasentladungslampen	0	40
54912		Bitumen, Asphalt	269 620 292	114 678 680
91101		Siedlungsabfälle und ähnliche Gewerbeabfälle	0	81 820
91103		Rückstände aus der mechanischen Abfallaufbereitung	0	7 120
91206		Baustellenabfälle	0	82 180
91501		Straßenkehricht	1 229 215	81 400
94702		Rückstände aus der Kanalreinigung	11 200	11 200
			1 899 553 264	1 941 016 630

Tabelle 10: Input-Output Baurestmassenaufbereitung OÖ

Auffällig bei der Auswertung ist, dass der Output aus den Anlagen größer ist als der Input. Dies kann man dadurch erklären, dass:

1. Mengen teilweise geschätzt werden und somit eine entsprechende Abweichung entsteht
2. es bestehende Lager für Baurestmassen gibt, auf denen Aufbereitungsanlagen errichtet werden. In diesen Lagern ist bereits eine entsprechende Lagermenge vorhanden, bevor die Aufbereitungsanlage errichtet wird. Diese werden somit beim Input in die Anlage nicht mehr erfasst. Die Output-Mengen aus der Anlage werden jedoch gemeinsam mit den bestehenden Lagermengen gelagert und übergeben. Daher übersteigen die aufbereiteten Mengen auch die Inputmengen. ³³

Zusammenfassend zur Massenstromanalyse:

Mineralische Abbruchabfälle sind ein bedeutender Anteil der gesamten Abfallmasse in Österreich. Betrachtet man die Kreislaufwirtschaft und den dazugehörigen Abfallstrom erkennt man einen hohen Wert bei der Einsparung von Ressourcen und Energie.

Die ökologischen, wie ökonomischen Vorteile liegen der Abfallwirtschaft sehr am Herzen. Die rechtliche Seite für das Recyceln von Abfällen liefert das Abfallwirtschaftsgesetz und die Recycling-Baustoffverordnung. Österreich hält einen hohen Standard und ist somit ein Vorreiter in Europa beim Recyceln. Nach dzt. Kenntnisstand werden zwar große Mengen an U-A Material hergestellt, dies wird aber nur zu einem geringen Anteil hochwertig wieder im Bauwesen eingesetzt. Genau damit setzt sich diese Diplomarbeit in Zusammenhang mit Recyclingbeton auseinander.³⁴

1.7 Technische Aufbereitung des mineralischen Bauschuttes

Das Ziel der Aufbereitung ist, das Material des Abbruchbauwerkes für einen möglichst hochwertigen Wiedereinsatz aufzubereiten. Durch verschiedene Behandlungsschritte kann man diese Baustoffe je nach Einsatzgebiet und Anforderungen wiedereinssetzen. Die standardisierte Vorgehensweise besteht aus Brechen, Sieben und einer Magnetabscheidung. Grobe Fremdkörper werden mit der Hand entfernt bzw. bei der ersten Siebung aussortiert. Grundsätzlich in der Aufbereitung von Baurestmassen unterscheidet man zwischen mobilen und stationären Aufbereitungsanlagen. Eine Aufbereitungsanlage besteht aus:

³³ Vgl. UBA-Datenanalyse zur Behandlung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen in Österreich, S.5

³⁴ Vgl. UBA-Datenanalyse zur Behandlung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen in Österreich, S.5

- Siebanlage

Die Siebanlage wird mit einem Abbruchmaterial beschickt. Es wird eine Trennung der Größen vorgenommen, dabei kann zusätzlich eine Abscheidung von Metallen mittels Magnetabscheider erfolgen.



Abbildung 7: Siebanlage Wopfinger

- Brechanlage

In dieser Anlage werden die großen Stücke zerkleinert. Hier kann auch wieder ein Magnetabscheider angebracht werden.



Abbildung 8: Brechanlage Hasenöhr

- Manuelle Schadstoffentfernung

Enthaltene Schadstoffe werden mit der Hand entfernt.

- Klassieren

Nach dem Brechen und der Schadstoffentfernung wird das Material noch einmal gesiebt und auf die verschiedenen Korngrößen aufgeteilt.³⁵

³⁵ Vgl. Philipp Kogler- Aufbereitung von Baurestmassen im Hochbau-Planung und Dimensionierung der Einrichtungen, S. 26,27

1.7.1 Mobile Aufbereitungsanlagen

Erfahrungsgemäß ist der Einsatz von mobilen Aufbereitungsanlagen dort sinnvoll, wo das Material vor Ort wieder benötigt wird.

Die Rentabilität des Einsatzes von mobilen Aufbereitungsanlagen ist vor allem bei großen Baustellen, bei denen das aufbereitete Material vor Ort wieder eingesetzt wird, gegeben. Diese Anlagen werden mittels eines Tiefladers transportiert und vor Ort aufgebaut. Die Anlagen werden mittels eines Radladers beschickt.³⁶

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Flexibilität und Transportfähigkeit • Anlagengenehmigung kann einfach erlangt werden • Aufbereitetes Material kann vor Ort wiederverwendet werden • Auch bei kleinen Mengen wirtschaftlich 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Betriebskosten durch Transport, sowie Auf- und Abbau • Verringerung der Qualität durch das Fehlen von Klassier- und Sortieranlagen • Beschränkte Anlagengröße • Hoher Planungsaufwand während des Einsatzes • Störung des Umfeldes durch Lärm und Staub • Geringes Produktangebot

Tabelle 11: Vor und Nachteile von mobilen Aufbereitungsanlagen

1.7.2 Semimobile Aufbereitungsanlagen

Semimobile Aufbereitungsanlagen werden fix oder an flexiblen Orten aufgestellt. Diese Anlagen werden mittels Kräne oder Tieflader verladen. Die Vor- und Nachteile sind weitgehend gleich den mobilen Aufbereitungsanlagen.³⁷

³⁶ Vgl. Philipp Kogler- Aufbereitung von Baurestmassen im Hochbau-Planung und Dimensionierung der Einrichtungen, S. 27,28

³⁷ Vgl. Philipp Kogler- Aufbereitung von Baurestmassen im Hochbau-Planung und Dimensionierung der Einrichtungen, S. 28

1.7.3 Stationäre Aufbereitungsanlagen

Durch die komplexe Beschaffenheit der Anlage kann eine höhere Qualität des Sekundärstoffes erzielt werden. Die hohe Qualität entsteht durch die einzelnen Verfahren. Diese Anlage beinhaltet mehr Behandlungsphasen als die anderen. Sie ist mit dem Boden fest verbunden und kann daher nicht auf anderen Standorten aufgestellt werden.³⁸

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> ● Höheres Angebot an Sekundärprodukten ● Höhere Qualität ● Weniger Lärm- und Staubbelastung ● Niedrige Betriebskosten ● Hohes Fassungsvermögen der Lager ● Anlagengröße variabel 	<ul style="list-style-type: none"> ● Genehmigungsverfahren oft langwierig ● Absatz der aufbereiteten Materialien im Einzugsgebiet nicht regelmäßig ● Hohe Investitionskosten

Tabelle 12: Vor und Nachteile von stationären Aufbereitungsanlagen



Abbildung 9: Stationäre Anlage Hasenöhrl

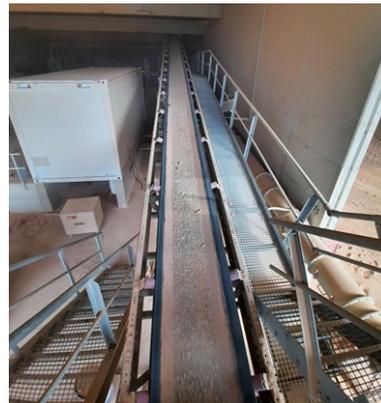


Abbildung 10: Stationäre Anlage Hasenöhrl

1.7.4 Zerkleinerungsanlagen

Das Zerkleinern ist einer der wichtigsten Schritte in der Aufbereitung von Baurestmassen. Bei der Aufbereitung von mineralischen Baustoffen hat man es meistens mit spröden Stoffen zu tun. Bei den Zerkleinerungsmaschinen und Verfahren unterscheidet man:

- Nach der Korngröße
- nach der Härte des Materials

³⁸ Vgl. Philipp Kogler- Aufbereitung von Baurestmassen im Hochbau-Planung und Dimensionierung der Einrichtungen, S. 29

Brecher:

Bei der Zerkleinerung wird hauptsächlich ein Brecher verwendet:

Eigenschaften:	spröde				plastisch oder sehr weich
Brechen:	sehr hart	hart	mittelhart	weich	plastisch
grob , Produkt < 150 mm	Backenbrecher Kegelbrecher	Backenbrecher Kegelbrecher Prallbrecher	Backenbrecher Kegelbrecher Prallbrecher Hammerbrecher	Walzenbrecher Prallbrecher Hammerbrecher	Flügelbrecher
mittel, Produkt < 50 mm	Backenbrecher Kegelbrecher	Backenbrecher Kegelbrecher Prallbrecher	Backenbrecher Kegelbrecher Prallbrecher Hammerbrecher	Walzenbrecher Prallbrecher Hammerbrecher	Flügelbrecher Tonschnitzler
fein, Produkt < 12 mm	(Backenbrecher) Kegelbrecher Hochdruck- Gutbettwalzen- mühlen	(Backenbrecher) Kegelbrecher Feinprallbrecher Hochdruck- Gutbettwalzen- mühlen	Hammermühlen Feinprallbrecher Hochdruck- Gutbettwalzenmühlen	Hammerbrecher Feinprallbrecher (Kollergang)	Kollergang

Tabelle 13: Brecherarten

Mühlen:

Beim Mühlvorgang wird das Material von mindestens 2 Walzen zerkleinert. Die Korngröße des Stoffes ist dasselbe wie der Abstand der Walzen. Mühlen werden jedoch nur selten verwendet.³⁹

1.7.5 Trennung von Fremdstoffen

Die Recycling-Baustoffe können die Qualitätsanforderungen nur dann einhalten, wenn sich in ihnen möglichst keine Fremdstoffe mehr befinden. Daher ist die Abtrennung von Fremdstoffen enorm wichtig. Folgende Trennverfahren werden unterschieden, die auch in Kombination verwendet werden:

³⁹ Vgl. Philipp Kogler- Aufbereitung von Baurestmassen im Hochbau-Planung und Dimensionierung der Einrichtungen, S.30-35

Trockenverfahren

Bei dieser Technik sind Schwerkraft- und Zentrifugalsichter, sowie Quer- und Gegenstromsichter zu unterscheiden. Die Feinteile werden durch einen Gastrom in ein Sichterrohr befördert und die schweren Teile fallen nach unten. Bei den Windsichtern unterscheidet man:

- Zickzacksichter
- Streuwindsichter
- Zyklon-Umluftsichter
- Abweiserradsichter
- Stabkorbsichter

Nassverfahren:

Die Trennung der unterschiedlichen Stoffe erfolgt in einem Wasserbecken, in dem die Fremdmaterialien wie Holz oder Papier auf der Oberfläche aufschwimmen. Das schwere Material mit mineralischem Anteil wird durch das Wasser gereinigt und sinkt auf ein Förderband, das sich am Boden befindet. Beim Nassverfahren kann zwischen Aquamotor und Schnecken-Aufstrom-Sortierer unterschieden werden.

Magnetabscheider:

Der Magnetabscheider zieht die metallischen Stoffe aus dem Material heraus. Man unterscheidet zwischen Unterband- und Überbandmagneten.⁴⁰

1.7.6 Klassierungsanlagen

Eine Klassierung ist nötig, um das Material in verschiedene Korngrößen zu trennen oder zu sieben und unerwünschte Stoffe auszuscheiden.⁴¹

1.7.7 Platzinfrastruktur

Neben der Aufbereitungsanlage sind auch die Infrastruktur der Gesamtanlage und des Platzes zu berücksichtigen. Einige wichtige Punkte, die zur Infrastruktur zählen sind:

- Platzbefestigung
- Platzentwässerung
- Materialsortendifferenzierung

⁴⁰ Vgl. Philipp Kogler- Aufbereitung von Baurestmassen im Hochbau-Planung und Dimensionierung der Einrichtungen, S. 35-38

⁴¹ Vgl. Philipp Kogler- Aufbereitung von Baurestmassen im Hochbau-Planung und Dimensionierung der Einrichtungen, S. 38-41

- Radwaschanlage
- LKW-Dusche
- Sicherstellungsflächen
- Betankungsanlagen
- Stromversorgung
- Arbeiterschutz⁴²

1.7.8 Einsatzgebiete von mobilen Aufbereitungsanlagen

Mobile Anlagen sind von den örtlichen Behörden zu genehmigen. Für die Genehmigung sind Art und Zweck der Anlage, ökologische Kriterien, Anlagenbeschreibung, erwartenden Abfälle sowie Emissionen vorzulegen. Eine mobile Anlage darf maximal 6 Monate am selben Standpunkt betrieben werden. ⁴³

1.7.9 Einsatzgebiet von stationären Aufbereitungsanlagen

Da diese Anlagen mit dem Untergrund verbunden sind gibt es dafür andere Genehmigungsbedingungen. Für die Genehmigung von stationären Anlagen ist das AWG 2002 verantwortlich. ⁴⁴

⁴² Vgl. Philipp Kogler- Aufbereitung von Baurestmassen im Hochbau-Planung und Dimensionierung der Einrichtungen, S. 41

⁴³ Vgl. Philipp Kogler- Aufbereitung von Baurestmassen im Hochbau-Planung und Dimensionierung der Einrichtungen, S. 45

⁴⁴ Vgl. Philipp Kogler- Aufbereitung von Baurestmassen im Hochbau-Planung und Dimensionierung der Einrichtungen, S. 45-46

2 Recycling-Beton

2.1 Herkömmlicher Primärbeton

2.1.1 Beton und seine Geschichte

Beton, der Baustoff des 20. Jahrhunderts, ist in vielerlei Hinsicht ein, für die heutige Zeit, unverzichtbares Produkt. Neu ist das Wissen über den beliebten Verbundwerkstoff grundsätzlich nicht, denn schon vor 14.000 Jahren wurde Kalk im Nahen Osten als Bindemittel verwendet. Weiters wurde auch im römischen Reich 37 n. Chr. ein Gemisch aus Kalk und Puzzolan, als hydraulisches Bindemittel angewandt. Ein weiterer Zusatzstoff, der bis heute noch Verwendung findet, ist Trass. Bereits im 1. Jahrhundert n. Chr. erfanden die Römer das so genannte „opus caementitium“, was sich vom Lateinischen: „Opus“ bedeutet Werk, Bauwerk und „caementitium“ heißt so viel wie Zuschlagstoff oder Bruchstein ableitet. So bekam der Zement seinen Namen. Der Baustoff „opus caementitium“, auch Kalkbeton oder römischer Beton genannt, setzte sich aus gebranntem Kalk, Wasser und Sand zusammen. Das Endprodukt konnte hohe Druckfestigkeiten standhalten sodass historische Gebäude wie die Kuppel des Pantheon oder zahlreiche Aquädukte mit diesem simplen Werkstoff errichtet werden konnten. Die Römer schufen zahlreiche bekannte Bauwerke mit Kalkbeton, welche wir nach 2000 Jahren noch immer bewundern dürfen. Im Mittelalter wurde das Wissen vergessen und so fand der Verbundwerkstoff erst im 18. Jahrhundert wieder seine Anwendung. Ab diesem Zeitpunkt entwickelte sich der Baustoff „Beton“ immer weiter.

Der Engländer J. Smeaton begann im Jahr 1755 mit der Entwicklung des Betons. Er fand heraus, dass zur hydraulischen Erhärtung des Zements immer ein bestimmter Teil Ton beigelegt werden musste. Durch J. Aspdin wurde 1824 der moderne Beton durch die Entdeckung des Portlandzements eingeleitet. Ein weiterer Fortschritt war die Erfindung des Stahlbetons von dem Franzosen J. Monier. So wurden dem Werkstoff viele weitere Anwendungsbereiche ermöglicht, denn er konnte ab diesem Zeitpunkt als Leichtbeton aber auch als Spannbeton eingesetzt werden.

Das Verbundmaterial aus Wasser, Zement und Gesteinskörnung bietet in allen Sparten der Baubranche eine große Palette an Einsatzmöglichkeiten. Ab dem 19. Jahrhundert fand so der Beton im Hoch- und Brückenbau seine Einsatzmöglichkeiten. Egal ob in Platten, Balken, Stützen, Fachwerken oder Fundamenten, Beton ist aus der heutigen Bauweise nicht mehr wegzudenken.⁴⁵

⁴⁵Vgl. Kühn, Anwendungsmöglichkeiten von Recyclingbeton im Hoch- und Ingenieurbau, S. 7-9

2.1.2 Bestandteile von Beton

Der Verbundwerkstoff lässt sich grundsätzlich in drei Grundbestandteile unterteilen. Diese sind Bindemittel, Wasser und Gesteinskörnung. Weiters werden auch Zusatzmittel verwendet, um dem Beton bestimmte Fähigkeiten, wie Liquidität oder langsames Aushärten, abzugewinnen. Jede einzelne Zutat des Betons ist entscheidend für seine Kennwerte.⁴⁶

2.1.2.1 Bindemittel

Für die Herstellung von Beton oder auch Mörtel wird das hydraulische Bindemittel namens Zement verwendet. Der Kontakt mit Wasser löst bei Zement eine Reaktion aus, wodurch dieser aushärtet. Das Besondere dieses Produkts ist seine hydraulische Fähigkeit, weswegen der Verbundwerkstoff in Wasser oder an der Luft aushärten kann. Das daraus entstandene Produkt namens Zementstein weist wasserbeständige Fähigkeiten auf. Das Bindemittel wird bei der Betonproduktion als Klebstoff zwischen den Gesteinskörnungen verwendet und ist einer der ausschlaggebenden Faktoren der Festigkeit des Betons. Genau aus diesem Grund sollen alle kleinen Hohlräume, so gut es geht, mit Zement ausgefüllt werden.⁴⁷ Das Verhältnis zwischen Wasser und Zement ist entscheidend für die Festigkeit des Betons und wird W/B- Wert genannt.⁴⁸

2.1.2.2 Gesteinskörnung

Die Gesteinskörnung wird auch als Zuschlagstoff bezeichnet. Meistens besteht sie aus Kies, Sanden und Splitten. Die Zuschlagstoffe müssen vollständig vom Zement umhüllt sein, damit der Beton seine entsprechenden Festigkeiten erreichen kann.

Die Gesteinskörnung wird in drei Arten unterschieden: natürliche Gesteinskörnung, industriell hergestellte Gesteinskörnung und rezyklierte Gesteinskörnung. Als natürliche Gesteinskörnungen bezeichnet man alle natürlich vorkommenden mineralischen Natursteine. Dazu zählen Sande und Kiese aus Flüssen oder Seen, aber auch Splitte und Brechsande, die aus gebrochenem Naturstein bestehen. Bei natürlichen Gesteinskörnungen wird grundsätzlich zwischen Rund- und Kantkorn unterschieden. Unter industriell hergestellten Gesteinskörnungen werden Zuschlagstoffe verstanden, die durch einen industriellen Prozess hergestellt werden. Dazu zählen alle Produkte aus Hüttensand, Klinkerbruch, künstlicher Korund oder Sintersplitte. Die rezyklierte Gesteinskörnung, Gegenstand unserer Diplomarbeit, besteht aus mechanisch zerkleinertem mineralischen Bauschutt, der bei Bau- und Abbruchtätigkeiten anfällt (siehe die Tabellen im Abschnitt 1.4).

⁴⁶ Vgl. Kühn, Anwendungsmöglichkeiten von Recyclingbeton im Hoch- und Ingenieurbau, S. 12

⁴⁷ Vgl. Kühn, Anwendungsmöglichkeiten von Recyclingbeton im Hoch- und Ingenieurbau, S. 13

⁴⁸ Vgl. ÖNORM B4710-1: Beton- Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2018, S.20

Durch ein aufwändiges Aufbereitungsverfahren (siehe Abschnitt 1.5) werden die Betonabbrüche und Baurestmassen zu Recycling-Baustoffen aufbereitet.⁴⁹ Die rezyklierte Gesteinskörnung darf keine Verunreinigungen beinhalten, weshalb diese zuvor beim Aufbereitungsprozess aussortiert werden müssen.⁵⁰ Damit dem Beton ausreichend Zement hinzugefügt wird, ist die Sieblinie der Gesteinskörnung ausschlaggebend. In der Sieblinie wird festgelegt, wie viele Anteile von welchem Korn in den Beton kommen sollen. Wenn zu viele Feinanteile in der Gesteinskörnung vorhanden sind, kann es sein, dass die Zementschlemme nicht jedes Korn vollständig umhüllt. Das führt zu negativen Auswirkungen auf die Festigkeitseigenschaften des fertigen Betons. Ideale Sieblinien findet man in den Normenwerken, wie der ÖNORM B 4710-1 „Beton- Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität“⁵¹ Die Sieblinie der Recyclinggesteinskörnung, die wir bei den Versuchen verwendet haben, ist im Abschnitt 4.3 dargestellt.

2.1.2.3 Zugabewasser

Das Zugabewasser ist der letzte, aber nicht weniger wichtige Anteil des Betons. Die detaillierte Berechnung des Zugabewassers ist in Abschnitt 4.4 beschrieben. Auf das Oberflächenwasser darf bei der Mischberechnung nicht vergessen werden, da dieser Anteil bei großen Mengen an Gesteinskörnung den W/B- Wert ausschlaggebend verändern kann.⁵²

Besonders bei rezyklierten Gesteinskörnungen muss nicht nur auf die Oberflächenfeuchtigkeit, sondern auch auf die Kernfeuchte geachtet werden, denn diese Körnungen können mehr Wasser durch ihre poröse Oberfläche aufnehmen als natürliche Gesteinskörnungen. Die Kernfeuchte darf jedoch nicht mit der Oberflächenfeuchtigkeit gleichgesetzt werden, denn sie wirkt nicht als Aktivator für den Zement mit, sondern bleibt dauerhaft in der (rezyklierten) Gesteinskörnung eingelagert. (siehe Abschnitt 4.4)

Bei der Herstellung von Frischbeton mit rezyklierter Gesteinskörnung soll das Gesteinsmaterial, falls es eine sehr geringe Kernfeuchte aufweist, zuvor angefeuchtet werden, da das Material sonst das Zugabewasser aufsaugt. Die Folge wäre, dass zu wenig Wasser verfügbar ist, damit der ganze Zement gebunden werden kann und so können die Konsistenz und die Verarbeitbarkeit stark beeinträchtigt werden.⁵³

⁴⁹ Vgl. Kühn, Anwendungsmöglichkeiten von Recyclingbeton im Hoch- und Ingenieurbau, S. 14

⁵⁰ Vgl. Kühn, Anwendungsmöglichkeiten von Recyclingbeton im Hoch- und Ingenieurbau, S. 71

⁵¹ Vgl. Kühn, Anwendungsmöglichkeiten von Recyclingbeton im Hoch- und Ingenieurbau, S. 73

⁵² Vgl. Kühn, Anwendungsmöglichkeiten von Recyclingbeton im Hoch- und Ingenieurbau, S. 16

⁵³ Vgl. Kühn, Anwendungsmöglichkeiten von Recyclingbeton im Hoch- und Ingenieurbau, S. 141

Als Zugabewasser wird meistens Wasser in Trinkwasserqualität verwendet, das aus dem örtlichen Trinkwassernetz oder aus Wiederaufbereitungsanlagen stammt. Es dürfen keine Abwässer verwendet werden, da sonst der Beton negativ beeinflusst wird. Im Zweifelsfall muss das Wasser chemisch geprüft werden, ob es für die Produktion von Beton tauglich ist.⁵⁴

2.2 Vorgaben für Recyclingbeton

2.2.1 ÖNORM B 4710-1 Anhang E

2.2.1.1 Allgemeines

Die ÖNORM 4710-1 „Beton- Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität“ ist die nationale Ausgabe der EN 206:2017 „Beton- Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität“. Der Anhang E der Norm bezieht sich auf die Anwendung von rezyklierter Gesteinskörnung gemäß der ÖNORM B 3140 „Rezyklierte Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Anwendungen sowie für Beton“. Alle Inhalte des Anhangs E beziehen sich auf die EN 206 und auf die Erfahrungswerte, die Österreich mit der Anwendung von Recyclingbeton gesammelt hat. Es wurden auch kleine Ergänzungen getroffen, die auf den Erfahrungswerten von anderen Ländern, wie der Schweiz, basieren.⁵⁵ Die folgenden Aussagen in diesem und den folgenden Unterkapiteln sind der ÖNORM B 4710-1 entnommen.

- Grundsätzlich dürfen nur Gesteinskörnungen für die Herstellung von Recyclingbeton verwendet werden, die laut der ÖNORM B 3140 die Mindestanforderung der Norm erfüllen und in folgende Gruppen eingeteilt werden können: RB-A1, RB-A2, RG-A3 und RH-B (siehe Tabelle in Abschnitt 1.3.6).
- Es darf in jedem Beton ein Anteil von weniger als 5% der Masse der Gesteinskörnung gegen rezyklierte Gesteinskörnung ausgetauscht werden, ohne dass dies in der Betonartenkennzeichnung ersichtlich zu machen ist. Wenn ein größerer Anteil der natürlichen Gesteinskörnung ausgetauscht wird, ist die Klasse der ausgetauschten Gesteinskörnung erkenntlich zu machen.
- Weiters darf der Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen nur in bestimmten Einsatzbereichen verwendet werden. Diese Einsatzbereiche sind ebenfalls der ÖNORM B 4710-1 zu entnehmen. Falls Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung eingebracht wird, muss der

⁵⁴ Vgl. Kühn, Anwendungsmöglichkeiten von Recyclingbeton im Hoch- und Ingenieurbau, S. 16

⁵⁵ Vgl. ÖNORM B4710-1, S.144

Bauherr oder dessen Vertretung über dieses Vorgehen informiert werden (falls der ausgetauschte Anteil größer als 5 % beträgt).

- Es ist unzulässig, in einem Beton zwei verschiedene Klassen von rezyklierter Gesteinskörnung zu vermischen. Es darf Recyclingbeton nie zur Herstellung von vorgespannten Bauteilen, ermüdungsgefährdeten Bauteilen, Bauteilen mit einer höheren Festigkeitsklasse als C40/50 oder Bauteilen, die gegen treibende Angriffe wirken, verwendet werden.
- Betone mit der Gesteinskörnung RH-B, d.h. Recyclingmaterial mit bis zu 30% Ziegelanteil in der rezyklierten Gesteinskörnung, dürfen zusätzlich nur in trockenen Anwendungsgebieten, mit einer niedrigeren Festigkeitsklasse als C30/37 und als Bauteile, die fast ausschließlich Druckbeanspruchungen ausgesetzt sind, verbaut werden. Die Anwendung von rezyklierter Gesteinskörnung kann zu einem veränderten Erscheinungsbild verglichen mit dem Primärbeton führen.⁵⁶

2.2.1.2 *Gebrauch von rezyklierter Gesteinskörnung*

Der Anteil von feiner rezyklierter Gesteinskörnung muss bei der Wiederaufbereitung nach der Methode „Nassaufbereitung“ behandelt werden. Als feiner Anteil werden alle Kornfraktionen mit einem kleineren Durchmesser als 2 Millimeter verstanden. Die Nassaufbereitung wird im Abschnitt 1.7.5 erläutert. Andere Aufbereitungsmethoden sind nicht zulässig, außer es kann die Eignung durch eine Prüfung nachgewiesen werden. Weiters dürfen die feinen rezyklierten Gesteinskörnungen keine großen Schwankungen beim Wasseranspruch aufweisen. Bei der kleinsten Kornfraktion darf das Größtkorn einen Durchmesser von 2 Millimeter nicht unterschreiten, da bei so kleinen Kornanteilen keine Klassifizierung mehr möglich ist.⁵⁷ Korngemische müssen nachweislich aus getrennt aufbereiteten Fraktionen zusammengesetzt werden, zum Beispiel 0/4 und 4/16, wobei die Fraktionen 0/1 und 0/2 auch hierfür nicht zulässig sind. Zur Verwendung von Korngemischen aus rezyklierter Gesteinskörnung müssen, so wie auch bei der Verwendung von

⁵⁶ Vgl. ÖNORM B4710-1, S.114,145

⁵⁷ Vgl. ÖNORM B4710-1, S.145

natürlicher Gesteinskörnung, die Festlegungen aus der folgenden Tabelle der ÖNORM B4710-1 eingehalten werden.⁵⁸

Sieblinien- klasse SK ^a	Zulässige Betonsorte unter Bezug auf Festigkeits- und Expositionsklassen	Anforderungen an die Kornzusammensetzung		
		Mindestanzahl der Korngruppen bei		Sieblinienbereich
		GK ≥ 22 mm	GK ≤ 16 mm	
1	Sämtliche Betonsorten	insgesamt 3 Korn- gruppen, davon 1 Korngruppe bis 4 mm ^c	insgesamt 2 Korn- gruppen, davon 1 Korngruppe bis 4 mm ^c	Sieblinie bis 4 mm im Wesent- lichen in der oberen Hälfte des günstigen Bereichs, darüber stetige Sieblinie bzw. Ausfall- körnung ^b
	Sämtliche Festigkeits- klassen und X0, XC1, XC2			Sieblinie bis 4 mm im Wesent- lichen im günstigen Bereich, darüber stetige Sieblinie bzw. Ausfallkörnung ^b
2	Sämtliche Betonsorten, ausgenommen ≥ C50/60 und XF4, XA2, XA3	insgesamt 2 Korngruppen, davon 1 Korngruppe bis 4 mm ^c		Sieblinie bis 4 mm im Wesent- lichen in der oberen Hälfte des günstigen Bereichs, darüber stetige Sieblinie bzw. Ausfall- körnung ^b
	Sämtliche Festigkeits- klassen und X0, XC1, XC2			Sieblinie bis 4 mm im Wesent- lichen im günstigen Bereich, darüber stetige Sieblinie bzw. Ausfallkörnung ^b
3	≤ C25/30 und X0, XC1, XC2,	Korngemisch		günstiger und brauchbarer Bereich
0	≤ C12/15 und X0 und Rezeptbeton	Korngemisch		günstiger, brauchbarer und erweiterter Sieblinienbereich

^a Wird die für die Betonherstellung verwendete Gesteinskörnung vom Betonhersteller selbst produziert, ist die werkseigene Produktionskontrolle gemäß ÖNORM EN 12620 durchzuführen. Die Anforderungen an die Gesteinskörnungen gemäß [Tabelle 14](#) bzw. [Tabelle 15](#) sind einzuhalten.

^b Abweichungen dürfen die geforderten Eigenschaften des Betons nicht beeinträchtigen.

^c Mindestens eine Korngruppe mit höchstens 4 mm Größtkorn, die andere(n) mit mindestens 2 mm Kleinstkorn (bei Spritzbeton sind die in der jeweiligen Regel festgelegten Anforderungen einzuhalten). Die Kombination von Korngruppen mit Korngemischen ist für die Sieblinienklassen SK1 und SK2 nicht zulässig.

Tabelle 14: Zulässige Korngruppen für die Verwendung von Korngemische

2.2.1.3 Austauschraten von natürlicher Gesteinskörnung

Die Austauschrate ist von der Qualitätsklasse der rezyklierten Gesteinskörnung und der Expositionsklasse abhängig. Der Austausch ist nur innerhalb der Korngruppen und innerhalb des maximalen Austauschprozentsatzes möglich und bezieht sich auf die bezogenen relativen Masseanteile. Bei der Bemessung dieser Anteile sind wir wie folgt vorgegangen: Das Volumen der natürlichen Gesteinskörnung wurde prozentuell durch den Volumenanteil an rezyklierter Gesteinskörnung ersetzt (siehe Mischberechnung im Anhang). Der jeweilige Anteil der maximal möglichen Austauschmenge wird in den zwei folgenden Tabellen festgelegt.⁵⁹

⁵⁸ Vgl. ÖNORM B4710-1, S.145

⁵⁹ Vgl. ÖNORM B4710-1, S.150

Materialbezeichnung der rezyklierten Gesteinskörnung gemäß ÖNORM B 3140	Gesteinskörnung	Expositionsklassen																			
		X0 ^a	XC1	XC2	XC3	XC4	XF1	XF2 ^b	XF3 ^b	XF4 ^b	XD1	XD2	XD3 ^b	XW1	XW2	XA1 ^c	XA2	XA3	XM1	XM2	XM3
		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
RB-A1	Grob	50	50	50	50	50	50	30	30	30	50	30	30	50	50	50	0	0	30	0	0
	Fein ^d	25	25	25	25	25	25	15	15	15	25	15	15	25	25	25	0	0	0	0	0
	Korngemisch ^d	38	38	38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RB-A2	Grob	50	50	50	50	30	0	0	0	0	0	0	0	50	30	0	0	0	0	0	0
	Fein ^d	25	25	25	25	15	0	0	0	0	0	0	0	25	15	0	0	0	0	0	0
	Korngemisch ^d	38	38	38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RG-A3	Grob	50	50	50	50	50	50	30	30	30	50	30	30	50	50	50	0	0	30	0	0
	Fein ^d	25	25	25	25	25	25	15	15	15	25	15	15	25	25	25	0	0	15	0	0
	Korngemisch ^d	38	38	38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RH-B	Grob	50 ^e	35 ^e	35 ^e	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Fein ^d	25 ^e	20 ^e	20 ^e	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Korngemisch ^d	38 ^e	25 ^e	25 ^e	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

^a Ein erhöhter Austausch ist zulässig; bei den Typen RB-A1, RB-A2 und RG-A3:
 – bis zu 100 % bei groben Gesteinskörnungen bei Beton ≤ C16/20,
 – bis zu 100 % bei feinen Gesteinskörnungen und Korngemischen bei Beton ≤ C8/10,
 – bis zu 75 % bei feinen Gesteinskörnungen und Korngemischen bei Beton ≤ C12/15;
 bei Typ RH-B:
 – bis zu 75 % bei groben Gesteinskörnungen bei Beton ≤ C16/20,
 – bis zu 75 % bei feinen Gesteinskörnungen und Korngemischen bei Beton ≤ C8/10,
 – bis zu 70 % bei feinen Gesteinskörnungen und Korngemischen bei Beton ≤ C12/15.
^b Die rezyklierte Gesteinskörnung darf nur verwendet werden, wenn der ursprüngliche Beton nachweislich auch dieser Expositionsklasse entsprochen hat.
^c Bei treibendem Angriff (XAT) ist die Zugabe nicht zulässig.
^d Bei Betonen mit GK ≤ 8 mm und mit rezyklierten Gesteinskörnungen sind diese maximal zulässigen Zugabemengen um 50 % zu reduzieren.
^e Nur bei Anwendung im Trockenem und den weiteren Einschränkungen gemäß E.1 (9).

Tabelle 15: Grenzwerte für den Austausch von natürlicher durch rezyklierte Gesteinskörnung in Abhängigkeit der Expositionsklassen bezogen auf die relativ prozentuellen Massenanteile

Materialbezeichnung der rezyklierten Gesteinskörnung gemäß ÖNORM B 3140	Gesteinskörnung	Betonkurzbezeichnung ^b														
		B1	B2	B3 ^a	B4	B5 ^a	B6 ^a	B6/ C3A-frei ^a	B7 ^a	B8	B9	B10	B11	B12	HL-SW ^a	
		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
RB-A1	Grob	50	30	30	30	30	0	0	30	50	50	30	30	30	0	
	Fein ^c	25	15	15	15	15	0	0	15	25	25	15	15	15	0	
RB-A2	Grob	50	0	0	0	0	0	0	0	50	50	0	0	0	0	
	Fein ^c	25	0	0	0	0	0	0	0	25	25	0	0	0	0	
RG-A3	Grob	50	30	30	30	30	0	0	30	50	50	30	30	30	0	
	Fein ^c	25	15	15	15	15	0	0	15	25	25	15	15	15	0	
RH-B	Grob	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Fein ^c	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

^a Die rezyklierte Gesteinskörnung darf nur verwendet werden, wenn der ursprüngliche Beton nachweislich auch dieser Expositionsklasse entsprochen hat.
^b Bei treibendem Angriff (XAT) ist die Zugabe nicht zulässig.
^c Bei Betonen mit GK ≤ 8 mm und mit rezyklierten Gesteinskörnungen sind diese maximal zulässigen Zugabemengen um 50 % zu reduzieren.

Tabelle 16: Grenzwerte für den Austausch von natürlicher durch rezyklierte Gesteinskörnung in Abhängigkeit der Betonkurzbezeichnungen bezogen auf die relativ prozentuellen Massenanteile

2.2.1.4 Technische Eigenschaften und Bemessungsgrundlagen

Grundsätzlich sind die Regeln und Vorgaben für die Bemessung und Festlegung der technischen Eigenschaften gleich wie beim Primärbeton. Nur bei der Ermittlung des Elastizitätsmoduls wird ein Umrechnungsfaktor verwendet, weil sich die rezyklierte Gesteinskörnung physikalisch von der natürlichen Gesteinskörnung unterscheidet (siehe Abschnitt 2.4.5). Dadurch kann dieser Unterschied ausgeglichen und vergleichbare Ergebnisse erzielt werden.

2.3 Ökologische Kennwerte und internationaler Vergleich von Recyclingbeton

2.3.1 Ökologische Kennwerte von Recyclingbeton

Es wurden bereits mehrere ökologische Bilanzen von Forschungseinrichtungen erstellt. In dieser Arbeit beziehen wir uns auf zwei Forschungen, eine aus Deutschland und eine aus der Schweiz. Diese beiden wurden unabhängig voneinander untersucht. Für beide Forschungen sind einheitliche Indikatoren festgelegt.

- Treibhauspotential (GWP) mit der Einheit [CO₂] beschreibt die Summe aller Treibhausgase.
- Kumulierter Energieaufwand (KEA) mit den Einheiten [kWh] [MJ] beschreibt die Summe aller verbrauchten Energieträger.
- Ökologische Knappheit (VMR) beschreibt die Summe aller wichtigen Umwelteinwirkungen, die gemeinsam betrachtet werden. Es wird Kies als knappe Ressource bewertet und die Umwelteinwirkungen werden nach der relativen Knappheit gemessen.

Bei der ersten Forschung, welche von Dr.-Ing. Marc Weil und Dr.-Ing Udo Jeske im Forschungszentrum Karlsruhe am Institut für technische Chemie 2005 durchgeführt wurde, wurden fünf Betonproben ökologisch bewertet. Zwei Betonproben bestehen aus herkömmlichen Primärbeton und drei Proben aus rezyklierter Gesteinskörnung.

- Druckfestigkeitsklasse C 20/25
- Ausbreitklasse: F3
- Expositionsklasse: XC1

Die erste Forschung kam zu folgenden Ergebnissen, die in dem Diagramm darunter dargestellt werden. Die Betone 1, 2 und 3 sind mit rezyklierter Gesteinskörnung hergestellt. Die Betone 4 und 5 mit natürlicher Gesteinskörnung.

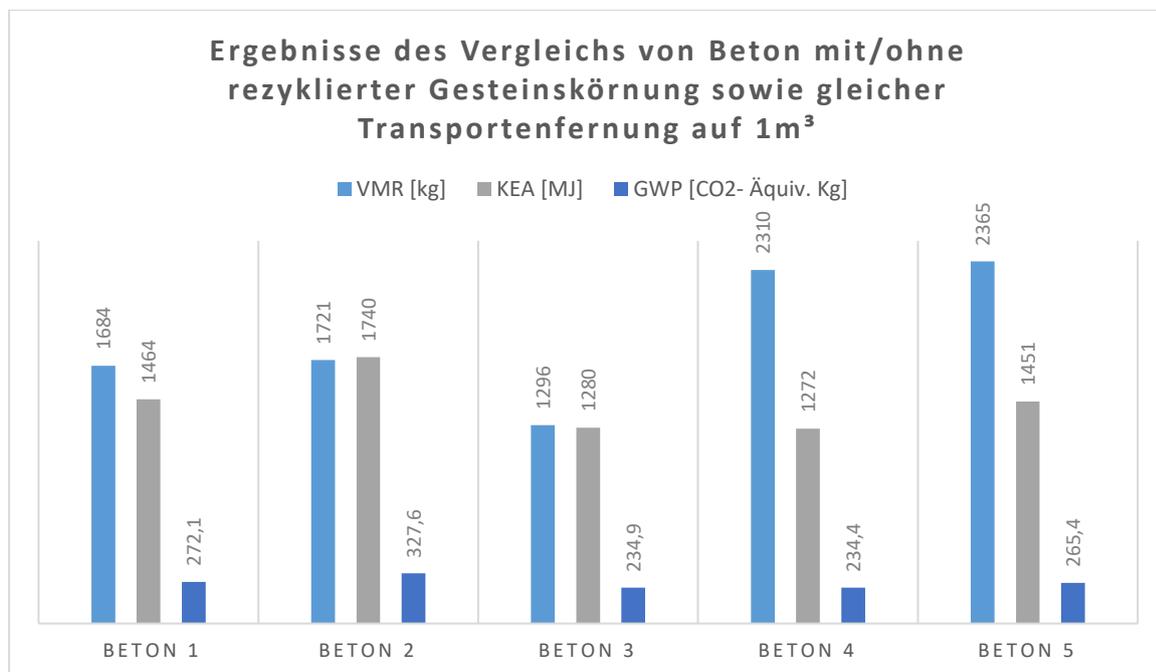


Tabelle 17: Schadstoffwerte bei der Betonherstellung

Aus dem Diagramm lässt sich ablesen, dass die GWP- und KEA- Werte bei den Recyclingbetonen etwas höher sind als bei den Primärbetonen. Das lässt sich mit dem erhöhten Einsatz von Zement erklären. Am GWP- Wert hat die Zementherstellung einen 95 prozentigen Anteil. Da bei mehr Zementverbrauch der GWP- Wert steigt, verändert sich somit auch der KEA- Wert drastisch. Dafür ist der VMR- Wert bei allen drei Sekundärbetonen wesentlich gesunken. Die Einsparung von natürlichen Kiesen und Splitten fällt bei der Berechnung dieses Wertes besonders hart ins Gewicht. Um den GWP- Wert zu optimieren, muss in der Recyclingbetonherstellung der Zementverbrauch verringert werden. Mit der Beifügung von Zusatzmitteln wie Betonverflüssiger oder Flugasche kann ein ähnlicher Effekt wie beim Zusatz von Zement erzielt werden.

Der zweite Versuch wurde von Dr. Peter Lunk in der Betonsuisse Marketing AG in Zürich ausgeführt. Dieser erstellte sechs Betonproben, jeweils drei mit rezyklierte und drei mit natürlicher Gesteinskörnung. Es wurden keine Transportwege miteinberechnet. Die Betone wurden alle mit denselben Parametern zusammengesetzt.

- 2000 kg Gesteinskörnung
- 300 kg Portlandkalksteinzement
- 150 l Wasser

Die Ergebnisse dieser Forschung sind ähnlich zu jenen der Forschung aus Karlsruhe. Der GWP-Wert und der KEA-Wert sind vom Zemetgehalt stark beeinflusst und somit sind diese Werte etwas höher als bei den Primärbetonen.⁶⁰

2.3.2 Internationale Best-Practice Beispiele von Recyclingbeton

Schon seit über 20 Jahren beschäftigt sich die Wissenschaft mit dem Thema Recyclingbeton. Viele Probleme wie die Knappheit an Deponieräumen, der Rückgang der Kiesressourcen oder die Zerstörung der Natur könnten mit dem Einsatz von Recyclingbeton verkleinert werden. Die Einsatzmöglichkeiten des neuartigen Baustoffs sind im Hochbau sowie im Tiefbau erwiesen, wenn auch meist nur in theoretischer Weise. Seit einigen Jahren gibt es auch Vorzeigeprojekte in Deutschland, Österreich und vor allem in der Schweiz. Weltweit gibt es noch nicht viele Länder, die sich mit dem Recyclingbeton in rechtlicher Hinsicht auseinandersetzen. Neben den eben genannten Staaten haben auch Belgien, Dänemark, Frankreich, Finnland, Großbritannien, Norwegen, Niederlande, Australien, Neuseeland, Japan und die USA gesetzliche Regelungen und Normen für den Einsatz von Recyclingbeton. Keines der angeführten Länder verwendet aber den Recyclingbeton in größeren Mengen und meist wird die rezyklierte Gesteinskörnung nur als Tragschicht oder Verfüllmaterial im Straßenbau verwendet.⁶¹

2016 ist in der Schweiz in der Stadt Zürich ein großes Wohnbau-Projekt entstanden, bei dem viele Bauteile aus Recyclingbeton hergestellt wurden. Im Stadtteil Kronewiese wurde eine Wohnsiedlung auf circa 10 000 Quadratmeter Grundfläche erbaut, bei der alle Wände aus Recyclingbeton hergestellt wurden. Viele Wände im Innenbereich sind als Sichtbetonwände ausgeführt, im Außenbereich ist der Beton meist mit Lasuren oder anderen Schichten überdeckt, um die Wasseraufnahme der porösen Gesteinskörnungen aus der Luft verhindern zu können. Auf dem Areal wurden 99 Wohnungen, mehrere Gewerbeeinheiten, Lagerräume und drei Kinderbetreuungseinrichtungen auf insgesamt 16 200 Quadratmetern Geschoßfläche errichtet. Viele der Wände wurden als gestalterisches Element in Wohnungen, Gängen oder Lagerräumen eingesetzt.

Der verwendete Recyclingbeton war entsprechend der Normung in der Schweiz als RC-M Beton ausgeführt. (siehe Tabelle 18). RC-M Beton muss aus mindestens 5% R_b -Material (Dachziegel, Mauerwerksziegel) bestehen, wobei zusätzlich die Summe aus Betongranulat R_c -Material (Körner aus Beton, Betonprodukte, Mörtel oder Betonmauersteinen) und R_b -Material über 25%

⁶⁰ Vgl. Kühn, Anwendungsmöglichkeiten von Recyclingbeton im Hoch- und Ingenieurbau, S.183

⁶¹ Vgl. Kühn, Anwendungsmöglichkeiten von Recyclingbeton im Hoch- und Ingenieurbau, S. 211, 212

betragen muss (siehe Tabelle 18). Allerdings ist ein R_b - Anteil von über 25M.% nur in den Expositions-klassen X0 und XC1 zulässig.⁶²

Zusammenfassend kann man sagen, dass in der Schweiz in bestimmten Expositions-klassen ein höherer Prozentsatz von Mischgranulat, also Ziegelanteil, und ein niedriger Prozentsatz von Betongranulat verwendet werden darf. Eine genauere Gegenüberstellung der Schweizer Normen zu den österreichischen Normen erfolgt im folgenden Abschnitt.



Abbildung 11: Sichtbetonwände aus Recyclingbeton



Abbildung 12: Ansicht des Beispielprojekts

Das Wohn-Projekt in Kronewiese ist aber nicht das einzige Großprojekt, dass in der Schweiz mit der Anwendung von Recyclingbeton hergestellt wurde. Schon im Jahr 2004 wurde in Zürich eine Schulanlage, 2005 eine Berufsschule, 2006 eine Wohnsiedlung oder 2007 ein Flughafenhotel errichtet. Auf internationaler Ebene ist die Schweiz ein Vorreiter bezüglich Pilotprojekte mit Recyclingbeton.⁶³

2.3.3 Internationaler Vergleich der Normung anhand des Beispiels Schweiz

Da uns die SIA 262 und das SIA Merkblatt MB 2030 nicht vorlagen, konnten wir unsere Informationen nur aus anderen Quellen, wie der Zusammenfassung des SIA Merkblatts MB 2030 und einer Präsentation über das SIA Merkblatt MB 2030, entnehmen. Die Präsentation stammt von

⁶² Vgl. Baunetz_Wissen: Wohnsiedlung Kronewiese in Zürich. Online im Internet: URL:<https://www.baunetzwissen.de/beton/objekte/wohnen-mfh/wohnsiedlung-kronewiese-in-zuerich-5332744>, 11.02.2021

⁶³ Vgl. Kühn, Anwendungsmöglichkeiten von Recyclingbeton im Hoch- und Ingenieurbau, S. 208

Dr. Konrad Moser, welcher ein Mitglied der Normkommission SIA 262 Betonbau ist. Die Zusammenfassung wurde ebenfalls von ihm und Frau Cathleen Hoffmann, von welcher auch weitere in unserer Arbeit zitierte Artikel stammen, erstellt.

In der Schweiz gibt es schon seit langem die Bestrebung, rückgebaute mineralische Baustoffe wiederzuverwerten. Im Jahr 1994 erschien erstmals die Empfehlung SIA 162/4 Recyclingbeton. Diese stütze sich auf die damalige SIA 160ff.⁶⁴ SIA bedeutet Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, der Sitz der SIA befindet sich in Zürich. In Bezug auf die Baunormen ist die SIA der führende Verband der Schweiz.⁶⁵

Um die Regelungen zu präzisieren und um die neusten Erkenntnisse einzubinden, erschien im Februar 2010 das SIA Merkblatt MB 2030 „Recyclingbeton“. Dadurch sollen ergänzende Anwendungen der allgemeinen schweizerischen Tragwerksnorm SIA 262 ermöglichen werden. In dem Merkblatt MB 2030 werden knappe Definitionen und die aussagekräftigsten mechanischen Eigenschaften und die Bemessungsgrundlagen des Recyclingbetons angeführt. Außerdem sind Beispiele für die verschiedensten Einsatzmöglichkeiten angeführt. So soll die Anwendung von Recyclingbeton zugänglicher für Planer, Bauherren sowie Betonhersteller gestaltet werden. Grundsätzlich deckt das SIA MB 2030 den gesamten Geltungsbereich für Recyclingbetone mit Verwendung von Betongranulat und Mischgranulat ab. Die Herstellung des Betons erfolgt nach den Vorgaben der SIA EN 206-1. Die Granulate müssen den Anforderungen der EN 12620:2002+A1:2008 und der SN 670102b entsprechen.

In der nachfolgenden Tabelle werden die Qualitätsanforderungen an die Gesteinskörnungen laut der SN EN 206-1 dargestellt. Anhand der Gesteinskörnung wird auch der Beton benannt. Dabei wird zwischen zwei verschiedenen Betonkennzeichen unterschieden: RC-C und RC-M.⁶⁶

⁶⁴ Vgl. Hoffmann Cathleen; Moser Konrad: Aktualisiertes SIA-Merkblatt „Recyclingbeton“, Zürich: 2010, S.48

⁶⁵ Vgl. Wikipedia: Wikipedia: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Schweizerischer_Ingenieur-_und_Architektenverein, 11.02.2021

⁶⁶ Vgl. Hoffmann; Moser: Aktualisiertes SIA-Merkblatt „Recyclingbeton“, S.48

Bezeichnung des Betons	Bezeichnung der Gesteinskörnung	Gesteinskörnungen nach SN EN 12620 ¹⁾				Fremdstoffe ²⁾	
		R _u und natürliche Gesteinskörnung	R _c	R _b	R _a	X + R _g	FL
C... ³⁾	Natürliche Gesteinskörnung	≥ 75 M.-%	< 25 M.-%	≤ 5 M.-%	≤ 1 M.-%	≤ 0,3 M.-%	≤ 2 cm ³ /kg
C... ³⁾ RC-C	Betongranulat ⁴⁾		≥ 25 M.-%	≤ 5 M.-%	≤ 1 M.-%	≤ 0,3 M.-%	≤ 2 cm ³ /kg
C... ³⁾ RC-M	Mischgranulat ⁴⁾	< 95 M.-%		≥ 5 M.-%	≤ 1 M.-%	≤ 0,3 M.-%	≤ 2 cm ³ /kg

Anmerkungen:

1) Anteile gemäss der Auszählung der Körner ≥ 4 mm nach der Norm SN EN 933-11 [Prüfverfahren von Gesteinskörnungen].

Falls höhere Gehalte an R_c und R_u bzw. R_b gefordert werden, sind diese gemäss den Kategorien der Tabelle 20 der Norm SN EN 12620 zu definieren

2) Für besondere Anwendungen, die eine hochwertige Oberflächenbeschaffenheit fordern (z. B. Sichtbeton), gilt die Kategorie FL0.2.

3) Beton gemäss SN EN 206-1, z. B. C25/30

4) Für die Gesteinskörnung der Recyclingbetone RC-C und RC-M ist einzuhalten: R_c + R_b ≥ 25 M.-%

M.-%: Massenprozent

Tabelle 18: Qualitätsanforderungen an die rezyklierte Gesteinskörnung nach der SN EN 206-1

- R_u ungebundene Gesteinskörner, Naturstein, hydraulisch gebundene Gesteinskörner
- R_c Körner aus Beton, Betonprodukte, Mörtel oder Betonmauersteinen
- R_b Körner aus Mauer- Dachziegel, gebranntem Ton, Kalksandstein
- R_a Körner aus bitumenhaltigem Material
- R_g Glaskörper
- X Körper aus sonstigem Material wie Erde, Metall, Holz, Kunststoff
- FL Körner aus schwimmendem Material⁶⁷

Diese Bezeichnungen sind ident mit der ÖNORM B 3140, diese wurden im Abschnitt 1.3.6 behandelt. In der Tabelle 18 wird dargestellt, aus welchen maximalen Anteilen der verschiedenen rezyklierten Gesteinskörnungen und Fremdstoffe ein RC-C Beton und eine RC-M-Beton bestehen darf.

In der nächsten Tabelle werden die Expositionsclassen für die verschiedenen Recyclingbetone dargestellt. Die Tabelle gibt u.a. an, dass ein R_b-Anteil von über 25 M% nur in den Expositionsclassen X0 und XC1 zulässig ist. Eine Steigerung des Austauschwertes ist in einzelnen Expositionsclassen nicht mehr sinnvoll, da wegen des niedrigeren Elastizitätsmoduls (siehe auch anhand unserer Versuche Abschnitt 4.5.2) sowie der größeren Kriechverformungen die gestellten Ansprüche an den Beton nicht mehr erfüllt werden können. Es wird vorgeschrieben, dass der Einsatz bei

⁶⁷ Vgl. Hoffmann; Moser: Aktualisiertes SIA-Merkblatt „Recyclingbeton“, S.49

den Expositionsklassen XD, XF, AX oder an ermüdenden Bauteilen oder Spannbeton nur mit den entsprechenden Voruntersuchungen ausgeführt werden darf.

Recyclingbeton		Expositionsklasse				
	Anteile	X0	XC1(CH) trocken	XC1(CH) nass XC2(CH) XC3(CH)	XC4(CH)	XD(CH), XF(CH), XA
RC-C	$R_c \geq 25 \text{ M.-%}$ $R_b < 5 \text{ M.-%}$	zulässig				①
RC-M	$5 \text{ M.-%} \leq R_b \leq 25 \text{ M.-%}$ und $R_c + R_b \geq 25 \text{ M.-%}$	zulässig			①	nicht zulässig
	$R_b > 25 \text{ M.-%}$	zulässig		①	①	

① Nach entsprechenden Voruntersuchungen zulässig
M.-%: Massenprozent

Tabelle 19: Empfohlene Austauschraten bezüglich der Expositionsklassen

Gleich wie in der ÖNORM B 4710-1 wird ein Ersatzwert für den Elastizitätsmodul und die Kriechzahl E_{rcm} und ein ρ_{rcm} angenommen. Der Umrechnungsfaktor η_r wird gleich berechnet, mit der Formel $\eta_r = E_{rcm} / E_{cm} = <1$. Anders ist die Berechnung beim E-Modul. Hier wird der normale E-Modul um 10% verringert. Dies ist in der österreichischen Norm anders geregelt. ⁶⁸ Der E-Modul laut ÖNORM wird im Kapitel 2.4.5 genauer erläutert.

Elastizitätsmodul		ohne deklarierte Werte	bei deklarierter Rohdichte ($\rho_{cm} = 2450 \text{ kg/m}^3$)
RC-C	$R_c \leq 50 \text{ M.-%}$ $R_c > 50 \text{ M.-%}$	$E_{rcm} \approx E_{cm} \cdot 0.9$ $E_{rcm} \approx E_{cm} \cdot 0.8$	$E_{rcm} \approx E_{cm} \cdot 0.9 \cdot \frac{\tilde{\rho}_{rcm}}{\tilde{\rho}_{cm}}$
RC-M	$R_c \leq 50 \text{ M.-%}$ $R_c > 50 \text{ M.-%}$	$E_{rcm} \geq 19\,000 \text{ N/mm}^2$ $\rho_{rcm} \geq 2000 \text{ kg/m}^3$	$E_{rcm} \approx E_{cm} \cdot 0.9 \cdot \frac{\tilde{\rho}_{rcm}}{\tilde{\rho}_{cm}}$
Endschwindmass		$\varepsilon_{rcm,\infty} = \varepsilon_{cm,\infty} \cdot E_{cm} / E_{rcm}$	
Kriechzahl		$\varphi_r(t,t_0) = 1.25 \cdot \varphi(t,t_0)$	

Tabelle 20: Berechnung der veränderten Festbetoneigenschaften bei Recyclingbeton

⁶⁸ Vgl. Hoffmann; Moser: Aktualisiertes SIA-Merkblatt „Recyclingbeton“, S.50

2.3.3.1 Gegenüberstellung von SIA MB 2030 und ÖNORM B4710-1 Anhang E

Um die beiden Werke vergleichen zu können, setzen wir das Material für die Herstellung von RC-M Beton mit dem Material RH-B und RC-C mit RB-A2 gleich. Die Gesteinskörnungsgruppen ähneln sich jedoch nur und haben nicht die gleichen zulässigen Maximalanteile und die gleiche Zusammensetzung. Das SIA MB 2030 unterscheidet sich in mehreren wesentlichen Punkten von der ÖNORM 4710-1.

- Als erstes ist zu erkennen, dass in dem SIA MB 2030 keine fixen Grenzen für die Austauschrate innerhalb einzelner Expositionsklassen festgelegt sind. Anstelle dessen sind Grenzwerte je nach Expositionsklasse angegeben, welche der Beton nicht oder nur mit einem Nachweis überschreiten darf.
- In der ÖNORM B 4710-1 ist das anders geregelt, da unabhängig von der Expositionsklasse bereits für jede Gesteinskörnungsgruppe (RB-A2, RH-B usw.) Maximalaustauschraten angegeben sind.
- Ein weiterer Unterschied liegt darin, dass in Österreich jeder Beton als Recyclingbeton zu bezeichnen ist, wenn mehr als 5 % der Gesteinskörnung ausgetauscht werden, in der Schweiz gilt ein Beton indessen erst dann als Recyclingbeton, wenn mehr als 25 % der Körnung ausgetauscht werden. In Österreich ist eine Austauschrate von 25 % in den meisten Expositionsklassen schon die maximale Obergrenze.
- Laut dem SIA MB 2030 kann ein Recyclingbeton hergestellt werden, der aus 100 % R_c Material besteht und sogar in die Expositionsklasse XC4 fällt, demgegenüber liegt laut ÖNORM B4710-1 der maximal austauschbare Wert bei nur 50 % und gilt dies auch nur für die Expositionsklasse X0. Hier sind große Unterschiede in den Austauschmengen möglich.
- Der Einsatz von RC-M Material bei den Expositionsklassen XD, XF und XA ist laut Schweizer Vorschrift verboten, bei RC-C Material ist die Verwendung nur mit einer Voruntersuchung zulässig. Diese Regelung ähneln jener der ÖNORM B4710-1. Dort ist der Gebrauch von RH-B Material sowie der Einsatz von RB-A2 Material in diesen Expositionsklassen ebenfalls nicht zulässig.
- Es wird in der Schweiz bereits nach weiteren Möglichkeiten geforscht, um den Recyclingbeton auch in den eingeschränkten Expositionsklassen wie XD, XF oder XA, herstellen zu können.

Zusammenfassend kann zum internationalen Vergleich festgehalten werden:

Es ist ersichtlich, dass die SIA MB 2030 einen wesentlich größeren Anwendungsbereich für den Einsatz von Recyclingmaterial zulässt als das Regelwerk in Österreich. So kann mehr Recyclingbeton verbaut werden und dadurch auch mehr rezyklierte Gesteinskörnung vor der Deponierung bewahrt werden. Die Details dazu sind in den Absätzen zuvor angeführt.

Bei den Berechnungen der mechanischen Kennwerte, wie dem Elastizitätsmodul, sind hingegen fast keine Unterschiede zu erkennen. Das Endschwindmaß sowie die Kriechzahl oder die mittlere Rohdichte bzw. der mittlere E-Modul werden in dem SIA MB 2030 gleich wie in der ÖNORM B4710-1 berechnet. Nur bei genauerer Betrachtung werden kleine Unterschiede in der Berechnung ersichtlich.

2.4 Technische Eigenschaften von Recyclingbeton

Um einen brauchbaren Recyclingbeton herstellen zu können, muss auf folgende Eigenschaften besonders geachtet werden:

- Art der Recyclinggesteinskörnung
- maximal austauschbarer Anteil der Gesteinskörnung
- Sieblinie und Kornverteilungskurve der Gesteinskörnung
- späteres Einsatzgebiet des Recyclingbetons und die Umgebungseinflüsse
- gewünschte Festigkeit des Betons⁶⁹

2.4.1 Druckfestigkeit

Die Betondruckfestigkeit wird im ausgehärteten Zustand geprüft und das Ergebnis in Druckfestigkeitsklassen eingeteilt. Zur Einteilung wird die charakteristische Festigkeit nach 28 Tagen Aushärtungszeit ausgewertet. Es gibt zwei verschiedene Festigkeitswerte, die charakteristische Zylinderdruckfestigkeit ($f_{ck,cyl}$) und die charakteristische Würfeldruckfestigkeit ($f_{ck,cube}$). Beide Werte werden in N/mm^2 angegeben. Bei dieser Prüfung wird der Beton auf seine Widerstandsfähigkeit gegen Druckkräfte geprüft-

⁶⁹ Vgl. Kühn, Anwendungsmöglichkeiten von Recyclingbeton im Hoch- und Ingenieurbau, S. 210

2.4.2 Biegezugfestigkeit

Die Biegezugfestigkeit $f_{ct,f}$ [N/mm²] wird ebenfalls im ausgehärteten Zustand nach 28 Tagen geprüft. Bei dieser Festigkeitsprüfung werden die Randfasern des Betonprismas belastet, wodurch ein Biegemoment entsteht. Der Beton kann dieser Belastung Widerstand leisten bis es zu einer plastischen Verformung und schließlich zum Bruch der Betonprobe kommt.

2.4.3 Steigerung des Wassergehalts

Rezyklierte Gesteinskörnungen weisen eine geringere Kernrohichte auf als natürliche oder industriell hergestellte Gesteinskörnungen. Durch ihre poröse und offenporige Oberfläche weisen rezyklierte Gesteinskörnungen auch ein erhöhtes Wasseraufnahmevermögen auf. Rezyklierter Beton sollte deswegen keiner Feuchtigkeit oder direkter Witterung ausgesetzt sein, ansonsten könnte die Bewehrung durch die Feuchtigkeitsaufnahme der Gesteinskörnung zu korrodieren beginnen (siehe Regelung hinsichtlich der Expositionsklassen in Abschnitt 2.2.1).

2.4.4 Spaltzugfestigkeit

Der Versuch der Spaltzugfestigkeit ist ein Festbetonversuch, der 28 Tage nach dem Mischvorgang geprüft wird. Anhand der Ergebnisse wird der Beton entsprechend seiner Spaltzugfestigkeit $f_{ct,sp}$ [N/mm²] in sogenannte Spaltzugfestigkeitsklassen - kurz TK - eingeteilt. Für Recyclingbeton gibt es keine Veränderungen in der Berechnung.

2.4.5 Elastizitätsmodul

Das Elastizitätsmodul $E_{c,0}$ [N/mm²] wird ebenfalls 28 Tage nach dem Mischvorgang geprüft. Hierbei wird die Elastizität des Betons bewertet. Bei dem Elastizitätsmodul (auch E-Modul) von herkömmlichem Beton kann ein direktes Verhältnis zur Druckfestigkeit hergestellt werden. Umso höher der Parameter des E-Moduls, desto weniger elastischer der Bauteil und desto höher ist die Druckfestigkeit.

Laut ÖNORM B 4710 Anhang E wird der E- Modul von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung mit einem Umrechnungsfaktor η_r berechnet.⁷⁰

Die Formel für η_r lautet:
$$\eta_r = \frac{E_{rcm}}{E_{cm}} \leq 1$$

Wenn noch kein Wert für E_{rcm} vorhanden ist, können für die Planung folgende Ersatzwerte angenommen werden:

⁷⁰Vgl. ÖNORM B4710-1, S.153

- Bei der Verwendung von RB-A1, RB-A2 oder RG-A3 und einer kleineren Austauschrate von 50 % der Gesamtmasse kann für $\eta_r=0,9$ angenommen werden
- Bei der Verwendung von RB-A1, RB-A2 oder RG-A3 und einer größeren Austauschrate von 50 % der Gesamtmasse kann für $\eta_r=0,8$ angenommen werden. Diese Austauschrate ist aber laut ÖNORM B 4710-1 nicht mehr zulässig.
- Bei der Verwendung von RH-B Material mit einer kleineren Austauschrate von 50 % der Gesamtmasse kann für $\eta_r=0,8$ angenommen werden
- Bei der Verwendung von RH-B Material mit einer größeren Austauschrate von 50 % der Gesamtmasse kann für $\eta_r=0,7$ angenommen werden⁷¹ Diese Austauschrate ist aber laut ÖNORM B 4710-1 nicht mehr zulässig.

2.5 Einsatzgebiete von Recyclingbeton

Durch die Recycling- Baustoffverordnung sind die Einsatzgebiete von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung genau festgelegt (siehe Abschnitt 1.4). In der ÖNORM B 4710-1 sind ebenfalls die Expositionsklassen und die Betonkurzbezeichnungen im Zusammenhang mit dem Einsatz von rezyklierten Material beschrieben (siehe Abschnitt 2.2.1.3).

Magerbeton, Sauberkeitsschichten oder unbewehrter Beton werden oft mit minderwertigem Recyclinggranulat und wenig Zementgehalt hergestellt. Da der Recyclingbeton nicht auf seine Festigkeit hin klassifiziert wird, ist der Einsatz leicht umsetzbar.⁷² Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung kann bereits jetzt schon bei wenig hochwertigen Bauteilen, ebenso bei nichttragenden Wänden und zudem bei vollwertig konstruktiven Bauteilen verbaut werden. Wie im Abschnitt 2.3.2 erwähnt, gibt es bereits mehrere erfolgreiche Projekte, bei denen der neue Baustoff zur Anwendung angewendet wurde.

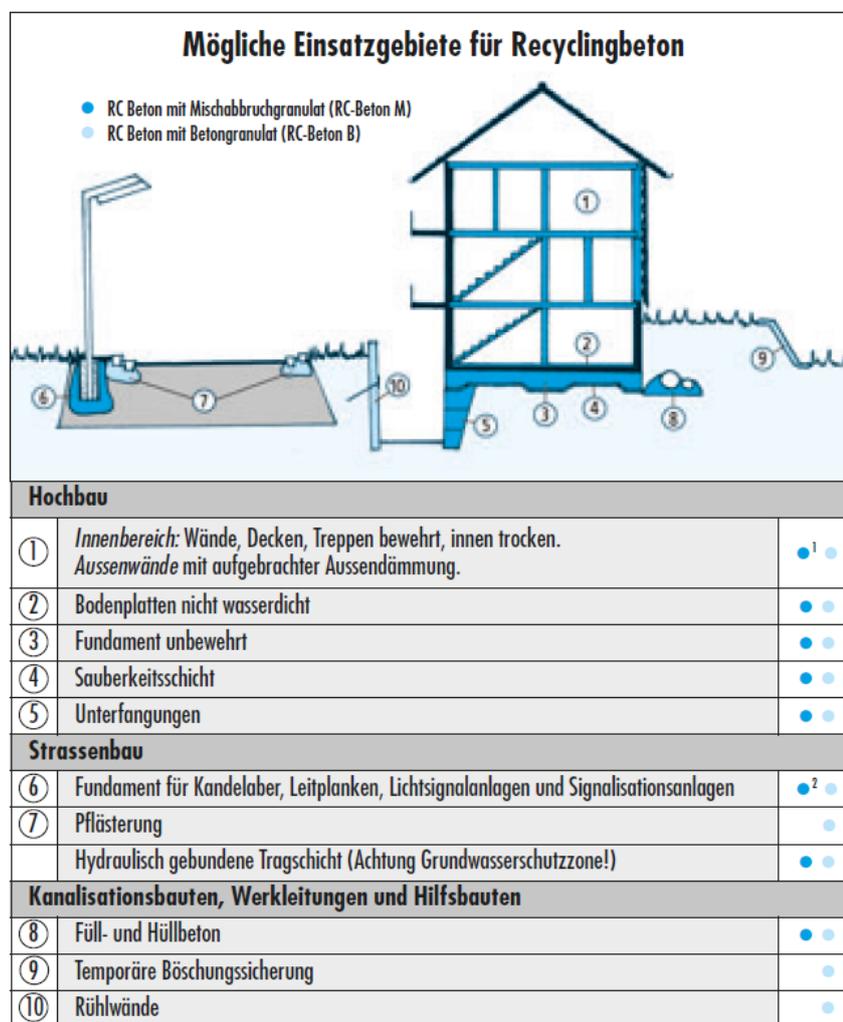
Im Innenbereich ist der Einsatz im Bereich von tragenden Wänden oder Decken mit kleineren Spannweiten problemlos möglich. Auch im Fundamentbereich oder als Bodenplatte stößt der Recyclingbeton noch nicht an seine Grenzen. Grundsätzlich sollte Recyclingbeton aber keiner ständig nassen Umgebung (zum Beispiel Straßen, Schwimmbäder), keinem Frost oder chemischen Angriffen ausgesetzt werden. Weiters dürfen keine ermüdenden oder vorgespannten Bauteile

⁷¹ Vgl. ÖNORM B4710-1, S. 153

⁷² Vgl. Kühn, Anwendungsmöglichkeiten von Recyclingbeton im Hoch- und Ingenieurbau, S. 100

mit Recyclingbeton hergestellt werden, weil Recyclingbeton ein erhöhtes Schwindverhalten aufweist.

Da der Großteil des Anwendungsbereichs Beton im Hochbau auf keine dieser Umstände zutrifft, kann der Recyclingbeton ein sehr breites Anwendungsfeld abdecken. Auch im Straßenbau findet dieser Beton dort viele Einsatzmöglichkeiten, wo er keine allzu großen Belastungen standhalten muss, zum Beispiel in der Funktion als Hüllbeton oder hydraulisch gebundene Tragschicht. In der folgenden grafischen Darstellung sind alle möglichen Anwendungsbereiche von Recyclingbeton noch einmal zusammengefasst.⁷³ Diese stammt aus einer Literatur-Quelle in der Schweiz, weshalb die Bezeichnungen RC-B und RC-M verwendet werden. Im Abschnitt 2.3.3 werden diese Bezeichnungen genauer erläutert.



¹ Stützen, Wände und Decken mit geringer Spannweite und Treppen geringer Schlankeit.

² Nicht im Bereich einer Frost-Tausalzbeanspruchung.

Quelle: Kofu

Abbildung 13: Mögliche Einsatzgebiete von Recyclingbeton

⁷³ Vgl. Hoffmann; Laubis: Mischabbruch kann sinnvoll bei Neubauten eingesetzt werden, S.15

2.6 Hemmnisse für den breiten Einsatz von Recyclingbeton

- Das Hauptproblem von bislang wenig verbreiteten Recyclingbeton ist, dass in einer österreichweiten Betrachtung die AuftraggeberInnen ihn noch nicht als „richtigen Beton“ akzeptieren, da es noch nicht sehr viele aussagekräftige repräsentative Projekte oder Erfahrungswerte mit dem neuen Verbundwerkstoff gibt. Die Akzeptanz von Recyclingbeton hängt in hohem Maß auch von der regionalen Verfügbarkeit ab.
- Bei einem Großteil der BauherrInnen wird der Recyclingbeton vor allem deshalb nicht in Betracht gezogen, da das Wissen darüber kaum verbreitet ist.⁷⁴
- Weiters lassen die gesetzlichen Regelungen den breiten Einsatz von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung nur unter eingeschränkten Bedingungen zu, was auch dazu führt, dass sich kaum jemand dazu entscheidet, Recyclingbeton zu verwenden. Es sollten daher die normativen Hindernisse etwas gelockert werden, damit für die Betonhersteller der Spielraum für Mischrezepte vergrößert wird.
- Ein weiteres Hemmnis sind die Mehrkosten, die durch die Forschung, das Recyceln von Baustoffen und die zusätzlichen Anlagen im Frischbetonwerk entstehen. Der ökonomische Vorteil des Einsatzes von rezyklierter Gesteinskörnung ist im Gegensatz zu herkömmlicher industriell gefertigter oder natürlicher Gesteinskörnung bisher noch nicht erkennbar. In den meisten Fällen wird der Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung wirtschaftlich nicht belohnt, sondern eher mit höheren Kosten belastet. Die Mehrkosten kommen durch den Einsatz von Großgeräten in der Aufbereitung und bei den Transportwegen zum Frischbetonwerk zustande. Viele Unternehmen beteiligen sich deswegen noch nicht an der Produktion von Recyclingbeton.
- Da es aktuell so wenige Hersteller gibt, ist eine flächendeckende Versorgung in Österreich nur eingeschränkt möglich. Letzten Endes bestimmt der Transportweg zur Baustelle den Preis des Frischbetons. Bei langen Transportwegen wird damit automatisch auch der Beton für den Käufer teurer und somit unattraktiver.⁷⁵

Im Zuge der Diplomarbeit sind wir mit der Firma Wopfinger Transportbeton in Kontakt getreten. Das Unternehmen ist österreichweit einer der wenigen Betriebe, das sich auf die Herstellung von

⁷⁴ Vgl. Kühn, Anwendungsmöglichkeiten von Recyclingbeton im Hoch- und Ingenieurbau, S. 102

⁷⁵ Vgl. Kühn, Anwendungsmöglichkeiten von Recyclingbeton im Hoch- und Ingenieurbau, S. 191

Recyclingbeton spezialisiert hat. Es widmet sich aber nicht nur der Herstellung von Recyclingbeton, sondern auch der Aufbereitung der Gesteinskörnung. Der Firma Wopfinger gelingt es daher durch die eigene Aufbereitung, den hergestellten Recyclingbeton am Markt um den gleichen Preis anbieten zu können wie den Primärbeton.

Aktuell existieren weder ökonomische noch gesetzliche Anreize, die eine Steigerung des Einsatzes von Recyclingbeton unterstützen. Sollten jedoch in den nächsten Jahren die ökonomischen Anreize/Zwänge zunehmen, dann wird der Recyclingbeton sicher seinen Platz in der Baubranche finden, und kein Nischenprodukt mehr darstellen. Als ökonomische oder gesetzliche Zwänge werden der Rückgang von Kiesressourcen, die Verknappung von Deponieräumen, die Zerstörung der Umwelt, der Eingriff in die Natur oder die Ausbeutung von Flächen verstanden.⁷⁶

Die technischen Voraussetzungen sind jedenfalls kein Hemmnis für den breiten Einsatz des Recyclingbetons. Vom Abbruch der Baurestmasse über die Aufbereitung, der Einsatz der Recyclingbaustoffe bis hin zur Weiterverarbeitung auf der Baustelle sind alle technischen Mittel in vollem Umfang vorhanden. Es werden immer mehr Möglichkeiten entwickelt, die den Rückbau und den Aufbereitungsprozess vereinfachen. In Zukunft werden immer besser sortierte und aufbereitete rezyklierte Gesteinskörnungen auf ihre Verarbeitung zu Recyclingbeton warten.⁷⁷

⁷⁶ Vgl. Kühn, Anwendungsmöglichkeiten von Recyclingbeton im Hoch- und Ingenieurbau, S. 192

⁷⁷ Vgl. Kühn, Anwendungsmöglichkeiten von Recyclingbeton im Hoch- und Ingenieurbau, S. 191

3 Umweltaspekt

3.1 Kreislaufwirtschaft

Ziel der Kreislaufwirtschaft ist es, eingesetzte Materialien bestmöglich im Kreislauf zu führen und den Anfall von nicht verwertbaren Abfällen zu vermeiden. Nicht der Lebenszyklus des Produktes, sondern der Ressource, ist ausschlaggebend.

Bei der Kreislaufwirtschaft geht es vor allem darum, aus Abfällen wieder neue Produkte zu gewinnen, um auf diese Weise den Wertverlust zu minimieren und die Materialeigenschaften des gewonnenen Recyclingmaterials bestmöglich zu nutzen. Sollten die gewonnenen Recyclingmaterialien für den ursprünglichen Zweck nicht mehr einsetzbar sein, sollen diese für untergeordnete Nutzungen verwendet werden. Diesen Vorgang nennt man Downcycling. Das Recyclingmaterial kann somit erneut eingesetzt werden und ersetzt zugleich Primärrohstoffe, die für die untergeordnete Nutzung benötigt werden würden.⁷⁸

In dem Bild wird die Kreislaufwirtschaft anhand eines Autos beschrieben. Mit der Weiterverarbeitung von einem Produkt fallen auch immer Abfälle an. Jedes Produkt schleppt also auch einen sogenannten ökologischen Rucksack mit sich. Kann ein Produkt ohne oder nur mit weniger energieaufwändiger Aufbereitung wiedereingesetzt werden, ist der ökologische Rucksack wesentlich kleiner, als wenn das Produkt vollkommen recycelt werden muss, um die Rohstoffe wieder einsetzen zu können.⁷⁹

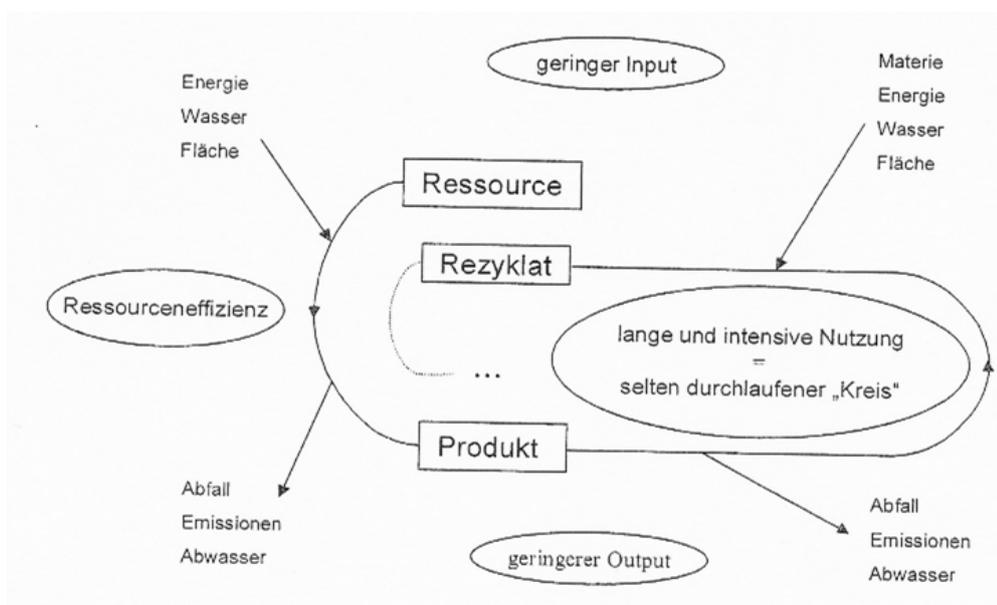


Abbildung 14: Idealer Stoffkreislauf in einer Kreislaufwirtschaft

⁷⁸ Vgl. Förstner, Ulrich: Umweltschutztechnik, Berlin: Springer-Verlag, 2008, S. 333

⁷⁹ Vgl. Förstner, Umweltschutztechnik, S. 328

Das oben abgebildete Bild beschreibt den idealen Verlauf eines Produkts in einer ökologischen Kreislaufwirtschaft. Um das zu erreichen müssen Produkte anders gestaltet werden. Einzelteile müssen austauschbar sein, um das Produkt leichter reparieren zu können. Weiters müssen die einzelnen Komponenten leichter voneinander trennbar sein, um eine Entsorgung oder eine Weiterverarbeitung zu ermöglichen. Das Produkt soll langlebig und möglichst zeitlos gestaltet werden, um einen langen Lebenszyklus zu erreichen.⁸⁰

Von einer ökologischen Kreislaufwirtschaft sind wir aber noch weit entfernt. Da der Markt aktuell mit Billigprodukten geflutet wird, tritt die Produktqualität immer mehr in den Hintergrund. Die Produktlebensdauer wird damit aufgrund der geringeren Qualität stetig verkürzt und oftmals sind Reparaturen fast genauso teuer wie die niedrigen Preise für Neuwaren. Die Konsumenten entscheiden sich dann immer häufiger für einen Neukauf.

3.1.1 Lebenszyklus am Beispiel eines Gebäudes

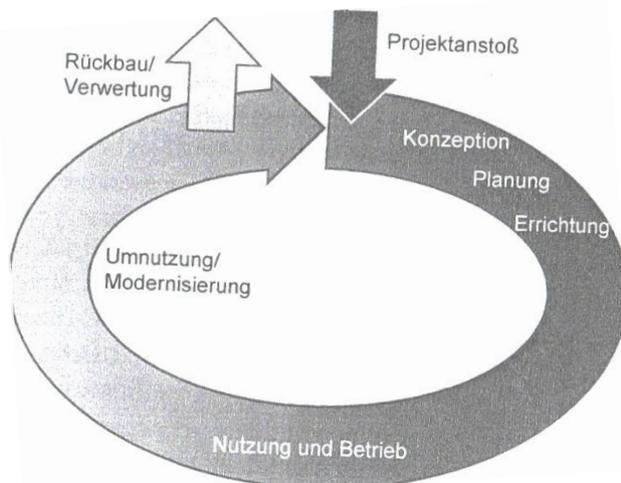


Abbildung 15: Idealer Lebenszyklus eines Gebäudes

Betrachtet man den Lebenszyklus eines Gebäudes, so stellt man fest, dass es in der Regel nur zwischen 50 und 100 Jahre genutzt wird. Die Zeit der Bauphase nimmt daher nur einen sehr kurzen Teil des Lebenszyklus ein, obwohl während ihr die ausschlaggebendsten Entscheidungen getroffen werden. Der entsprechende Faktor, der die Dauer des Lebenszyklus erheblich beeinflusst, ist die Planung. So können in der Planungsphase die Kosten und die

Umweltbelastung am effizientesten beeinflusst werden, je weiter die Baumaßnahmen vorge-schritten sind, desto weniger kann indessen verändert werden. Um den Lebenszyklus eines Hau-ses nachhaltig optimieren zu können, muss man den ganzen Lebenszyklus des Gebäudes betrach-ten und nicht nur den Aufwand für die Errichtung oder für die Erneuerung. Innerhalb des großen Zyklus sollten daher kleinere Lebenszyklen wie die Modernisierung oder Umnutzung angedacht werden, die wiederum den großen Zyklus verlängern. Der gesamte Lebenszyklus ist erst nach dem Rückbau des Gebäudes abgeschlossen. Wenn die Baurestmassen jedoch nach dem Abbruch

⁸⁰ Vgl. Förstner, Umweltschutztechnik, S. 365

wiederverwertbar sind, werden diese aufbereitet und als Tragschicht oder Recyclingbeton wieder einem neuen Lebenszyklus zugeführt. So kann eine Kreislaufwirtschaft entstehen, die wertvolle Ressourcen ebenso wie die Umwelt schonen.⁸¹

Bei der Auswahl der Baustoffe soll das Ziel in der Minimierung der Belastung für Bewohner und Umwelt liegen. Dafür soll die Lebensdauer so lange wie möglich genutzt werden, die Wartungskosten indessen so niedrig wie möglich, ebenso die Optionen der Rückbaufähigkeit sowie der Wiederverwertbarkeit so hoch wie möglich gehalten werden. Um diese Kriterien erfüllen zu können, ist es wichtig, bei der Wahl der Baustoffe in der Planungsphase eines Gebäudes auf mehrere Faktoren zu achten. Dazu gehören der Ressourcenverbrauch des Baustoffes, die Auswirkung auf die Umwelt, die Schadstoffbelastung, die Lebensdauer und die Rückbau- oder Recyclingfähigkeit.

Zum Ressourcenverbrauch gehören die zur Herstellung verwendeten Stoffe sowie Hilfsstoffe, ebenso der Energieverbrauch während der Produktion und des Transportes. Als Grundsatz gilt, umso naturbelassener das Produkt und umso kürzer die Transportwege, desto besser der Ressourcenverbrauch. Als Umweltwirkung werden die Folgen auf die Umwelt jedes Baustoffs während ihres gesamten Lebenszyklus betrachtet. Dazu zählen unter anderem der nicht erneuerbare und der erneuerbare Primärenergiebedarf sowie das Versauerungspotential oder das Treibhauspotential.⁸² Um die Schadstoffbelastung zu minimieren, soll man den Einbau von organischen Substanzen vermeiden.⁸³

Bei der Rückbau- und Recyclingfähigkeit geht es darum, Produkte einzusetzen, die am Ende ihrer Nutzungsdauer möglichst einfach demontiert und recycelt werden können. Zusätzlich sollte auch darauf geachtet werden, dass für die aus den Produkten gewonnenen Recyclingmaterialien ein entsprechender Einsatzbereich gegeben ist.

Das ist vor allem für Bauteile mit einer kürzeren Lebensdauer von sehr hoher Wichtigkeit. Deswegen sollten auch Bauteile mit unterschiedlich langer Lebensdauer so verbaut werden, dass sie leicht voneinander zu trennen sind. Am besten ist es, Verbundbaustoffe so gut wie möglich wegzulassen, da diese meistens nicht sortenrein sortiert werden können, weshalb diese so schwer für eine Recyclingnutzung zu gebrauchen sind.⁸⁴

⁸¹ Vgl. Friedrichsen, Stefanie: Nachhaltiges Planen, Bauen und Wohnen, Berlin: Springer Vieweg, 2018, S.3

⁸² Vgl. Friedrichsen, Nachhaltiges Planen, Bauen und Wohnen, S.127

⁸³ Vgl. Friedrichsen, Nachhaltiges Planen, Bauen und Wohnen, S.128

⁸⁴ Vgl. Friedrichsen, Nachhaltiges Planen, Bauen und Wohnen, S.149

Wenn diese Faktoren bei der Planung beachtet werden, dann kann der Lebenszyklus des gesamten Gebäudes verlängert werden, da zum Beispiel kaputte Bauteile leicht ersetzt oder repariert werden können. Andererseits können beim Rückbau und Abbruch des Gebäudes die Baustoffe ohne großen Sortieraufwand oder Verschmutzungen weiterverwendet oder recycelt werden. So kann ein neuer Lebenszyklus beginnen und ein alter Kreislauf geschlossen werden.

3.1.2 Probleme der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen

In Österreich hat sich das Prinzip der Kreislaufwirtschaft im Baubereich noch nicht durchgesetzt. Es werden in der Baubranche kaum Recyclingprodukte verwendet, und wenn, dann meistens nur für untergeordnete Funktion wie Tragschichten, obwohl der Recycling- Baustoff meist viel effizienter eingesetzt werden könnte. Das größte Problem ist, dass viele aufbereitete Recycling-Baustoffe in einem Zwischenlager auf ihren Einsatz warten und keinem neuen Kreislauf zugeführt werden.

Der Markt für Recyclingbeton hat noch immer nicht jene Aufmerksamkeit erhalten, die ihm gerecht wird. Es existiert aktuell noch keine große Nachfrage nach Recycling- Baustoffen, weil die Akzeptanz, wonach das Recyclingmaterial gleichwertig bei der Betonherstellung mit den Primärrohstoffen ist, noch nicht erzielt wurde.

Der Markt für Recyclingbeton in Österreich müsste mit ökonomischen oder gesetzlichen Anweisungen gefördert werden, zum Beispiel in dem man den Verbrauch von Primärressourcen unattraktiver gestaltet oder ein Deponieverbot für rezyklier-fähiges Material erlässt. Das Image der Recycling-Baustoffe ist generell nicht sehr gut, weshalb sich viele gar nicht mit der Thematik Recyclingbeton auseinandersetzen. Es wäre wichtig das Bewusstsein in der Baubranche zu schärfen, wonach Recycling-Baustoffe für bestimmte Verwendungsgruppen gleichwertig jenen der Primärrohstoffen sind.

Außerdem könnten von der öffentlichen Hand mehrere Vorzeigeobjekte in Österreich in Auftrag gegeben werden, wodurch mehr Aufmerksamkeit geschaffen wird. Es gibt also viel Handlungsbedarf, bis eine Kreislaufwirtschaft in der Baubranche überhaupt entstehen kann. Solange keine regulativen Begrenzungen an den Primärrohstoffen getroffen werden, wird ein Großteil der Konsumenten weiterhin auf diese anstatt auf Sekundärbaustoffe/ Recycling- Baustoffe zurückgreifen.⁸⁵

⁸⁵ Vgl. TU Wien: Konzept zur nachhaltigen Nutzung von Baurestmassen basierend auf der thematischen Strategie für Abfallvermeidung und Abfallrecycling der EU, Wien: TU Wien, 2011, S.1-3

3.1.3 Ausblick in die Zukunft

Künftighin sollte ein geschlossener Kreislauf von Produkten entstehen, damit der Lebenszyklus der einzelnen Produkte länger andauert und weniger Primärrohstoffe verwendet werden müssen.

Die Schweiz beschäftigt sich sehr intensiv mit diesem Thema. In den folgenden zwei Grafiken wird der Stofffluss im Jahr 2000 mit dem gewünschten geschlossenen Stoffkreislauf gegenübergestellt. Der geschlossene Stoffkreislauf wird auch als „closed loop“ und der offene Stoffkreislauf als „open loop“ bezeichnet. Der entscheidende Unterschied zwischen den zwei Kreisläufen ist der Anteil an Recycling und Wiederverwendung beim Bau von Gebäuden. Stand 2000 werden für den Bau von Gebäuden nur 3 % der Baustoffe aus dem Abbruch von Gebäuden recycelt und 4,5 % wiederverwendet und dem Kreislauf so wieder zugeführt. Bis 2050 soll sich der Wiederverwendungs- und Recyclinganteil gemeinsam um ein Vielfaches vergrößern. So kann der neue Rohstoffanteil von 60 % auf 5 % reduziert werden. So können Deponieflächen gespart und der Kiesabbau verringert werden.⁸⁶

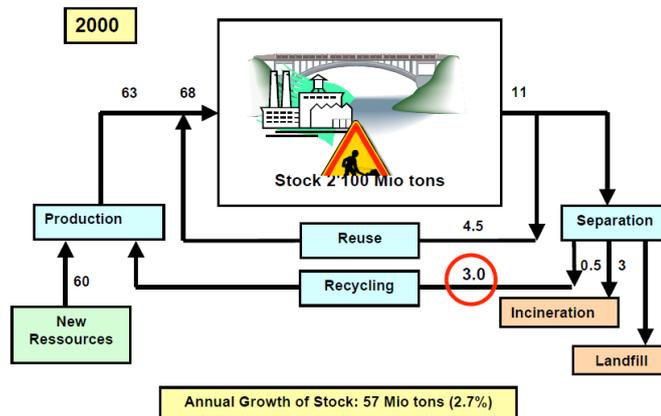


Abbildung 16: Stoffkreislauf 2000 in der Schweiz (Zahlen in Prozent)

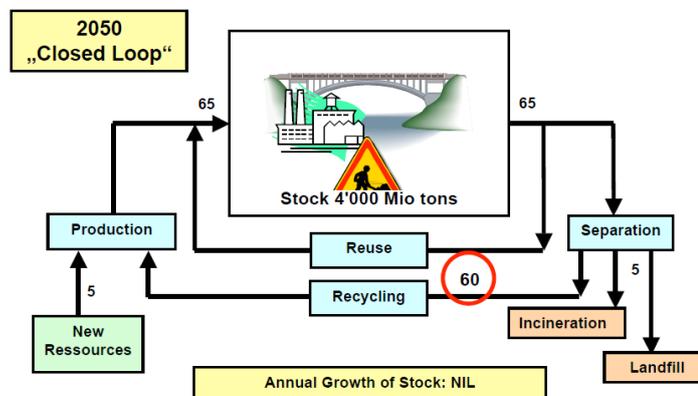


Abbildung 17: Funktionierender Stoffkreislauf 2050 (Zahlen in Prozent)

⁸⁶ Vgl. Moser, Konrad: SIA-Merkblatt 2030 Recyclingbeton, Zürich: Normenkommission SIA 262 Betonbau, 2010, S. 8,9

Am 05.10.2020 wurde beim Jubiläumskongress des Baustoff Recycling Verbands über die Nachhaltige Nutzung von natürlichen Ressourcen sowie über die noch ausbaufähige Kreislaufwirtschaft im Bausektor gesprochen. Um eine nachhaltige Verbesserung in diesem Bereich bewirken zu können wurden mehrere Maßnahmen definiert.

Der wohl wichtigste Punkt ist, dass in Zukunft ein klarer politischer Wille bekundet werden muss, um die Kreislaufwirtschaft anzukurbeln.

Eines der größten Potentiale für die Kreislaufwirtschaft befindet sich im Bausektor, weshalb genau auf diesen ein stärkeres Augenmerk gelegt werden sollte.⁸⁷

Um diesem Ziel näher zu kommen, muss in Zukunft genauer zwischen Bauwerk, Bauteil und Bauprodukt unterschieden werden. Weiters sollten gesetzliche Vorgaben genauer formulieren, was nach dem Abbruch eines Bauwerks mit den Baustoffen und Bauteilen geschehen soll. Nach derzeitigen Vorgaben heißt es, dass ein neues Gebäude so errichtet werden muss, dass das Bauwerk, die enthaltenen Baustoffe und Bauteile nach dem Rückbau wiederverwendet oder recycelt werden können. Dabei ist jedoch der genaue Anteil von wiederverwendbarem oder recyclebarem Material nicht angegeben und das Material muss auch nicht wieder in Gebäudeteilen verwendet werden. In den neuen Vorgaben sollte ein genauer Prozentsatz definiert sein, der austauschbar, wiederverwendbar oder recyclingfähig ist.⁸⁸

Um eine Kreislaufwirtschaft aufzubauen und auch am Laufen zu halten, ist ein Prozess, der sich über mehrere Jahre zieht, erforderlich. Trotzdem muss der erste Schritt in die richtige Richtung gemacht werden.

⁸⁷ Vgl. Maydl, Peter: Jubiläumskongress „30 Jahre BRV“, Wien: 2020, S. 16

⁸⁸ Vgl. Maydl, Peter, Jubiläumskongress „30 Jahre BRV“, S. 13,15

4 Versuche

4.1 Veranlassung und Zielsetzung

Um uns nicht nur theoretisch mit der komplexen Thematik „Recyclingbeton“ auseinanderzusetzen, habe wir uns dazu entschieden, selbst Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung herzustellen. Dabei wollten wir wissen, wie sich der Recyclingbeton in seiner Herstellung, Verarbeitung und seinen technischen Eigenschaften vom herkömmlichen Beton unterscheidet.

Weiters war es uns wichtig, die Vorgaben der ÖNORM B 4710-1 bezüglich den Austauschgrenzen der Gesteinskörnung zu hinterfragen und auf ihre Sinnhaftigkeit und Wirtschaftlichkeit zu prüfen. Aus diesem Grund haben wir sowohl Betonproben mit normgemäßen als auch mit größeren Austauschmengen hergestellt. Darüber hinaus haben wir bei zwei Mischrezepten komplett auf die natürliche Gesteinskörnung verzichtet und Recyclingbeton aus 100 % rezykliertem Material hergestellt.

Als Recyclingmaterial verwendeten wir Hochbaurestmasse der Qualität RH-B und Betonabbruch der Qualität RB-A2. Die Hochbaurestmasse RH-B besteht bis zu 30% aus Ziegelabbruch und es wird momentan nach neuen Einsatzmöglichkeiten für dieses Material gesucht. Aus diesem Grund haben wir mehrere Versuche mit RH-B Material durchgeführt. Dabei wurde zwischen trocken-aufbereitetem Material und nassaufbereitetem Material unterschieden und aus beiden Materialarten Betonproben hergestellt.

Für den Betonabbruch der Qualität RB-A2 gibt es zwar schon zahlreiche Einsatzgebiete, zum Beispiel als Tragschicht im Unterbau, jedoch kann Betonbruch auch hochwertiger in der Betonproduktion eingesetzt werden.

Um Recyclingbeton aus RH-B und RB-A2 miteinander vergleichen zu können, haben wir Betonproben mit den gleichen Austauschwerten hergestellt.

Anhand der Versuche sollte sich zeigen, wie das Recyclingmaterial die Fest- und Frischbetoneigenschaften beeinflusst und ob der Beton auch im breiten Einsatz auf Baustellen verarbeitet werden kann.

4.2 Versuchskonzept

4.2.1 Übersicht

Versuchsnummer	Versuchsbezeichnung	Beschreibung	Herstelldatum
Versuch 1	Nat. GK 100%	Referenzbeton mit 100% natürlicher Gesteinskörnung (Primärbeton)	12.01.2021
Versuch 2.1	RB-A2 38% (1)	Recyclingbeton mit 38% rezyklierter Gesteinskörnung RB-A2	12.01.2021
Versuch 2.2	RB-A2 38% (2)	Recyclingbeton mit 38% rezyklierter Gesteinskörnung RB-A2, Kernfeuchteansatz optimiert	13.01.2021
Versuch 3	RB-A2 100%	Recyclingbeton mit 100% rezyklierter Gesteinskörnung RB-A2	15.01.2021
Versuch 4	RH-B 25%	Recyclingbeton mit 25% rezyklierter Gesteinskörnung RH-B	15.01.2021
Versuch 5	RH-B 65%	Recyclingbeton mit 65% rezyklierter Gesteinskörnung RH-B	19.01.2021
Versuch 6	RH-B 100%	Recyclingbeton mit 100% rezyklierter Gesteinskörnung RH-B	19.01.2021
Versuch 7	RH-B 25% ungewaschen	Recyclingbeton mit 25% rezyklierter Gesteinskörnung RH-B (ungewaschen)	19.01.2021
Versuch 8	RB-A2 25%	Recyclingbeton mit 25% rezyklierter Gesteinskörnung RB-A2	29.01.2021

4.2.2 Erläuterung

Versuch Nat. GK 100%: Dieser Versuch stellte den Referenzbeton aus 100 % natürlicher Gesteinskörnung (Primärbeton) dar.

Versuch RB-A2 25%: Von der natürlichen Gesteinskörnung wurden 25% durch Recyclingmaterial RB-A2 ersetzt. Es wurde damit der von der ÖNORM B 4710-1 maximal zulässige Austauschwert von RB-A2 nicht erreicht.

Versuch RB-A2 38%: Es wurde der von der ÖNORM B 4710-1 maximal zulässige Austauschwert von 38 % RB-A2 gänzlich ausgeschöpft. Da die ersten Frischbetonproben eine sehr niedrige (steife) Konsistenz hatten, wurde der Kernfeuchteansatz in der Mischberechnung optimiert (siehe Mischberechnungen im Anhang) und der Versuch wiederholt.

Versuch RB-A2 100%: Die natürliche Gesteinskörnung wurde vollständig durch RB-A2 Material ausgetauscht. Der maximal zulässige Austauschwert wurde dabei weit überschritten.

Versuch RH-B 25%: Der von der ÖNORM B 4710-1 maximal zulässige Austauschwert von 25 % für RH-B wurde gänzlich ausgeschöpft.

Versuch RH-B 25% ungewaschen: Der von der ÖNORM B 4710-1 maximal zulässige Austauschwert von 25 % für RH-B wurde gänzlich ausgeschöpft, wobei das RH-B Material nicht im Nassverfahren aufbereitet war. Es sollte damit der Einfluss des Aufbereitungsverfahrens untersucht werden (Details der Aufbereitung siehe Abschnitt 1.7 bzw. Abschnitt 4.3.1).

Versuch RH-B 65%: Die Austauschrate betrug 65%. Der Grenzwert der ÖNORM-B-4710 wurde bereits überschritten.

Versuch RH-B 100%: Die natürliche Gesteinskörnung wurde vollständig durch RH-B Material ausgetauscht. Der maximal zulässige Austauschwert wurde dabei weit überschritten.

4.3 Rezyklierte Gesteinskörnungen

4.3.1 RH-B Material

4.3.1.1 RH-B Material nassaufbereitet

Normgemäßes RH-B Material wurde uns von der Firma Wopfinger Transportbeton zur Verfügung gestellt. Es wurde mit dem Nassaufbereitungsverfahren mit der erforderlichen Sieblinie hergestellt. Das Material wird täglich einer werksinternen Prüfung unterzogen und wöchentlich in einem Labor geprüft und kann somit qualitätsüberprüft für die Herstellung von Recyclingbeton verwendet werden.

Informationen der Kernfeuchte und Sieblinien haben wir direkt aus dem Prüfprotokoll der Qualitätsüberprüfung übernommen.

Rohdichte und Wasseraufnahme gem. EN 1097-6, Abschnitt 9 (0/4) bzw. Abschn. 8 (4/16)

Kornklasse		0/4 aus RH-B 0/16	4/16 aus RH-B 0/16
Masse der trockenen Probe	in g	905	1928
Scheinbare Rohdichte ρ_a	Mg/m ³	2,68	2,68
Rohdichte auf ofentrockener Basis ρ_{rd}	Mg/m ³	2,04	2,15
Rohdichte auf wassergesättigter und oberflächentrockener Basis ρ_{ssd}	Mg/m ³	2,28	2,35
Wasseraufnahme WA_{24} nach 24 stündiger Wasserlagerung	M.-%	11,7	9,0

Kernfeuchte gemäß ONR 23303, nach 30 Minuten Wasserlagerung

Kornklasse		2/4 aus RH-B 0/16	4/16 aus RH-B 0/16
Kernfeuchte, nach 30 Minuten	M.-%	8,2	7,0

Tabelle 21: Kernfeuchte aus dem Prüfprotokoll der Firma Wopfinger Transportbeton

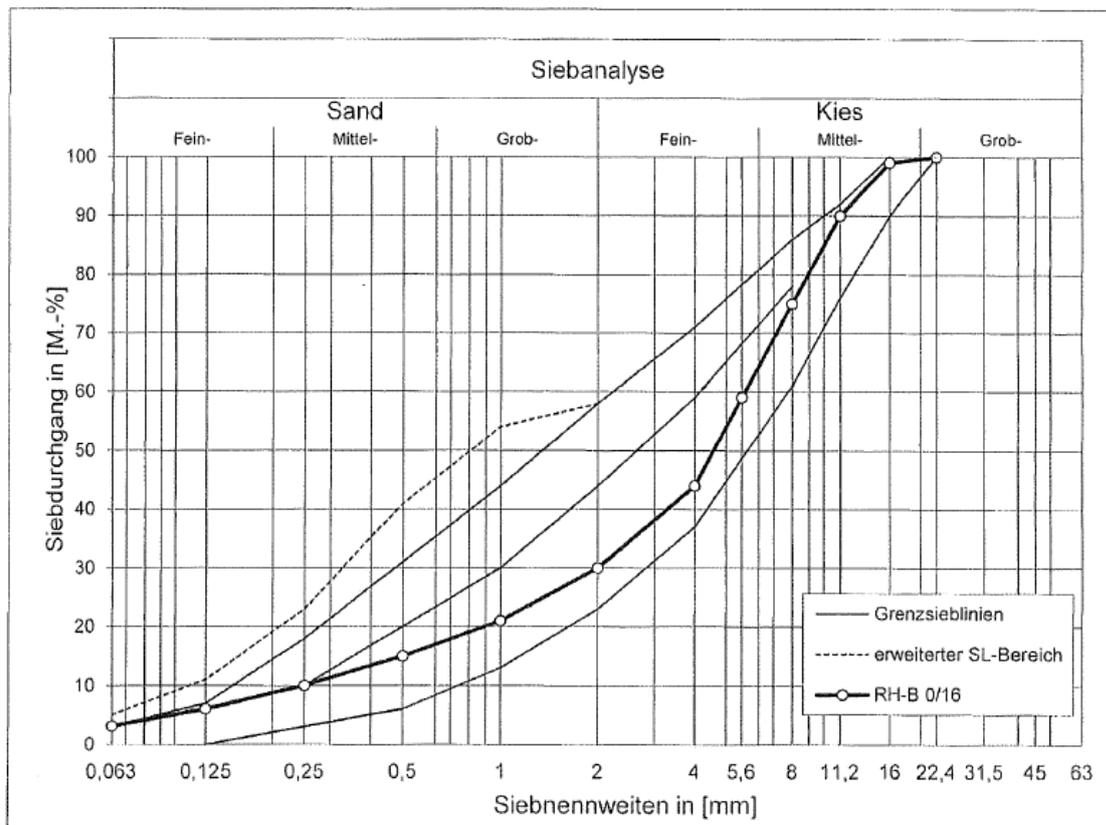


Tabelle 22: Sieblinie zum RH-B Material aus dem Prüfprotokoll der Firma Wopfinger

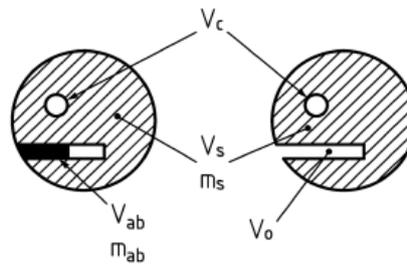


Abbildung 19: 0/16 RH-B Material



Abbildung 18: 0/16 RH-B Material

EN 1097-6:2013 (D)



Gesamtvolumen des Teilchens	$V = V_o + V_c + V_s$
Rohdichte auf ofentrockener Basis	$\rho_{rd} = m_s / V$
Rohdichte auf wassergesättigter und oberflächentrockener Basis	$\rho_{ssd} = \frac{(m_s + m_{ab})}{V}$
Scheinbare Rohdichte	$\rho_a = \frac{m_s}{(V - V_{ab})}$
Wasseraufnahme	$WA = 100 \cdot m_{ab} / m_s = 100 \cdot \rho_w \cdot V_{ab} / m_s$

Bild H.1 — Definitionen von Hohlräumen des Teilchens, Wasseraufnahme und den drei Grundparametern der Rohdichte für ein oberflächentrockenes Teilchen nach beendetem Eintauchen und für das gleiche Teilchen nach dem Trocknen bis zur Massenkonstanz

Abbildung 20: Definition von Hohlräumen eines Kornes

In dieser Abbildung aus der EN 1097-6:2013(D) ist graphisch erklärt, wie die verschiedenen Rohdichten und Wasseraufnahmemengen berechnet werden. Die einzelnen Parameter zu unserer verwendeten Gesteinskörnung sind dem Materialprüfprotokollen der Firma Wopfinger zu entnehmen.

4.3.1.2 RH-B Material ungewaschen

RH-B Material ungewaschen, also trocken aufbereitet, stellt kein normgemäßes Recyclingprodukt für die Betonherstellung dar und ist am Markt nicht erhältlich. Deshalb haben wir uns solches Recyclingmaterial selbst am Bauhof der HTL zusammengestellt.

Uns stand Beton-Ziegel-Splitt (Trockenaufbereitung) der Fa. Hasenöhrl in den Fraktionen 0/4, 0/8 und 0/32 zur Verfügung. Die Kornfraktion 0/4 war qualitätsgeprüftes, fremdüberwachtes Material und für den Versuch direkt verwendbar. Die Kornfraktionen 0/8 und 0/32 waren ein Zwischenprodukt der Firma und nicht qualitätsgesichert. Wir haben uns daraus die Kornfraktionen 4/8 und 8/16 selbst gesiebt. Augenscheinliche Verunreinigungen wie Plastik- und Metallstücke haben wir dabei händisch aussortiert.

Dieser Versuch ist somit kein normativ zulässiger Versuch; es sollte hier in erster Linie der Unterschied zwischen Trockenaufbereitung und Nassaufbereitung des Recycling-Materials untersucht werden.

Da wir die Kernfeuchte dieses Materials nicht bestimmen konnten, sind wir von den Werten des Materials RH-B der Firma Wopfinger ausgegangen.



Abbildung 22: 0/4 Beton-Ziegel-Splitt ungewaschen

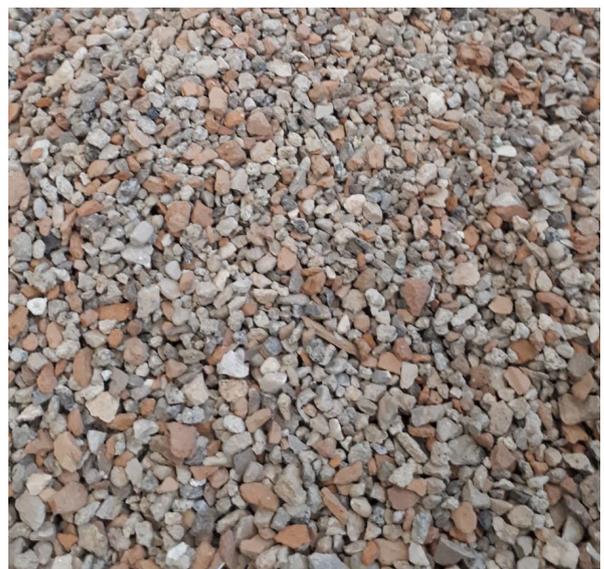


Abbildung 21: 0/8 Beton-Ziegel-Splitt ungewaschen

4.3.2 RB-A2 Material

Normgemäßes RB-A2 Material wurde uns von der Firma Wopfinger Transportbeton zur Verfügung gestellt. Es wurde mit dem Trockenaufbereitungsverfahren mit der erforderlichen Sieblinie hergestellt. Das Material wurde in geschlossenen Säcken angeliefert, wobei die rezyklierte Gesteinskörnung durch die Lagerung im Freien angefeuchtet war. Es wird täglich einer werksinternen Prüfung unterzogen und wöchentlich in einem Labor geprüft und kann somit direkt für die Herstellung von Recyclingbeton verwendet werden.

Die Informationen der Kernfeuchte und die Sieblinie haben wir direkt aus dem Prüfprotokoll der Qualitätsüberprüfung übernommen.

Rohdichte und Wasseraufnahme gem. EN 1097-6, Abschnitt 9 (0/4) bzw. Abschn. 8 (4/16)

Kornklasse		0/4 aus RB-A2 0/16	4/16 aus RB-A2 0/16
Masse der trockenen Probe	in g	909	2005
Scheinbare Rohdichte ρ_a	Mg/m ³	2,77	2,76
Rohdichte auf ofentrockener Basis ρ_{rd}	Mg/m ³	2,35	2,42
Rohdichte auf wassergesättigter und oberflächentrockener Basis ρ_{ssd}	Mg/m ³	2,51	2,54
Wasseraufnahme WA_{24} nach 24 stündiger Wasserlagerung	M.-%	6,4	5,1

Kernfeuchte gemäß ONR 23303, nach 30 Minuten Wasserlagerung

Kornklasse		2/4 aus RB-A2 0/16	4/16 aus RB-A2 0/16
Kernfeuchte, nach 30 Minuten	M.-%	5,5	4,0

Tabelle 23: Kernfeuchte aus dem Prüfprotokoll der Firma Wopfinger Transportbeton

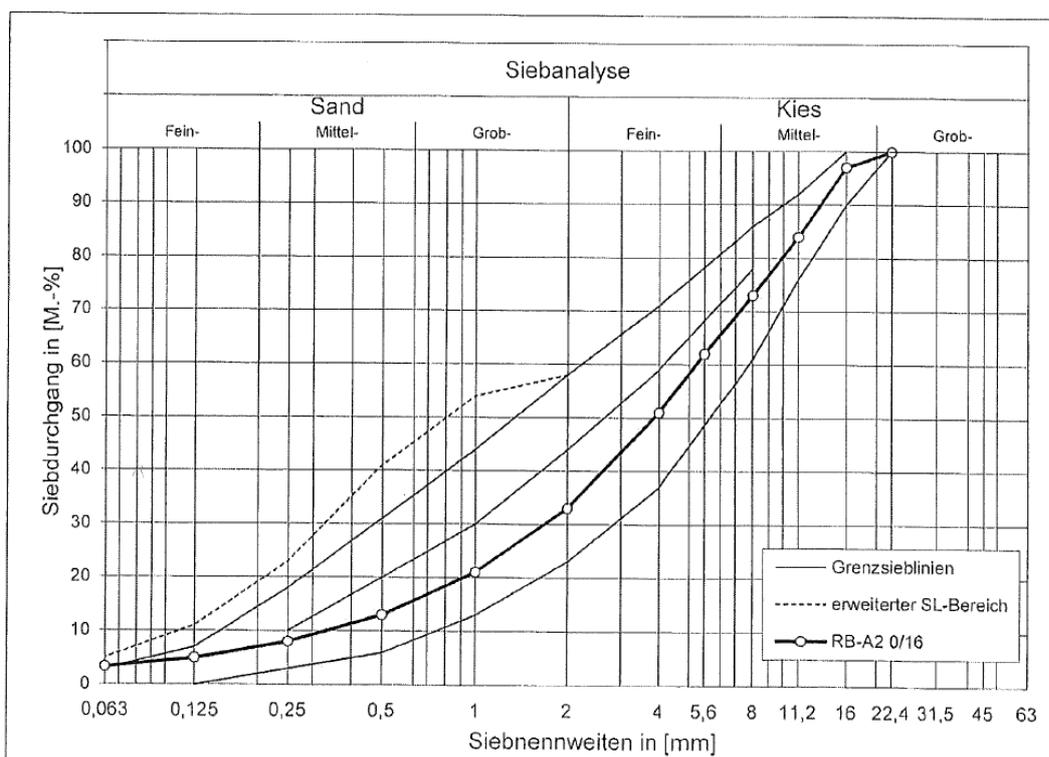


Tabelle 24: Sieblinie zum RH-B Material aus dem Prüfprotokoll der Firma Wopfinger Transportbeton



Abbildung 24: 0/16 RB-A2 Material



Abbildung 23: 0/16 RB-A2 Material

4.4 Mischberechnung

4.4.1 Betonsorte

Bei der Wahl der Betonsorte haben wir uns für einen Beton mit der Bezeichnung C25/30 /XC2/F45/GK16 entschieden.

Der Grund dafür ist der häufige Einsatz von Beton C25/30 in der Baubranche. Um bei den Betonproben mit Recyclingbeton möglichst große Menge von natürlicher gegen rezyklierte Gesteinskörnung austauschen zu können, haben wir die Expositionsklasse XC2 gewählt (siehe Abschnitt 2.2.1.3). Zudem darf Beton mit der Expositionsklasse XC2 bei nasser Umgebung verwendet werden.

Der maximal zulässige W/B-Wert bei der Expositionsklasse XC2 beträgt 0,65 weshalb dieser Wert für alle unsere Mischberechnungen angesetzt wurde.

4.4.2 Konsistenz und Größtkorn

Wir haben uns für die Konsistenz F45 entschieden, weil dieser Beton herkömmlich verdichtet werden kann und häufig eingesetzt wird.

Für unsere Versuche war die Korngruppenverteilung wie folgt zusammengesetzt:

Korngruppe 0/4 mit 48%, Korngruppe 4/8 mit 22% und Korngruppe 8/16 mit 30%. Diese Sieblinie liegt im normgemäßen Sieblinienbereich laut ÖNORM B4710-1.

Die wirksame Wassermenge W ergibt sich aus dem folgenden Wassergehaltsdiagramm, wobei die Bezeichnung „Gesamtwasser“ entsprechend der aktuellen Normung nunmehr als „wirksame Wassermenge W “ bezeichnet wird. Das Diagramm ist für Rundkorn aufgestellt. Trotzdem haben wir es auch für das Recyclingmaterial wegen der Vergleichbarkeit mit Primärbeton verwendet. Für eine Körnung mit Größtkorn GK 16 und die Konsistenz F45 ist demnach eine wirksame Wassermenge W zwischen 195 und 205 Liter pro m^3 Frischbeton zu verwenden. Wir haben für unsere Mischberechnungen eine wirksame Wassermenge von 200 Liter gewählt.

Da unser Verhältnis von Wasser zu Bindemittel maximal 0,65 betragen darf, verwendeten wir für alle Versuche 310 kg pro m^3 Zement.

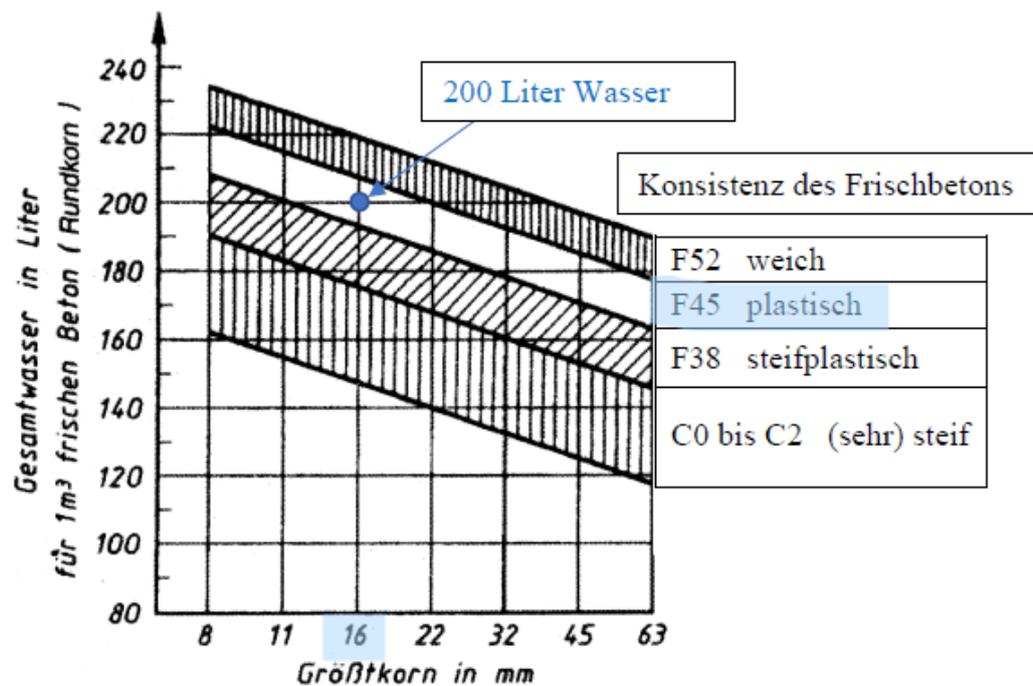


Abbildung 25: Wassergehaltsdiagramm

4.4.3 Oberflächenwassergehalt und Kernfeuchteansatz

Für die Mischberechnungen ist die genaue Einbeziehung des Oberflächenwassers der Gesteinskörnung in die Ermittlung des Zugabewassers erforderlich. Bei rezyklierter Gesteinskörnung muss zusätzlich die in ihr eingelagerte Wassermenge (Kernfeuchte) berücksichtigt werden. Das Einbinden der Kernfeuchte in unsere Mischberechnungen hat uns vor große Herausforderungen gestellt.

Oberflächenwasser:

Oberflächenwasser ist - wie der Name schon sagt – Wasser, das sich an der Oberfläche der Gesteinskörnung befindet. Diese Menge Wasser steht dem Bindemittel (Zement) für die chemische Reaktion zur Verfügung und ist bei der Ermittlung des Zugabewassers (siehe weiter unten) zu berücksichtigen.

Kernfeuchteansatz:

Die Menge Wasser an Kernfeuchte W_K ist jene Menge Wasser, die eine porige Körnung in sich aufnimmt. Diese Feuchte ist auch noch im erhärteten Beton dort eingelagert. Natürliche Gesteinskörnungen enthalten kaum Kernfeuchte. Wir haben deshalb in den Mischberechnungen für die natürlichen Gesteinskörnungen keine Kernfeuchte angesetzt. Rezyklierte Gesteinskörnungen hingegen sind porig, weshalb die Kernfeuchte zu berücksichtigen war.

Bei der Einbindung der Kernfeuchte in unsere Mischberechnungen sind wir wie folgt vorgegangen:

Schritt 1: Ermittlung des Wassergehalts der Gesteinskörnung W_{GK}

Durch Mikrowellentrocknung des Recycling-Materials wird sämtliches Wasser der Gesteinskörnung W_{GK} , also Oberflächenwasser plus die Wassermenge an Kernfeuchte W_{KF} weggetrocknet.

Schritt 2: Ermittlung der Wassermenge an Kernfeuchte W_K aus den Produktangaben des Recycling-Materials. Es werden die unterschiedlichen Kernfeuchten (in M-%, nach 30 Minuten Wasserlagerung) der einzelnen Kornfraktionen gemäß Produktangabe zunächst gemittelt. Als Kernfeuchte für das Material RB-A2 haben wir auf diese Weise 4,75 M.-%, beim RH-B Material sogar 7,6 M.-% ermittelt. Normgemäß werden bei der Ermittlung des Zugabewassers von diesem Ergebnis noch 0,5 Masse-% abgezogen. Diesen Wert haben wir dann für die Ermittlung der Wassermenge an Kernfeuchte W_K herangezogen.

Schritt 3: Berechnung des Zugabewassers:

Die Berechnung für das Zugabewasser W_{zug} erfolgt nach der Formel

$$\text{Formel: } W_{zug} = W - (W_{GK} - W_K)$$

in Worten ausgedrückt: Der Wassergehalt der Gesteinskörnung W_{GK} ist von der wirksamen Wassermenge W abzuziehen. Allerdings darf die in W_{GK} enthaltene Wassermenge an Kernfeuchte

nicht mitabgezogen werden, da sie nicht mit dem Bindemittel reagiert und in der Gesteinskörnung eingelagert wird. Es reagiert nur das Oberflächenwasser ($W_{GK}-W_K$) der Gesteinskörnung mit dem Bindemittel.

Die genaue Mischberechnung zu jedem Versuch befindet sich in den Datenblättern im Anhang.

4.5 Betonprüfungen

4.5.1 Frischbetonprüfungen

4.5.1.1 Luftporentopf

Mit dem Luftporentopf wird der Luftporengehalt des Frischbetons festgestellt. Die Werte sind im Frischbetonprüfprotokoll im Anhang angeführt. Wenn ein Beton viele Luftporen enthält, dann kann sich das negativ auf die Festbetoneigenschaften auswirken.

4.5.1.2 Rohdichte

Die Rohdichte wird auch mit dem Luftporentopf bestimmt. Der Topf besitzt ein Volumen von genau 8 Liter, womit sich die Rohdichte des Frischbetons errechnen lässt. Die Berechnung und die Werte finden sich im Frischbetonprüfprotokoll im Anhang.

4.5.1.3 Wassergehalt

Die Bestimmung der wirksamen Wassermenge W im Frischbeton dient für die Kontrolle des Wasseransatzes in der Mischberechnung und des angesetzten W/B -Wertes.

Der Frischbeton wird in der Mikrowelle getrocknet. Dabei wird das gesamte Wasser W_{ges} des Frischbetons, das ist die Summe aus der wirksamen Wassermenge W und Kernfeuchte W_K , herausgetrocknet. Der Wassergehalt W wird auf den Bindemittelanteil bezogen. Dieser experimentell ermittelte W/B -Wert, der ein wesentliches Qualitätskriterium darstellt, wird mit dem in der Mischberechnung angesetzten W/B -Wert verglichen. (Details siehe Frischbetonprüfprotokoll im Anhang).

4.5.1.4 Ausbreitmaß

Durch das Ausbreitmaß wird die Konsistenz des Betons festgestellt. Die Konsistenz ist für die Art der Verarbeitbarkeit und die Verdichtung ausschlaggebend. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 4.6 dargestellt.

4.5.2 Festbetonprüfungen

4.5.2.1 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit wird am Würfel mit der Kantenlänge 150 mm ermittelt. Die Auflagerflächen der Druckprüfmaschine und des Probekörpers werden saubergewischt und alle losen Bestandteile entfernt. Der Würfel wird auf der unteren Druckplatte zentriert positioniert. Die Prüfgeschwindigkeit ist so zu wählen, dass die maximale Prüflast beim Abdrücken nach 30 s bis 60 s erreicht ist. Die Berechnung erfolgt nach dem Datenblatt im Anhang. Die Ergebnisse sind im Abschnitt 4.6 dargestellt.

4.5.2.2 Biegezugfestigkeit

Ein Prisma mit den Abmessungen von 120mm*120mm*360mm ist bei diesem Versuch zu verwenden. Der Probekörper und die Maschine müssen vor dem Versuch abgewischt und lose Teile entfernt werden. Der Probekörper ist in die Mitte der Prüfmaschine mit der Längsachse des Prismas rechtwinkelig zur Längsachse der Rollen einzubauen. Die Last wird mittig zwischen den Auflagerrollen (Abstand 31 cm) auf den Probekörper aufgebracht und langsam gesteigert, bis der Bruch durch einen Riss in Feldmitte eintritt. Die Berechnung erfolgt nach dem Datenblatt im Anhang. Die Ergebnisse sind im Abschnitt 4.6 dargestellt.

4.5.2.3 Spaltzugfestigkeit

Die Spaltzugfestigkeit wird am Würfel mit der Kantenlänge 150mm ermittelt. Das Prisma wird zentriert auf die untere Druckplatte gelegt. Unterhalb und oberhalb des Probekörpers wird parallel zueinander ein Hartholzfaserstreifen mit einer Breite von 10mm und mit einer Dicke von 4 mm gelegt. Die Last ist langsam zu steigern, bis der Beton in der Mitte auseinanderbricht. Die Berechnung erfolgt nach dem Datenblatt im Anhang. Die Ergebnisse sind im Abschnitt 4.6 dargestellt.

4.5.2.4 Elastizitätsmodul

Für die Bestimmung des E-Moduls wird ein Prisma mit den Abmessungen von 120mm*120mm*360mm verwendet. Vor Beginn der E-Modul Messung ist die Ermittlung der Druckfestigkeit nötig.

Diese Prüfmethode steht am Bauhof der HTL nicht zur Verfügung. Dankenswerterweise hat die Boden- und Baustoffprüfstelle (BPS) diese wichtigen Versuche durchgeführt. Die Ergebnisse dürfen wir in unserer Arbeit darstellen. Die Berechnung erfolgt nach dem Datenblatt im Anhang. Die Ergebnisse sind im Abschnitt 4.6 dargestellt.

4.6 Ergebnisse

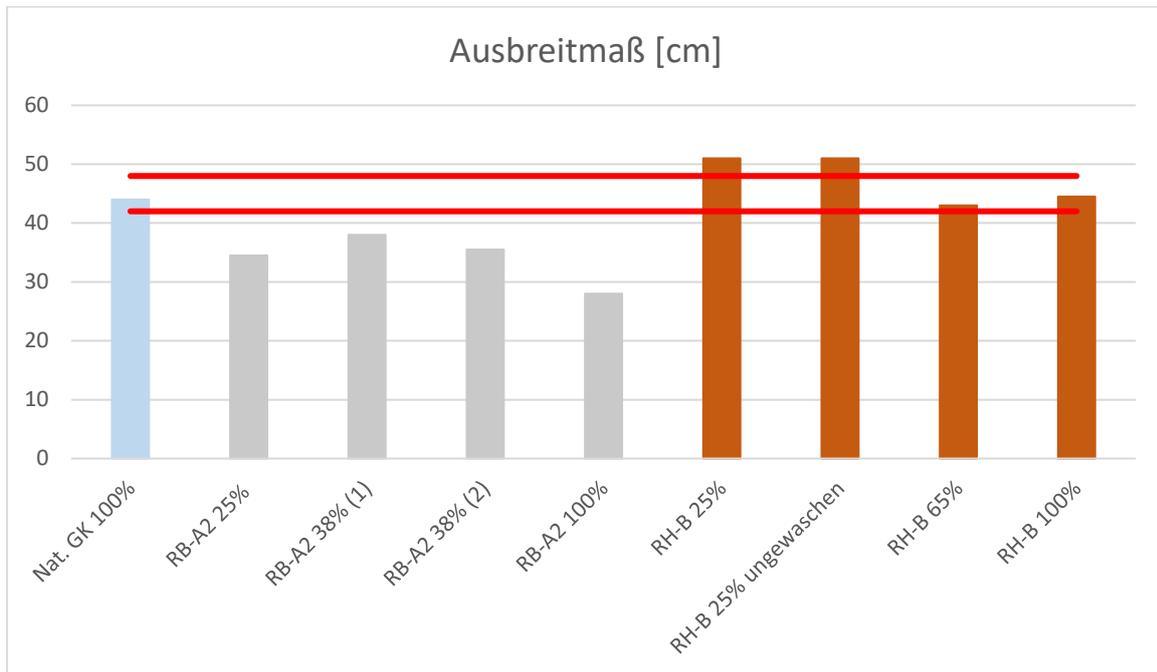


Abbildung 26: Ausbreitmaß aller Versuche. Der Bereich zwischen den horizontalen Linien beschreibt den Konsistenzbereich von F45. Bei RB-A2 100% wurden 2% Fließmittel und bei RH-B 100% wurde 1% Fließmittel dosiert.

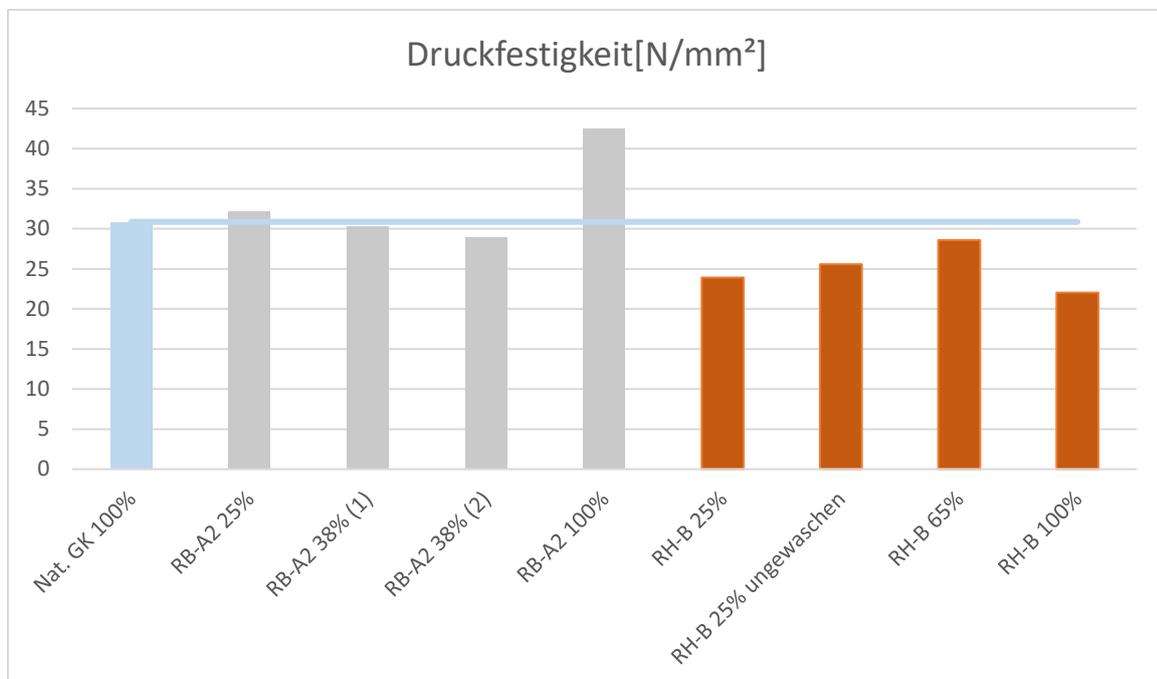


Abbildung 27: Druckfestigkeit aller Versuche zwischen 27 und 30 Tagen nach Herstellung

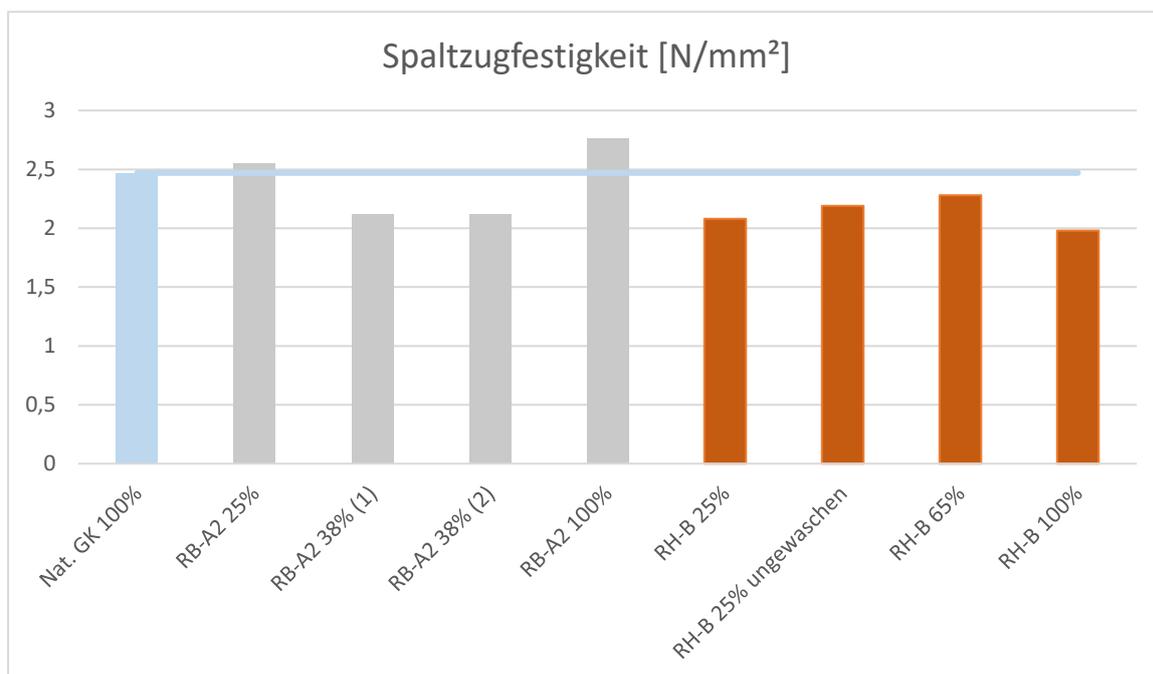


Abbildung 28: Spaltzugfestigkeiten aller Versuche zwischen 27 und 30 Tagen nach der Herstellung. Die horizontale Linie stellt den Referenzwert (Primärbeton Nat. GK 100%) dar.

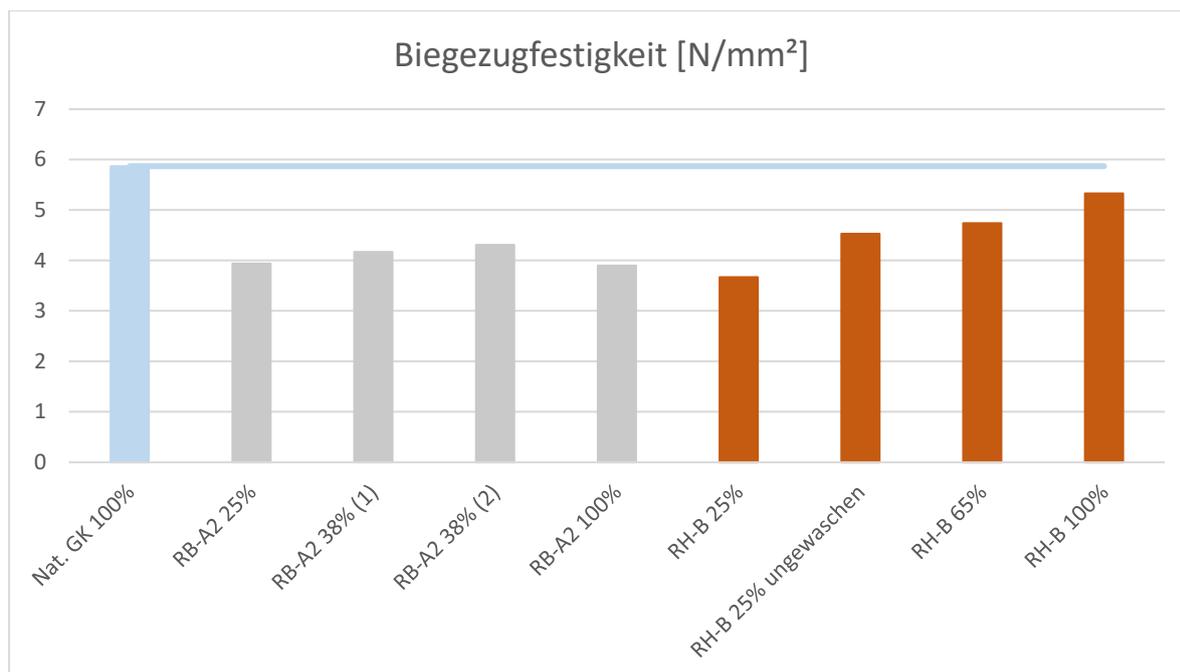


Abbildung 29: Biegezugfestigkeiten aller Versuche zwischen 27 und 30 Tagen nach der Herstellung; der Versuch RB-A2 25% wurde erst nach 54 Tagen geprüft; die horizontale Linie stellt den Referenzwert (Primärbeton Nat. GK 100%) dar.

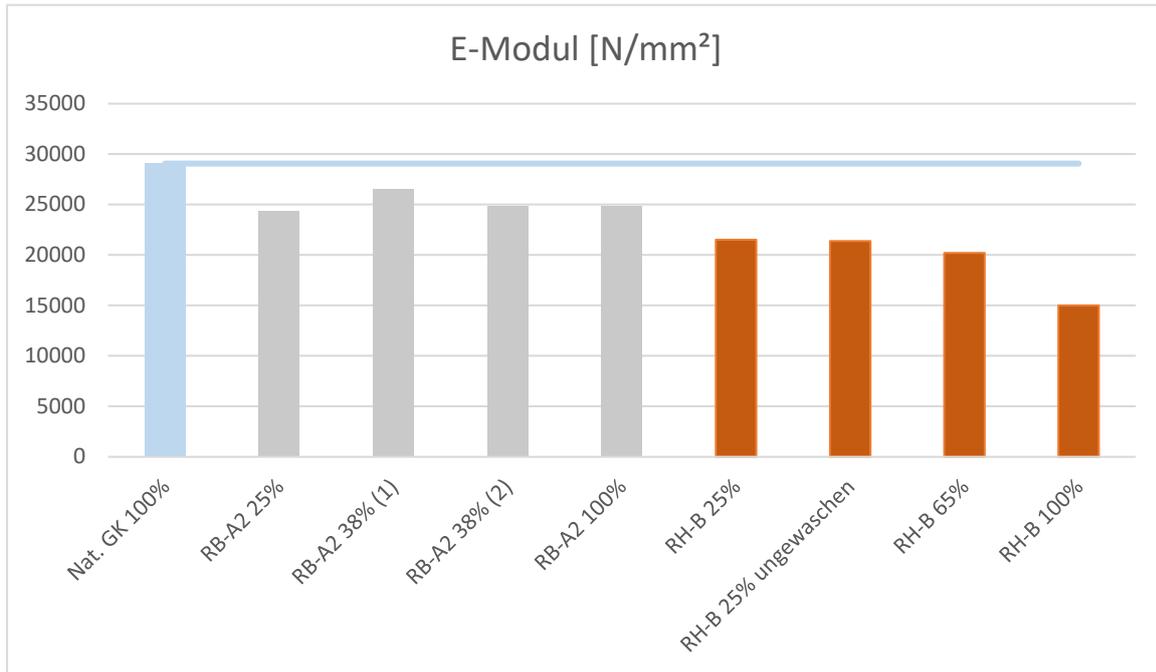


Abbildung 30: E-Modul aller Versuche 28 Tage nach der Herstellung. Die horizontale Linie stellt den Referenzwert (Primärbeton Nat. GK 100%) dar.

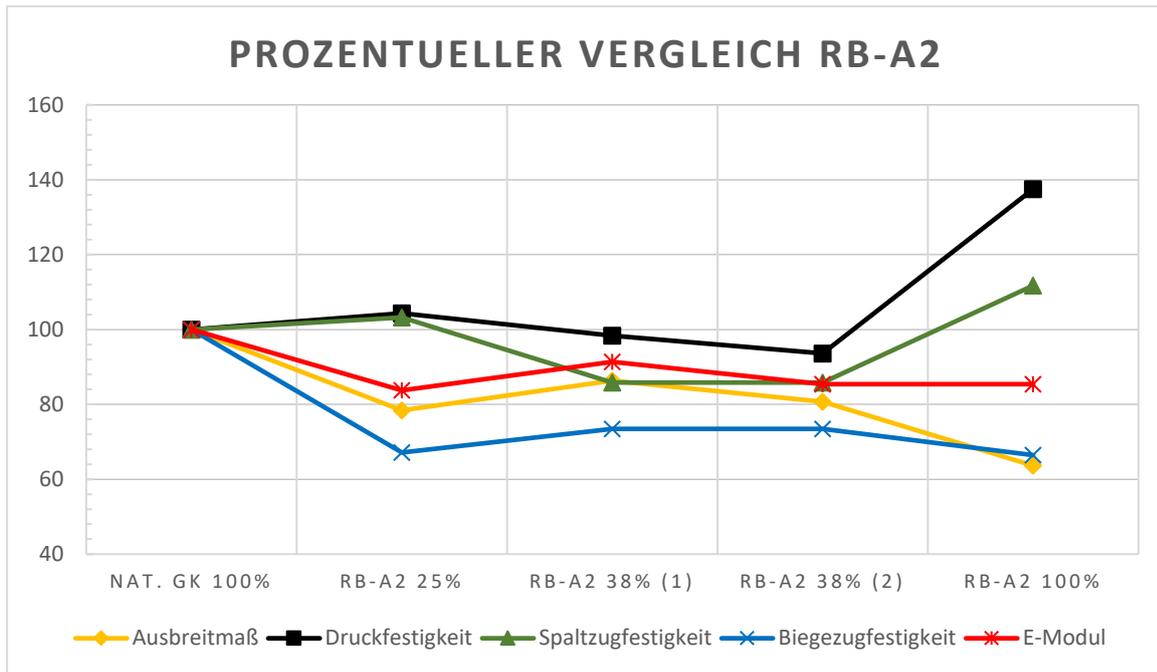


Abbildung 31: Prozentueller Vergleich der Prüfergebnisse mit RB-A2 Material im Vergleich zum Referenzbeton (Primärbeton Nat. GK 100%)

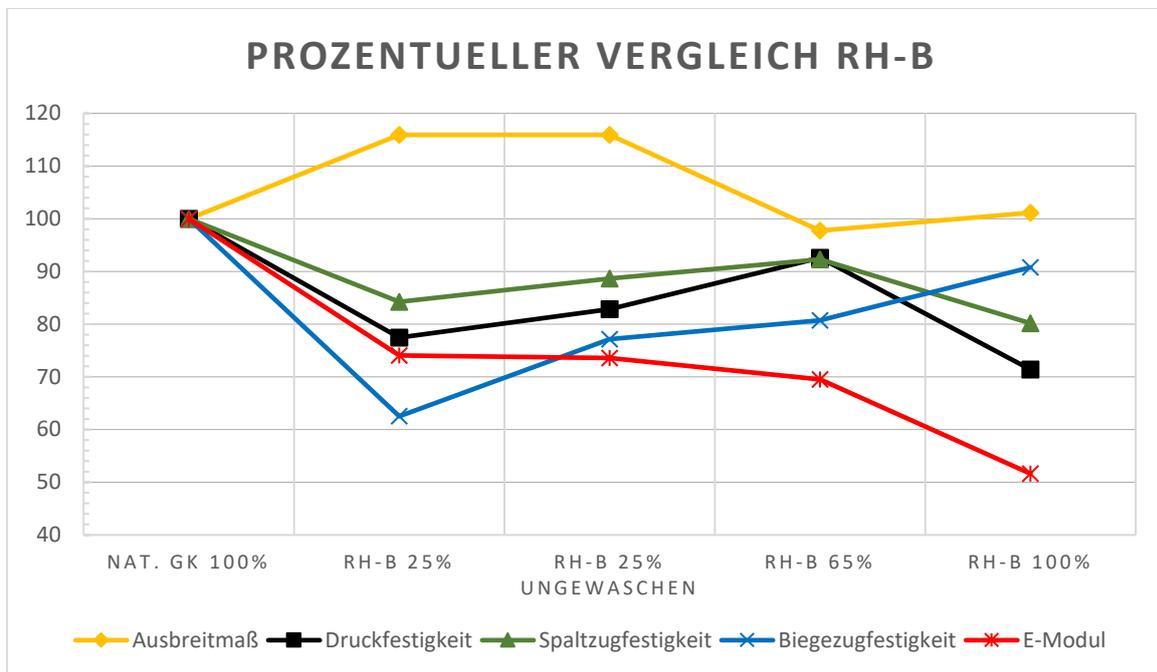


Abbildung 32: Prozentueller Vergleich der Prüfergebnisse mit RH-B Material im Vergleich zum Referenzbeton (Primärbeton Nat. GK 100%)

4.7 Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

4.7.1 Ausbreitmaß und Konsistenz

Trotz gleicher wirksamer Wassermenge W in den Mischberechnungen war die Konsistenz und die Verarbeitbarkeit des Frischbetons sehr unterschiedlich. Bei der Verwendung von RB-A2 Material war die Konsistenz viel niedriger als F45. Der Versuch mit RB-A2 38% (1) ergab ein Ausbreitmaß von 38 cm und war schwierig zu verarbeiten. Daraufhin haben wir die Kernfeuchte in der Mischberechnung RB-A2 38% (2) optimiert in der Annahme, damit bessere Ergebnisse zu erhalten. Das hat sich nicht bestätigt. Das Ausbreitmaß betrug nur 35 cm.

Der Frischbeton RB-A2 100% war trotz der Zugabe von 2% Fließmittel nahezu verarbeitbar, wie in den Bildern im Anhang zu erkennen ist. Die Konsistenz war im steifen Bereich (C0-C2) und war mit dem Ausbreitmaß nicht zu ermitteln.

Mit dem RH-B Material gab es keine Schwierigkeiten bei der Verarbeitung. Die Konsistenzen lagen alle im angestrebten Bereich (F45) und teilweise sogar höher, wobei nur beim Versuch RH-B 100% 1% Fließmittel und korrigierend ca. 10 g Stellmittel verwendet wurden.

Für diese nach der Art des Recyclingmaterials unterschiedlichen Ergebnisse vermuten wir zwei Gründe:

- Da das RB-A2 Material als gesamtes Korngemisch im Trockenaufbereitungsverfahren aufbereitet ist, enthält es viele Feinanteile kleiner 2.0 mm, insbesondere kleiner 0.063mm (siehe Tabelle 24). In unseren Mischberechnungen haben wir für die Kernfeuchte des gesamten Materials das Mittel aus den Korngruppen 2/4 und 4/16 entsprechend dem Prüfprotokoll entnommen. Vermutlich ist die Kernfeuchte für die Korngruppe 0/2 aber deutlich höher als bei den größeren Korngruppen. Daraus würde folgen, dass das Zugabewasser zu gering bemessen war und aus diesem Grund die Konsistenz des Frischbetons sehr steif ausgefallen ist.
- Es könnte auch sein, dass die Werte der Kernfeuchte, die wir selbst nicht bestimmen konnten, sondern aus dem Prüfprotokoll des Recyclingmaterials entnommen haben, für RB-A2 nicht genau zu unserer rezyklierten Gesteinskörnung passten, wodurch der Kernfeuchteansatz zu gering gewesen wäre. Auf diese Weise könnte sich die niedrige Konsistenz für RB-A2 ergeben haben. Dagegen spricht allerdings, dass bei der Trocknung des Frischbetons im Versuch RB-A2 100% der gesamte Wassergehalt des Frischbetons exakt

mit der Menge in der Mischberechnung und somit dem Kernfeuchteansatz übereingestimmt hat.

Um dem Problem mit der schlechten Konsistenz entgegenzuwirken, gibt es zwei Möglichkeiten. Bei beiden Möglichkeiten gehen wir davon aus, dass die Kernfeuchtwerte aus dem Protokoll richtig sind.

- Man erhöht den Wasseranteil und somit auch den Zementanteil, damit sich der W/B-Wert nicht verändert. Hier kann aber der erhöhte Zementverbrauch weder als ökologisch noch als ökonomisch sinnvoll bezeichnet werden, denn größere Mengen von Zement sind einerseits teurer und andererseits entsteht bei der Herstellung von Zement der größte Schafstoffanteil bei der Betonherstellung.
- Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz von Fließmittel, mit dem man die Konsistenz des Betons beeinflussen kann, ohne mehr Zement oder Wasser zu verwenden.

4.7.2 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit des Referenzbetons beträgt $30,86 \text{ N/mm}^2$. Damit wird die angestrebte Druckfestigkeitsklasse C25/30 gerade erreicht (zu beachten ist hierbei der von uns relativ hoch ange-setzte W/B-Wert von 0,65). Bei den Druckfestigkeitsprüfungen ist uns aufgefallen, dass alle Betonproben mit RH-B Material deutlich schlechtere Werte aufgewiesen haben als die Proben mit RB-A2 Material. Weiters waren die Betonproben, die am schlechtesten bei der Verarbeitbarkeit und der Konsistenz abgeschnitten haben, jene, welche die besten Werte bei der Druckfestigkeits- und Spaltzugfestigkeitsprüfung erreicht haben.

Der Beton aus 100 % RB-A2 Material hat mit Abstand die besten Ergebnisse bei den genannten Festigkeitsprüfungen erzielt. Alle anderen rezyklierten Betonproben mit RB-A2 Material haben nahezu gleich gute Werte erreicht wie der Primärbeton. Wie konnten so gute Festigkeiten erreicht werden, obwohl das Verdichten und Verarbeiten des Betons sehr schwierig war?

Wir glauben, dass es am Kantkorn liegt. Die Verwendung von Kantkorn führt immer zu höheren Festigkeiten als die Verwendung von Rundkorn. Ein rundes, glattes Korn löst sich leichter aus dem Zementstein heraus. An den beiden Bildern ist zu erkennen, dass beim linken Beton (Versuch RB-A2 100%) alle Körner im Querschnitt gerissen sind. Hingegen sieht man beim rechten Bild (Referenzbeton Nat. GK 100%), dass alle Körner ganz geblieben sind und sich vom Zementstein gelöst haben.



Abbildung 33: Versuch RB-A2 100%



Abbildung 34: Versuch Nat. GK 100%

Bei allen Versuchen mit RH-B Material haben wir schlechtere Druckfestigkeiten als beim Referenzbeton (Primärbeton) festgestellt. Trotzdem konnte beim Versuch RH-B 100% immerhin noch eine Druckfestigkeit von 22 N/mm^2 festgestellt werden.

Der Grund für die niedrigeren Druckfestigkeiten - so nehmen wir an - ist der Ziegelanteil, durch dessen poröse Struktur der Beton eine geringere Festigkeit aufweist. Der gute Verbund zwischen Zementstein und Korn ist bei RH-B Material genauso gegeben wie mit RB-A2 Material (siehe die folgenden Bilder), jedoch versagt das RH-B Material schneller bei Belastung auf Druck.



Abbildung 36: Bruchbild RB-A2 25%



Abbildung 35: Bruchbild RH-B 100%

4.7.3 Spaltzugfestigkeit

Die Ergebnisse der Spaltzugfestigkeit in den Versuchen mit RB-A2 Material verhielten sich in einem ähnlichen Verhältnis zum Referenzbeton wie die Ergebnisse der Druckfestigkeit im Versuchsverhältnis zum Referenzbeton. Anders war das jedoch bei den Betonproben mit RH-B Material: Die Spaltzugfestigkeit war im Vergleich zur Druckfestigkeit deutlich höher.

Es ist schwierig, diese Werte zu interpretieren, doch im Zusammenhang mit den Ergebnissen aus der Biegezugfestigkeitsprüfung könnte man in Bezug auf unsere Versuche daraus folgenden Schluss ziehen:

- Die Gesteinskörnung RH-B mit mehr porösen Anteilen kann mehr Zugbelastung aufnehmen als die Gesteinskörnung RB-A2. Bei den Ergebnissen der Biegezugfestigkeit ist das noch deutlicher zu erkennen.

4.7.4 Biegezugfestigkeit

Bei der Biegezugfestigkeitsprüfung haben alle Betonproben niedrigere Werte erreicht als der Referenzbeton. Hier fällt im Vergleich auf, dass die Versuche mit RB-A2 Material zu schlechteren Ergebnissen geführt haben, als die Versuche mit dem RH-B Material.

Man kann in Bezug auf unsere Versuche daraus schließen, dass die porösen Anteile in der Gesteinskörnung, wie Ziegelsplitt, zwar schwachen Widerstand gegen Druckbelastungen leisten, jedoch mehr Zugkraft aufnehmen können. Je größer der Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung RH-B ist, desto höhere Biegezugfestigkeiten waren festzustellen. Bei 100% RH-B Material wurde sogar beinahe der Wert des Referenzbetons erreicht.

4.7.5 Elastizitätsmodul

Beim E-Modul hat der Recyclingbeton deutlich schlechter abgeschnitten als der Primärbeton.

Die Versuche mit den RH-B Material wiesen die niedrigsten Ergebnisse auf. Der Versuch mit 100% RH-B Material fiel auf 50% des Wertes des Referenzbetons ab, er wies aber eine fast gleichgroße Biegezugfestigkeit wie dieser auf. Der mögliche Grund für dieses Verhalten von RH-B Material könnte folgender sein: Der Ziegel ist ein sehr leichtes, poröses Material und hat einen niedrigeren E-Modul als natürliche Gesteinskörnung. Die Versuche mit den RB-A2 Material haben höhere E-Module ergeben, weil der Betonbruch im RB-A2 Material einen höheren E-Modul hat als Ziegel. Auf den Punkt gebracht: Je höher der Ziegelanteil desto niedriger ist der E-Modul.

4.7.6 Einfluss der Aufbereitung von RH-B

Um festzustellen, ob die Aufbereitungsart von RH-B Material einen Unterschied beim Recyclingbeton bewirkt, haben wir Versuche mit 25% nicht nassaufbereitetem Ziegel-Splitt-Material (Versuch RH-B 25% ungewaschen) und 25% nassaufbereitetem RH-B Material (Versuch RH-B 25%) durchgeführt.

Die Frischbetoneigenschaften haben sich nicht unterschieden, beide Mischungen waren gut zu verarbeiten und haben passende Frischbetoneigenschaften aufgewiesen.

Die Festigkeitswerte und E-Module waren ähnlich. Nur die Biegezugfestigkeit war beim ungewaschenen Material merklich niedriger (ca. 10%) als beim nassaufbereiteten Material.

Aus dem einen Versuch können wir allerdings nicht ableiten, dass auch eine Trockenaufbereitung für das RH-B Material genügen würde. Dazu wäre eine größere Versuchsreihe notwendig.

4.8 Schlussfolgerungen zu den Versuchen

Dank der Versuche sind wir zu aufschlussreichen Ergebnissen gelangt, auch wenn wir noch nicht jedes Ergebnis gänzlich erklären können. Wir konnten jedoch sowohl bei der Verarbeitung als auch bei den Festbetonprüfungen aussagekräftige Veränderungen feststellen.

Es ist zu erwähnen, dass bei der Herstellung von Recyclingbeton sehr genau auf die Kernfeuchte der Gesteinskörnung geachtet werden muss, welche die Mischberechnung und die Verarbeitbarkeit des Frischbetons stark beeinflusst. Weiters meinen wir, dass das Mischen von Recyclingbeton auf einer Baustelle nicht empfehlenswert ist, da eine falsche Vorbereitung der Gesteinskörnung zu unbrauchbaren Ergebnissen führen kann. Laut unseren Ergebnissen kann Recyclingbeton am besten in einem Transportbetonwerk oder Fertigteilwerk eingesetzt werden, da dort die rezyklierte Gesteinskörnung am besten auf den Mischprozess vorbereitet werden kann.

Weiters sind wir zu der Erkenntnis gekommen, dass die Vorgaben der ÖNORM B 4710-1 bezüglich der maximal austauschbaren Mengen an natürlicher gegen rezyklierte Gesteinskörnung überschritten werden könnten. Wenn bei einem Projekt Recyclingbeton zum Einsatz kommen soll, muss im Vorhinein überlegt werden, welchen Ansprüchen der Beton gerecht werden muss. Auf Basis dieser Erkenntnis könnte man die Austauschrate des Recyclingbeton anpassen und dadurch könnte ein breiterer Einsatz von Recyclingbeton ermöglicht werden.

RH-B

Zusammenfassend kann man sagen, dass alle Versuche, die mit dem RH-B Material durchgeführt wurden, durchaus passable Ergebnisse erreichen konnten. Auch wenn bei der Druckfestigkeit nicht überragend hohe Festigkeiten gemessen wurden, stellte sich heraus, dass der Einsatz von RH-B Material die Biegezugfähigkeit positiv beeinflusst. Für Betonwände im Innenbereichen oder in witterungsgeschützten Bereichen ist der Recyclingbeton mit RH-B Material durchaus geeignet. Jedoch muss berücksichtigt werden, dass der E-Modul bei steigendem Ziegelanteil stark abfällt.

RB-A2

Hingegen kann der Recyclingbeton mit RB-A2 durchaus für tragende Bauteile, die hauptsächlich auf Druck beansprucht werden, wie z.B. Wände, eingesetzt werden. Für Biegetragwerke ist der Einsatz auf Grund des niedrigeren E-Moduls und der Biegezugfestigkeit eingeschränkt gegenüber dem Primärbeton.

4.9 Offene Fragen

Trotz sehr genauen Nachforschungen konnten wir nicht für jedes Ergebnis die genaue Ursache herausfinden.

- Es ist unklar, wieso der Versuch mit dem ungewaschenen Beton-Ziegel-Splitt Material etwas bessere Werte erzielen konnte als der vergleichbare Versuch mit nass aufbereitetem Material. Dazu würde es weiterer Untersuchungen bedürfen.
- Der Ziegel- und Betonbruchanteil der rezyklierten Gesteinskörnung wirken sich offensichtlich stark auf die Festbetoneigenschaften des Recyclingbetons aus. Noch wenig erforscht ist, wie die Festigkeitsqualitäten der Ausgangsmaterialien Ziegel und Beton der rezyklierten Gesteinskörnung die Eigenschaften des Recyclingbetons verändern. Dazu wären systematische Laborversuche notwendig.

5 Zusammenfassung

Im ersten Teil dieser Arbeit haben wir uns ausführlich mit dem Abbruch und der Aufbereitung von mineralischem Bauschutt sowie den Anwendungsbereichen von Recyclingbaustoffen befasst. Mineralische Abbruchabfälle sind ein bedeutender Anteil der gesamten Abfallmasse in Österreich, wie wir anhand einer Massenstromanalyse darstellen konnten. Die rechtlichen Vorgaben in Österreich sind in der Recycling-Baustoffverordnung geregelt. Österreich hat einen hohen Standard und ist ein Vorreiter in Europa beim Recyclen. Nach dzt. Kenntnisstand werden zwar große Mengen an hochwertigem Recyclingmaterial (U-A Qualität) hergestellt, diese werden aber nur zu einem geringen Anteil effizient im Bauwesen eingesetzt. Recyclingmaterial wird meistens nur für untergeordnete Funktionen wie Tragschichten oder Hinterfüllungen verwendet.

Dies hat uns angespornt über höherwertige Anwendungen, im speziellen Recyclingbeton, nachzuforschen. Neben dem Studium der Literatur mit einem internationalen Vergleich zu diesem Thema wollten wir jedenfalls auch eigene Versuche im Baulabor der HTL-1 durchführen.

Zunächst betrachteten wir die internationale Situation. Der Blick war auf die Schweiz gerichtet. **Das Technische Merkblatt SIA MB 2030 unterscheidet sich in mehreren wesentlichen Punkten von der ÖNORM 4710-1.**

- Im SIA MB 2030 sind keine fixen Grenzen für die Austauschrate innerhalb einzelner Expositionsklassen festgelegt. Anstelle dessen sind Grenzwerte je nach Expositionsklasse angegeben, welche der Beton nicht oder nur mit einem Nachweis überschreiten darf.
- In der ÖNORM B 4710-1 sind hingegen unabhängig von der Expositionsklasse bereits für jede Gesteinskörnungsgruppe (RB-A2, RH-B usw.) Maximalaustauschraten angegeben.
- Gemäß SIA MB 2030 kann ein Recyclingbeton hergestellt werden, der aus 100 % Recyclingmaterial aus Betonabbruch besteht, welcher sogar die Vorgaben der Expositionsklasse XC4 erfüllt, hingegen beträgt in der ÖNORM B4710-1 der maximal austauschbare Wert nur 50 % und dies gilt auch nur für die Expositionsklasse X0. Hier existieren große Unterschiede in den Austauschmengen.

Das SIA MB 2030 lässt somit einen wesentlich größeren Anwendungsbereich und höhere Austauschraten an Recyclingmaterial als das Regelwerk in Österreich zu. So kann mehr Recyclingbeton verbaut und damit auch mehr rezyklierte Gesteinskörnung hochwertig verwendet werden.

Im zweiten Teil unserer Diplomarbeit haben wir die technischen Eigenschaften von Recyclingbeton im Labor unserer HTL untersucht und dabei bewusst die Grenzen der Norm überschritten. In insgesamt 7 unterschiedlichen Mischverhältnissen mit RH-B Material (Betonbruch mit bis zu 30% Ziegelanteil; nass oder trocken aufbereitet) und RB-A2 Material (Betonbruch ohne Ziegelanteil) haben wir viele aufschlussreiche Ergebnisse erzielt, auch wenn wir noch nicht jedes Ergebnis gänzlich erklären können. Wir konnten jedoch sowohl in der Verarbeitung als auch bei den Festbetonprüfungen aussagekräftige Veränderungen feststellen.

Die Versuche mit dem **RB-A2 Material** haben besonders gute Ergebnisse bei der Druckfestigkeits- und bei der Spaltzugfestigkeitsprüfung ergeben, waren jedoch durch die deutlich geringere Konsistenz schwierig zu verarbeiten. Der Recyclingbeton mit RB-A2 kann durchaus für tragende Bauteile, die hauptsächlich auf Druck beansprucht werden, wie z.B. Wände, eingesetzt werden. Bei auf Biegung beanspruchten Bauteilen sind jedoch geringere E-Module und die geringeren Biegezugfestigkeiten gegenüber dem Primärbeton zu beachten.

Die Betonproben mit dem **RH-B Material** konnten mit ihrer guten Verarbeitbarkeit und Biegezugfestigkeit überraschen. Auch wenn bei der Druckfestigkeit nicht überragend hohe Festigkeiten gemessen wurden, stellte sich heraus, dass der Einsatz von RH-B Material die Biegezugfähigkeit positiv beeinflusst. Für Betonwände im Innenbereich oder in witterungsgeschützten Bereichen ist der Recyclingbeton mit RH-B Material durchaus geeignet. Jedoch muss berücksichtigt werden, dass der E-Modul bei steigendem Ziegelanteil stark abfällt.

Durch die Versuche sind wir auf die **Problematik der Kernfeuchte** gestoßen, die bei jeder rezyklierten Gesteinskörnung eine wichtige Rolle spielt.

Trotz sehr genauer Nachforschungen bleiben **einige Fragen** offen:

- Es ist unklar, wieso der Versuch mit dem ungewaschenen Beton-Ziegel-Splitt Material etwas bessere Werte erzielen konnte als der vergleichbare Versuch mit nass aufbereitetem Material. Dazu würde es weiterer Untersuchungen bedürfen.
- Der Ziegel- und Betonbruchanteil der rezyklierten Gesteinskörnung wirken sich offensichtlich stark auf die Festbetoneigenschaften des Recyclingbetons aus. Noch wenig erforscht ist, wie die Festigkeitsqualitäten der Ausgangsmaterialien Ziegel und Beton der rezyklierten Gesteinskörnung die Eigenschaften des Recyclingbetons verändern. Dazu wären systematische Laborversuche notwendig.

Es gibt viele Anwendungsgebiete für Recyclingbeton. Besonders in Bereichen, wo das hohe Eigengewicht von Beton zum Problem wird, könnte man mit dem Einsatz von rezyklierten Material mit hohem Ziegelanteil das Gewicht reduzieren. Recyclingbeton mit einer hohen Austauschrate zeigte eine steife Konsistenz, welche auf der Baustelle zu Problemen führt, allerdings in der Fertigbetonherstellung, zum Beispiel durch die Zugabe von Fließmittel, besser kontrollierbar wäre.

Unsere Erkenntnis aus der Diplomarbeit:

Im Zuge der technischen Prüfung von Recyclingbeton sind wir zu der Erkenntnis gekommen, dass die Vorgaben der ÖNORM B 4710-1 bezüglich der maximal austauschbaren Mengen an natürlicher gegen rezyklierte Gesteinskörnung überschritten werden könnten. Wenn bei einem Projekt Recyclingbeton zum Einsatz kommen soll, muss im Vorhinein überlegt werden, welchen Ansprüchen der Beton gerecht werden muss. Auf Basis dieser Erkenntnis könnte man die Austauschrate des Recyclingbeton anpassen und dadurch könnte ein breiterer Einsatz von Recyclingbeton ermöglicht werden.

Der ökonomische Vorteil des Einsatzes von rezyklierter Gesteinskörnung bei der Betonherstellung ist im Gegensatz zu herkömmlicher industriell gefertigter oder natürlicher Gesteinskörnung noch nicht zu erkennen. Wenn in Zukunft die Ressourcen an natürlichen Gesteinskörnungen knapp werden, wird voraussichtlich auch der Preis von Primärbeton steigen.

Der Markt für Recyclingbeton in Österreich sollte daher mehr gefördert werden, zum Beispiel indem man den Verbrauch von Primärressourcen unattraktiver gestaltet oder ein Deponieverbot für rezyklierfähiges Material verhängt. Außerdem sollten von der öffentlichen Hand mehrere Vorzeigeobjekte in Österreich in Auftrag gegeben werden, um ein positives Image zu erzielen. Aktuell sind weder ökonomische noch gesetzliche Anreize vorhanden, die den Einsatz von Recyclingbeton beschleunigen könnten. Bei Vorliegen entsprechender Anreize wird der Recyclingbeton sicher seinen Platz in der Baubranche finden und kein Nischenprodukt mehr sein.

Unabhängig davon erfordert die Herstellung und die Anwendung von Recyclingbeton mehr Know-How als dies bei Primärbeton der Fall ist. Um eine größere Anwendbarkeit erzielen zu können braucht es daher einerseits den sicheren Umgang mit diesem Beton in der Beton- und Bauwirtschaft, andererseits ein breiteres Einsatzfeld sowie eine flächendeckende Herstellung für einen wirtschaftlich sinnvollen Einsatz auf der Baustelle.

Quellenverzeichnis

1. Thomas, Kühn: Anwendungsmöglichkeiten von Recyclingbeton im Hochbau- und Ingenieurbau, Akademiker Verlag
2. ÖNORM B4710-1, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2018
3. Hoffmann Cathleen; Laubis Sandra: Mischabbruch kann sinnvoll bei Neubauten eingesetzt werden, Zürich-Dübendorf: Umweltpraxis, 2004, Bd. 38
4. Haidinger Franz; Katzenschläger Doris: Abfallbericht 2016, Linz: Land Oberösterreich, Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft, 2017
5. Bundesgesetzblatt für die österreichische Republik: Recycling-Baustoffverordnung, Wien: Ministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2016
6. Internetseite: Baunetz_Wissen: Wohnsiedlung Kronenwiese in Zürich. Online im Internet: URL: <https://www.baunetzwissen.de/beton/objekte/wohnen-mfh/wohnsiedlung-kronenwiese-in-zuerich-5332744>, Stand 11.02.2021
7. Hoffmann Cathleen; Moser Konrad: Aktualisiertes SIA-Merkblatt „Recyclingbeton“, Zürich: 2010
8. Wikipedia: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Schweizerischer_Ingenieur-_und_Architektenverein, Stand 11.02.2021
9. Förstner, Ulrich: Umweltschutztechnik, Berlin: Springer-Verlag, 2008
10. Friedrichsen, Stefanie: Nachhaltiges Planen, Bauen und Wohnen, Berlin: Springer Vieweg, 2018
11. TU Wien: Konzept zur nachhaltigen Nutzung von Baurestmassen basierend auf der thematischen Strategie für Abfallvermeidung und Abfallrecycling der EU, Wien: TU Wien: 2011
12. Moser, Konrad: SIA-Merkblatt 2030 Recyclingbeton, Zürich: Normenkommission SIA 262 Betonbau, 2010
13. Maydl, Peter: Jubiläumskongress „30 Jahre BRV“, Wien: 2020
14. Hans, Martens, Daniel Goldmann: 2016_Book_Recyclingtechnik; 2.Auflage; 2016
15. UBA: Datenanalyse zur Behandlung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen in Österreich; 2019

16. Siegfried, Schneller: Diplomarbeit Baustoff-Recycling im Hochbau; 2013
17. ÖNORM B 3140: Rezyklierte Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Anwendungen sowie für Beton; 2020
18. GSV_Herbst_2020: Güteschutz in Österreich; 2020
19. 04-11_Broschüre_Einsatz_von_mineralischen_Recycling-Baustoffen_im_Hoch-_und_Tiefbau; November 2017
20. Sonja, Mayer: Bestandserfassung und Planung von Abbruchmaßnahmen unter besonderer Berücksichtigung von schadstoffhaltigen Baustoffen und kontaminierten Bereichen; 2005
21. Philipp, Kogler: Aufbereitung von Baurestmassen im Hochbau-Planung und Dimensionierung der Einrichtungen, 2017
22. Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich Teil II; 2016

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.: Abfälle aus Bau- und Abbruchtätigkeiten.....	2
Quelle: UBA: Datenanalyse zur Behandlung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen in Österreich; 2019; S.9	
Abbildung 2.: Anwendungshierarchie des Abfallwirtschaftsgesetz 2002.....	4
Quelle: Siegfried Schneller: Diplomarbeit Baustoff-Recycling im Hochbau; 2013; S.15	
Abbildung 3. 10 Qualitätsbaustoffe der Baurestmassenverwertung	14
Quelle: GSV_Herbst_2020: Güteschutz in Österreich; 2020; S.14	
Abbildung 4. 10 Qualitätsbaustoffe der Baurestmassenverwertung	15
Quelle: GSV_Herbst_2020: Güteschutz in Österreich;2020; S.15	
Abbildung 5.: Einsatzbereiche für Recycling-Baustoffe	17
Quelle: Siegfried Schneller: Diplomarbeit Baustoff-Recycling im Hochbau; 2013; S.76	
Abbildung 6.: Output-Massen 2017 nach Abfallarten aus Behandlungsanlagen für mineralische Bau- und Abbruchabfälle entsprechend Bundes-Abfallwirtschaftsplan (Angaben in Tonnen)....	24
Quelle: UBA: Datenanalyse zur Behandlung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen in Österreich; 2019; S. 58	
Abbildung 7: Siebanlage Wopfinger.....	29
Quelle: Werksbesichtigung von der Firma Wopfinger	
Abbildung 8: Brechanlage Hasenöhl.....	29
Quelle: Werksbesichtigung von der Firma Hasenöhl	
Abbildung 9: Stationäre Anlage Hasenöhl	31
Quelle: Abbildung von Herrn Senzenberger	
Abbildung 10: Stationäre Anlage Hasenöhl	31
Quelle: Abbildung von Herrn Senzenberger	
Abbildung 11: Ansicht des Beispielprojekts	45
Quelle: Baunetz_Wissen: Wohnsiedlung Kronenwiese in Zürich. Online im Internet: URL: https://www.baunetzwissen.de/beton/objekte/wohnen-mfh/wohnsiedlung-kronenwiese-in-zuerich-5332744 , 11.02.2021	
Abbildung 12: Sichtbetonwände aus Recyclingbeton.....	45
Quelle: Baunetz_Wissen: Wohnsiedlung Kronenwiese in Zürich. Online im Internet: URL: https://www.baunetzwissen.de/beton/objekte/wohnen-mfh/wohnsiedlung-kronenwiese-in-zuerich-5332744 , 11.02.2021	
Abbildung 13: Mögliche Einsatzgebiete von Recyclingbeton	53
Quelle: Vgl. Hoffmann Cathleen; Laubis Sandra: Mischabbruch kann sinnvoll bei Neubauten eingesetzt werden, Zürich-Dübendorf: Umweltpraxis,2004, Bd. 38, S.13	
Abbildung 14: Idealer Stoffkreislauf in einer Kreislaufwirtschaft	56
Quelle: Förstner, Ulrich: Umweltschutztechnik, Berlin: Springer-Verlag, 2008, S. 333 Förstner, Ulrich: Umweltschutztechnik, Berlin: Springer-Verlag, 2008, S. 365	

Abbildung 15: Idealer Lebenszyklus eines Gebäudes	57
Quelle: Förstner, Ulrich: Umweltschutztechnik, Berlin: Springer-Verlag, 2008, S. 333	
Förstner, Ulrich: Umweltschutztechnik, Berlin: Springer-Verlag, 2008, S. 365	
Abbildung 16: Stoffkreislauf 2000 in der Schweiz (Zahlen in Prozent)	60
Quelle: Moser, Konrad: SIA-Merkblatt 2030 Recyclingbeton, Zürich: Normenkommission SIA 262	
Betonbau, 2010, S.9	
Abbildung 17: Funktionierender Stoffkreislauf 2050 (Zahlen in Prozent)	60
Quelle: Moser, Konrad: SIA-Merkblatt 2030 Recyclingbeton, Zürich: Normenkommission SIA 262	
Betonbau, 2010, S.9	
Abbildung 18: 0/16 RH-B Material	66
Quelle: Eigenaufnahme	
Abbildung 19: 0/16 RH-B Material	66
Quelle: Eigenaufnahme	
Abbildung 20: Definition von Hohlräumen eines Kornes.....	66
Quelle: EN 1097-6:2013(D)	
Abbildung 21: 0/8 Beton-Ziegel-Splitt ungewaschen	67
Quelle: Eigenaufnahme	
Abbildung 22: 0/4 Beton-Ziegel-Splitt ungewaschen	67
Quelle: Eigenaufnahme	
Abbildung 23: 0/16 RB-A2 Material	69
Quelle: Eigenaufnahme	
Abbildung 24: 0/16 RB-A2 Material	69
Quelle: Eigenaufnahme	
Abbildung 25: Wassergehaltsdiagramm	70
Quelle: Schullabor HTL1	
Abbildung 26: Ausbreitmaß aller Versuche. Der Bereich zwischen den horizontalen Linien beschreibt den Konsistenzbereich von F45. Bei RB-A2 100% wurden 2% Fließmittel und bei RH-B 100% wurde 1% Fließmittel dosiert.....	74
Quelle: Versuchsergebnisse	
Abbildung 27: Druckfestigkeit aller Versuche zwischen 27 und 30 Tagen nach Herstellung	74
Quelle: Versuchsergebnisse	
Abbildung 28: Spaltzugfestigkeiten aller Versuche zwischen 27 und 30 Tagen nach der Herstellung. Die horizontale Linie stellt den Referenzwert (Primärbeton Nat. GK 100%) dar.....	75
Quelle: Versuchsergebnisse	
Abbildung 29: Biegezugfestigkeiten aller Versuche zwischen 27 und 30 Tagen nach der Herstellung der Versuch. RB-A2 25% wurde erst nach 54 Tagen geprüft; die horizontale Linie stellt den Referenzwert (Primärbeton Nat. GK 100%) dar.....	75
Quelle: Versuchsergebnisse	

Abbildung 30: E-Modul aller Versuche 28 Tage nach der Herstellung. Die horizontale Linie stellt den Referenzwert (Primärbeton Nat. GK 100%) dar.....	76
Quelle: Versuchsergebnisse	
Abbildung 31: Prozentueller Vergleich der Prüfergebnisse mit RB-A2 Material im Vergleich zum Referenzbeton (Primärbeton Nat. GK 100%)	77
Quelle: Versuchsergebnisse	
Abbildung 32: Prozentueller Vergleich der Prüfergebnisse mit RH-B Material im Vergleich zum Referenzbeton (Primärbeton Nat. GK 100%)	77
Quelle: Versuchsergebnisse	
Abbildung 33: Versuch RB-A2 100%.....	80
Quelle: Eigenaufnahme	
Abbildung 34: Versuch Nat. GK 100%	80
Quelle: Eigenaufnahme	
Abbildung 35: Bruchbild RB-A2 25%	80
Quelle: Eigenaufnahme	
Abbildung 36: Bruchbild RH-B 100%	80
Quelle: Eigenaufnahme	

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Parameter und Grenzwerte für Gesteinskörnungen für den ungebundenen sowie für den hydraulischen oder bituminösen gebundenen Einsatz.....	7
Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich Teil II; 2016; S.5,6	
Tabelle 2. Parameter und Grenzwerte für Gesteinskörnungen, die ausschließlich zur Herstellung von Beton ab der Festigkeitsklasse C 12/15 oder für die Herstellung von Beton der Festigkeitsklasse C 8/10 ab der Expositionsklasse XC1 gemäß ÖNORM B 4710-1 verwendet werden.	7
Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich Teil II; 2016; S.7	
Tabelle 3. Tabellarische Zuordnung der Qualitätsklassen zu den Einsatzbereichen und Verwendungsverboten.....	8
Baustoff-Recycling-Verband; Richtlinie Recyclingbaustoffe; 2017; S.13	
Tabelle 4.: Mindestanforderungen an rezyklierte Gesteinskörnung.....	10
ÖNORM B 3140: Rezyklierte Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Anwendungen sowie für Beton; 2020; S.9	
Tabelle 5.: Mindestanforderungen an rezyklierte Gesteinskörnungen (fortgesetzt)	10
ÖNORM B 3140: Rezyklierte Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Anwendungen sowie für Beton; 2020; S.8	
Tabelle 6.: Kategorien für die Bestandteile von rezyklierten Gesteinskörnungen.....	11
ÖNORM B 3140: Rezyklierte Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Anwendungen sowie für Beton; 2020; S.10	
Tabelle 7.: Zusammenfassung der Detailauswertungen von 20 Anlagen ausgewählter Betreiber [Angaben in %]	24
UBA: Datenanalyse zur Behandlung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen in Österreich; 2019; S.51	
Tabelle 8: Prozentuelle Zusammenstellung der an die analysierten Anlagen übergebenen Bau- und Abbruchabfälle.....	25
UBA: Datenanalyse zur Behandlung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen in Österreich; 2019; S.52	
Tabelle 9: Verwertung und Deponierung der Output-Materialien aus den analysierten Anlagen zur Behandlung von Bau- und Abbruchabfällen.	25
UBA: Datenanalyse zur Behandlung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen in Österreich; 2019; S.52	
Tabelle 10: Input-Output Baurestmassenaufbereitung OÖ.....	27
Abbildung von Herrn Grestenberger	
Tabelle 11: Vor und Nachteile von mobilen Aufbereitungsanlagen	30
Philipp, Kogler: Aufbereitung von Baurestmassen im Hochbau-Planung und Dimensionierung der Einrichtungen; 2017; S.28	

Tabelle 12: Vor und Nachteile von stationären Aufbereitungsanlagen.....	31
Philipp, Kogler: Aufbereitung von Baurestmassen im Hochbau-Planung und Dimensionierung der Einrichtungen; 2017; S.30	
Tabelle 13: Brecherarten.....	32
Philipp, Kogler: Aufbereitung von Baurestmassen im Hochbau-Planung und Dimensionierung der Einrichtungen; 2017; S.31	
Tabelle 14: Zulässige Korngruppen für die Verwendung von Korngemische	40
Quelle: ÖNORM B4710-1, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2018, S.41	
Tabelle 15: Grenzwerte für den Austausch von natürlicher durch rezyklierte Gesteinskörnung in Abhängigkeit der Expositions-klassen bezogen auf die relativ prozentuellen Masseanteile.....	41
Quelle: ÖNORM B4710-1, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2018, S.151	
Tabelle 16: Grenzwerte für den Austausch von natürlicher durch rezyklierte Gesteinskörnung in Abhängigkeit der Betonkurz-bezeichnungen bezogen auf die relativ prozentuellen Massenanteile	41
Quelle: ÖNORM B4710-1, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2018, S.152	
Tabelle 17: Schadstoffwerte bei der Betonherstellung	43
Quelle: Thomas, Kühn: Anwendungsmöglichkeiten von Recyclingbeton im Hochbau- und Ingenieurbau, Akademiker Verlag, S.168	
Tabelle 18: Qualitätsanforderungen an die rezyklierte Gesteinskörnung nach der SN EN 206-146	
Quelle: Hoffmann Cathleen: Aktualisiertes SIA-Merkblatt „Recyclingbeton“, Zürich: 2010,S.47	
Tabelle 19: Empfohlene Austauschraten bezüglich der Expositions-klassen	48
Quelle: Hoffmann Cathleen; Moser Konrad: Aktualisiertes SIA-Merkblatt „Recyclingbeton“, Zürich: 2010, S.49	
Tabelle 20: Berechnung der veränderten Festbetoneigenschaften bei Recyclingbeton.....	48
Quelle: Vgl. Hoffmann Cathleen; Moser Konrad: Aktualisiertes SIA-Merkblatt „Recyclingbeton“, Zürich: 2010, S.49	
Tabelle 21: Kernfeuchte aus dem Prüfprotokoll der Firma Wopfinger Transportbeton.....	65
Quelle: Protokoll Wopfinger	
Tabelle 22: Sieblinie zum RH-B Material aus dem Prüfprotokoll der Firma Wopfinger	65
Quelle: Protokoll Wopfinger	
Tabelle 23: Kernfeuchte aus dem Prüfprotokoll der Firma Wopfinger Transportbeton.....	68
Quelle: Protokoll Wopfinger	
Tabelle 24: Sieblinie zum RH-B Material aus dem Prüfprotokoll der Firma Wopfinger Transportbeton	68
Quelle: Protokoll Wopfinger	

Mischberechnung Nat. GK 100%

Betonsorte	C 25/30 / XC2 / F45 / GK16		
Zementsorte	CEM II / B - M (S - L) 42,5 N	Zusatzmittel	
Gesteinskörnung	0/4, 4/8, 8/16		
W/B - Wert	0,65	W =	200 kg/m ³
Luft	1,5%	erf. B =	310 kg/m ³ min B = 260 kg/m ³

Stoffbedarf		Masse [kg]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l] = [dm ³]
wirksames Wasser	W	200	: 1,0 →	200
Bindemittel	B	310	: 3,1 →	100
Luftgehalt	L	-	-	15
Gesteinskörnung	K	1850 ←	2,7 ✕	685
Frischbetonrohddichte		2360 kg/m ³		1000

Einwaagen für				1000 l = 1 m ³			55 l	
Körnung	Anteil [%]	Stoffraum [l]	Rohdichte [kg/dm ³]	m _t [kg]	w		m _f [kg]	m _f [kg]
					[%]	[l] = [kg]		
0/4	48	329	2,7	888	0		888	48,84
4/8	22	151	2,7	407	0		407	22,39
8/16	30	206	2,7	555	0		555	30,53
				Σ 1850	0	W _{GK} = 0	Σ 1850	Σ 101,76
Bindemittel							310 kg	17,05 kg
Zugabewasser		W _{zug} = W - W _{GK}					200 kg	11,00 kg
		Gesamteinwaage					2360 kg	129,81 kg

Frischbetonprüfungsprotokoll Nat. GK 100%

Eingewogene Bestandteile je Mische:

<u>Anmerkung:</u> *Dieser Wert ist durch ein Problem mit der Mikrowelle verfälscht.	Z'	17,05 kg
	ZU'	0 kg
	K'	101,76 kg
	ZM'	0 kg
	W'	11,00 kg
Eingewogene Gesamtmenge	M _B '	129,81 kg

Rohdichte des verdichteten Betons: (LP-Prüftopf)

Masse der verdichteten Betonprobe + Form		23,694 kg
Masse der leeren Form		4,530 kg
Masse des Betons	m _B	19,164 kg
Frischbetonrohichte	ρ _{Fb}	2395 kg/m ³

Konsistenz:

a = 44 cm	Zeit 10 min	a = cm	Zeit min
-----------	-------------	--------------	----------------

Luftgehalt:

LP 0,7 %	Zeit 15 min	LP %	Zeit min
----------	-------------	------------	----------------

Temperatur:

Luft	21,7 °C	Beton	20,4 °C
------	---------	-------	---------

Wassergehalt des Betons:

Masse der Probe vor dem Trocknen	m _f	2,008 kg
Masse der Probe nach dem Trocknen	m _t *	1,858 kg
Absoluter Wassergehalt der Probe [m _f - m _t]	Δm*	0,150 kg
Wassergehalt $\frac{\Delta m}{m_f} * \rho_{Fb} =$	W*	179 kg/m ³

AUSWERTUNG:

Zement [je m ³ Beton]	$\frac{\rho_{Fb} * Z'}{M_B'}$	Z	314,6 kg/m ³
Zusatzstoff [je m ³ Beton]	$\frac{\rho_{Fb} * ZU'}{M_B'}$	ZU	0 kg/m ³
anrechenbarer Bindemittelgehalt	B = Z + k * ZU =	B	314,6 kg/m ³
W/B – Wert	W/B = 0,57*		

Festbetonprüfungen Nat. GK 100%

Druckfestigkeit f_c nach 28 Tagen

$$f_c = \frac{F_{\text{Bruch}}}{a_1 * a_2}$$

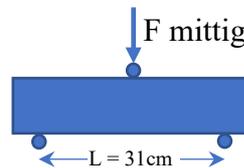
Bezeichnung	Abmessungen [cm]			Masse m [kg]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Bruchlast F_{Bruch} [kN]	Druckfestigkeit f_c [N/mm ²]
	a ₁	a ₂	h				
W1	15	15	15	7,896	2340	682	30,31
W2	15	15	15	7,842	2324	701	31,16
W3	15	15	15	7,854	2327	700	31,11
Mittelwert					2330	694	30,86

Spaltzugfestigkeit $f_{ct,sp}$ nach 28 Tagen

$$f_{ct,sp} = \frac{2 * F_{\text{Bruch}}}{h * l * \pi}$$

Bezeichnung	Abmessungen [cm]			Masse m [kg]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Bruchlast F_{Bruch} [kN]	Spaltzugfestigkeit $f_{ct,sp}$ [N/mm ²]
	b	h	l				
W4	15	15	15	7,872	2332	76	2,15
W5	15	15	15	7,920	2347	91	2,57
W6	15	15	15	7,918	2346	95	2,69
Mittelwert					2342	87	2,47

Biegezugfestigkeit $f_{ct,f}$ nach 32 Tagen



$$f_{ct,f} = \frac{6}{4} * \frac{F_{\text{Bruch}} * L}{b * h^2}$$

Bezeichnung	Abmessungen [cm]			Masse m [kg]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Bruchlast F_{Bruch} [kN]	Biegezugfestigkeit $f_{ct,f}$ [N/mm ²]
	b	h	l				
P1	12	12	36	12,338	2380	21,6	5,81
P2	12	12	36	12,375	2387	22,0	5,92
Mittelwert					2385	21,8	5,87

E-Modul $E_{C,0}$ nach 28 Tagen

P1	$E_{C,0} = 28\ 520\ \text{N/mm}^2$
P2	$E_{C,0} = 29\ 612\ \text{N/mm}^2$
P3	$E_{C,0} = 29\ 062\ \text{N/mm}^2$
Mittelwert $E_{C,0} = 29\ 065\ \text{N/mm}^2$	

Diese Prüfung zur E-Modul Ermittlung wurde in der Prüfanstalt BPS in Leonding durchgeführt.

Die Ergebnisse wurden in diese Aufstellung übernommen.

Nach der E-Modul Ermittlung wurde von den Prismen P1 und P2 im Labor der HTL die Biegezugfestigkeit bestimmt.

Dokumentationsfotos Nat. GK 100%



Bruchbild nach der Spaltzugfestigkeitsprüfung

Mischberechnung RB-A2 25%

Betonsorte	C 25/30 / XC2 / F45 / GK16- RB-A2 0/16 U-A		
Zementsorte	CEM II / B - M (S - L) 42,5 N	Zusatzmittel	
Gesteinskörnung	0/4, 4/8, 8/16 RB-A2 0/16	Kernfeuchte * [Masse-%]	4,75%-0,5%
W/B - Wert	0,65	$W_{ges} =$	200 kg/m ³
Luft	1,5%	erf. B =	310 kg/m ³ min B = 260 kg/m ³

Stoffbedarf		Masse [kg]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l] = [dm ³]
wirksames Wasser	W	200	: 1,0 →	200
Bindemittel	B	310	: 3,1 →	100
Luftgehalt	L	-	-	15
Gesteinskörnung	K	1796 ←	2,2612**	685
Wasser- Kernfeuchte	W _K	17,36		-
Frischbetonrohddichte		2323 kg/m ³		1000

Einwaagen für				1000 l = 1 m ³			55 l	
Körnung	Anteil [%]	Stoffraum [l]	Rohdichte [kg/dm ³]	m _t [kg]	w		m _f [kg]	m _f [kg]
					[%]	[l] = [kg]		
0/4	36	247	2,7	666	0		666	36,63
4/8	16,5	113	2,7	305	0		305	16,79
8/16	22,5	154	2,7	416	0		416	22,89
RB-A2 0/16	25	171	2,385***	409	10,7	W _{GK} =44	452	24,90
					W _K	17,36 kg		
				Σ 1768		W _{GK} -W _K = 23,08	Σ 1836	Σ 101,20
Bindemittel							310 kg	17,05 kg
Zugabewasser	$W_{zug} = W - (W_{GK} - W_K)$						174 kg	9,55 kg
Gesamteinwaage							2323 kg	127,80 kg

*) Kernfeuchte in M.-% gemäß Produktangabe, nach 30 Minuten Wasserlagerung, minus 0,5%

**) Rohdichte der (gesamten) Gesteinskörnung, gemittelt über die Korngruppen

***) Rohdichte der rezyklierten Gesteinskörnung gemäß Produktangabe „Rohdichte auf ofentrockener Basis“

Frischbetonprüfungsprotokoll RB-A 25%

Eingewogene Bestandteile je Mische:

<u>Anmerkung:</u> Die Körnung K wird feucht eingewogen Die Konsistenz ist eher schlecht; der Beton kann jedoch ohne Probleme verarbeitet werden	Z'	17,05 kg
	ZU'	0 kg
	K'	101,20 kg
	ZM'	0 kg
	W _{zug} '	9,55 kg
Eingewogene Gesamtmenge	M _B '	127,80 kg

Rohdichte des verdichteten Betons: (LP-Prüftopf)

Masse der verdichteten Betonprobe + Form		23,270 kg
Masse der leeren Form		4,534 kg
Masse des Betons	m _B	18,736 kg
Frischbetonrohddichte	ρ _{Fb}	2342 kg/m ³

Konsistenz:

a = 34-35 cm	Zeit 10 min	a = cm	Zeit min
--------------	-------------	--------------	----------------

Luftgehalt:

LP 1,2 %	Zeit 15 min	LP %	Zeit min
----------	-------------	------------	----------------

Temperatur:

Luft	21,4 °C	Beton	17,5 °C
------	---------	-------	---------

Wassergehalt des Betons:

Masse der Probe vor dem Trocknen	m _f	2,00 kg
Masse der Probe nach dem Trocknen	m _t	1,824 kg
Absoluter Wassergehalt der Probe [m _f - m _t]	Δm	0,176 kg
Wassergehalt $\frac{\Delta m}{m_f} * \rho_{Fb} =$	W _{ges}	206,10 kg/m ³

AUSWERTUNG:

Zement [je m ³ Beton]	$\frac{\rho_{Fb} * Z'}{M_B'}$	Z	312,45 kg/m ³
Anrechenbarer Bindemittelgehalt	$\frac{\rho_{Fb} * ZU'}{M_B'}$	B	312,45 kg/m ³
Wasser- Kernfeuchte	W _k aus der Mischberechnung	W _K	17,36 kg/m ³
Wirksames Wasser	W = W _{ges} - W _K	W	188,74 kg/m ³
W/B – Wert	W/B = 0,60		

Festbetonprüfungen RB-A2 25%

Druckfestigkeit f_c nach 31 Tagen

$$f_c = \frac{F_{\text{Bruch}}}{a_1 * a_2}$$

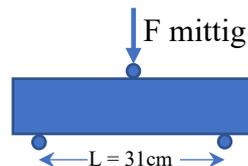
Bezeichnung	Abmessungen [cm]			Masse m [kg]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Bruchlast F_{Bruch} [kN]	Druckfestigkeit f_c [N/mm ²]
	a ₁	a ₂	h				
W1	15	15	15	7,604	2253	730	32,44
W2	15	15	15	7,642	2264	719	31,69
Mittelwert					2258	725	32,20

Spaltzugfestigkeit $f_{ct,sp}$ nach 31 Tagen

$$f_{ct,sp} = \frac{2 * F_{\text{Bruch}}}{h * l * \pi}$$

Bezeichnung	Abmessungen [cm]			Masse m [kg]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Bruchlast F_{Bruch} [kN]	Spaltzugfestigkeit $f_{ct,sp}$ [N/mm ²]
	b	h	l				
W3	15	15	15	7,616	2257	93	2,63
W4	15	15	15	7,718	2287	87	2,46
Mittelwert					2272	90	2,55

Biegezugfestigkeit $f_{ct,f}$ nach 54 Tagen



$$f_{ct,f} = \frac{6}{4} * \frac{F_{\text{Bruch}} * L}{b * h^2}$$

Bezeichnung	Abmessungen [cm]			Masse m [kg]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Bruchlast F_{Bruch} [kN]	Biegezugfestigkeit $f_{ct,f}$ [N/mm ²]
	b	h	l				
P1	12	12	36	11,87	2289	13,8	3,71
P2	12	12	36	11,73	2263	15,5	4,17
Mittelwert					2276	14,65	3,94

E-Modul $E_{C,0}$ nach 31 Tagen

P1 $E_{C,0} = 25\ 287\ \text{N/mm}^2$

P2 $E_{C,0} = 23\ 389\ \text{N/mm}^2$

Mittelwert $E_{C,0} = 24\ 338\ \text{N/mm}^2$

Diese Prüfung zur E-Modul Ermittlung wurde in der Prüfanstalt BPS in Leonding durchgeführt.

Die Ergebnisse wurden in diese Aufstellung übernommen.

Nach der E-Modul Ermittlung wurde von den Prismen P1 und P2 im Labor der HTL die Biegezugfestigkeit bestimmt.

Dokumentationsfotos RB-A2 25%



Kegelstumpf



Ausbreitmaß



Bruchbild nach der
Druckfestigkeitsprüfung



Bruchbild nach der
Biegezugfestigkeitsprüfung



Bruchbild nach der
Druckfestigkeitsprüfung

Mischberechnung RB-A2 38% (1)

Betonsorte	C 25/30 / XC2 / F45 / GK16- RB-A2 0/16 U-A		
Zementsorte	CEM II / B - M (S - L) 42,5 N	Zusatzmittel	
Gesteinskörnung	0/4, 4/8, 8/16 RB-A2 0/16	Kernfeuchte * [Masse-%]	4,75%-0,5%
W/B - Wert	0,65	$W_{ges} =$	200 kg/m ³
Luft	1,5%	erf. B =	310 kg/m ³ min B = 260 kg/m ³

Stoffbedarf		Masse [kg]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l] = [dm ³]
wirksames Wasser	W	200	: 1,0 →	200
Bindemittel	B	310	: 3,1 →	100
Luftgehalt	L	-	-	15
Gesteinskörnung	K	1805 ←	2,635**	685
Wasser- Kernfeuchte	W _K	27,99		-
Frischbetonrohddichte		2343 kg/m³		1000

Einwaagen für				1000 l = 1 m ³			55 l	
Körnung	Anteil [%]	Stoffraum [l]	Rohdichte [kg/dm ³]	m _t [kg]	w		m _f [kg]	m _f [kg]
					[%]	[l] = [kg]		
0/4	29,8	204	2,7	551	0		551	30,25
4/8	13,6	93	2,7	252	0		252	13,86
8/16	18,6	127	2,7	344	0		344	18,92
RB-A2 0/16	38	260	2,53***	659	9,9	W _{GK} =65	682	39,81
					W _K	27,99		
				Σ 1805	0	W _{GK} -W _K = 37,22	Σ 1871	Σ102,89
Bindemittel							310 kg	17,05 kg
Zugabewasser		$W_{zug} = W - (W_{GK} - W_K)$					163 kg	9,95 kg
		Gesamteinwaage					2343 kg	128,88 kg

*) Kernfeuchte in M.-% gemäß Produktangabe, nach 30 Minuten Wasserlagerung, minus 0,5%

**) Rohdichte der (gesamten) Gesteinskörnung, gemittelt über die Korngruppen

***) Rohdichte der rezyklierten Gesteinskörnung gemäß Produktangabe „Rohdichte auf wassergesättigter und oberflächentrockener Basis“

Frischbetonprüfungsprotokoll RB-A2 38% (1)

Eingewogene Bestandteile je Mische:

<u>Anmerkung:</u> Die Körnung K wird feucht eingewogen Die Konsistenz ist sehr niedrig und der Beton kann nur schwer verarbeitet werden	Z'	17,05 kg
	ZU'	0 kg
	K'	102,89 kg
	ZM'	0 kg
	W _{zug} '	9,95 kg
Eingewogene Gesamtmenge	M _B '	128,88 kg

Rohdichte des verdichteten Betons: (LP-Prüftopf)

Masse der verdichteten Betonprobe + Form		23,244 kg
Masse der leeren Form		4,530 kg
Masse des Betons	m _B	18,71 kg
Frischbetonrohddichte	ρ _{Fb}	2339 kg/m ³

Konsistenz:

a = 38 cm	Zeit 10 min	a = cm	Zeit min
-----------	-------------	--------------	----------------

Luftgehalt:

LP 3 %	Zeit 15 min	LP %	Zeit min
--------	-------------	------------	----------------

Temperatur:

Luft	21,6 °C	Beton	22 °C
------	---------	-------	-------

Wassergehalt des Betons:

Masse der Probe vor dem Trocknen	m _f	2,00 kg
Masse der Probe nach dem Trocknen	m _t	1,822 kg
Absoluter Wassergehalt der Probe [m _f - m _t]	Δm	0,178 kg
Wassergehalt $\frac{\Delta m}{m_f} * \rho_{Fb} =$	W _{ges}	208,19 kg/m ³

AUSWERTUNG:

Zement [je m ³ Beton]	$\frac{\rho_{Fb} * Z'}{M_B'}$	Z	309,47 kg/m ³
Anrechenbarer Bindemittelgehalt	$\frac{\rho_{Fb} * ZU'}{M_B'}$	B	309,47 kg/m ³
Wasser-Kernfeuchte	W _k aus der Mischberechnung	W _K	27,99 kg/m ³
Wirksames Wasser	W = W _{ges} - W _K	W	180,23 kg/m ³
W/B – Wert	W/B = 0,58		

Festbetonprüfungen RB-A2 38% (1)**Druckfestigkeit f_c nach 28 Tagen**

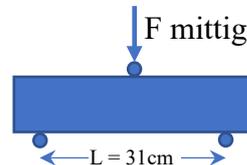
$$f_c = \frac{F_{\text{Bruch}}}{a_1 * a_2}$$

Bezeichnung	Abmessungen [cm]			Masse m [kg]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Bruchlast F_{Bruch} [kN]	Druckfestigkeit f_c [N/mm ²]
	a ₁	a ₂	h				
W1	15	15	15	7,694	2280	652	28,98
W2	15	15	15	7,608	2254	722	32,09
W3	15	15	15	7,688	2287	675	30,00
Mittelwert					2270	683	30,36

Spaltzugfestigkeit $f_{ct,sp}$ nach 28 Tagen

$$f_{ct,sp} = \frac{2 * F_{\text{Bruch}}}{h * l * \pi}$$

Bezeichnung	Abmessungen [cm]			Masse m [kg]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Bruchlast F_{Bruch} [kN]	Spaltzugfestigkeit $f_{ct,sp}$ [N/mm ²]
	b	h	l				
W4	15	15	15	7,737	2293	80	2,26
W5	15	15	15	7,676	2274	76	2,15
W6	15	15	15	7,668	2272	69	1,95
Mittelwert					2268	75	2,12

Biegezugfestigkeit $f_{ct,f}$ nach 30 Tagen

$$f_{ct,f} = \frac{6}{4} * \frac{F_{\text{Bruch}} * L}{b * h^2}$$

Bezeichnung	Abmessungen [cm]			Masse m [kg]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Bruchlast F_{Bruch} [kN]	Biegezugfestigkeit $f_{ct,f}$ [N/mm ²]
	b	h	l				
P1	12	12	36	11,96	2307	15,4	4,14
P2	12	12	36	12,12	2337	15,6	4,19
Mittelwert					2322	15,5	4,17

E-Modul $E_{C,0}$ nach 28 TagenP1 $E_{C,0} = 25\ 634\ \text{N/mm}^2$ P2 $E_{C,0} = 27\ 778\ \text{N/mm}^2$ P3 $E_{C,0} = 26\ 226\ \text{N/mm}^2$ **Mittelwert $E_{C,0} = 26\ 547\ \text{N/mm}^2$**

Diese Prüfung zur E-Modul Ermittlung wurde in der Prüfanstalt BPS in Leonding durchgeführt.

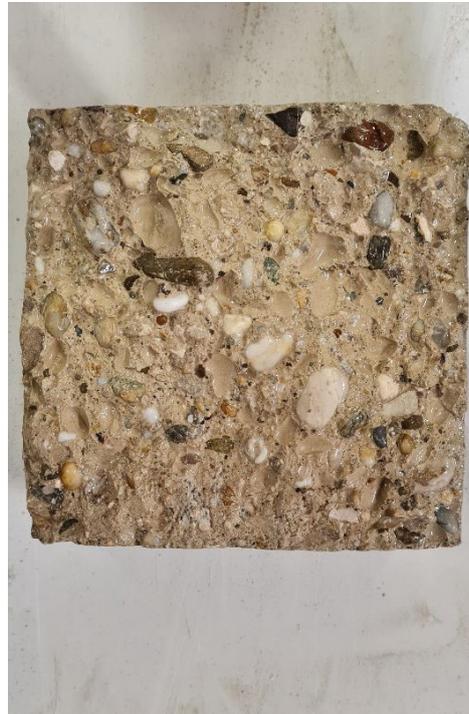
Die Ergebnisse wurden in diese Aufstellung übernommen.

Nach der E-Modul Ermittlung wurde von den Prismen P1 und P2 im Labor der HTL die Biegezugfestigkeit bestimmt.

Dokumentationsfotos RB-A2 38% (1)



Bruchbild nach der
Druckfestigkeitsprüfung



Bruchbild nach der
Spaltzugfestigkeitsprüfung



Bruchbild nach der
Spaltzugfestigkeitsprüfung

Mischberechnung RB-A2 38% (2)

Betonsorte	C 25/30 / XC2 / F45 / GK16- RB-A2 0/16 U-A		
Zementsorte	CEM II / B - M (S - L) 42,5 N	Zusatzmittel	
Gesteinskörnung	0/4, 4/8, 8/16 RB-A2 0/16	Kernfeuchte * [Masse-%]	4,75%-0,5%
W/B - Wert	0,65	$W_{ges} =$	200 kg/m ³
Luft	1,5%	erf. B =	310 kg/m ³ min B = 260 kg/m ³

Stoffbedarf		Masse [kg]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l] = [dm ³]
wirksames Wasser	W	200	: 1,0 →	200
Bindemittel	B	310	: 3,1 →	100
Luftgehalt	L	-	-	15
Gesteinskörnung	K	1768 ←	2,5803**	685
Wasser- Kernfeuchte	W _K	26,39		-
Frischbetonrohddichte		2304 kg/m ³		1000

Einwaagen für				1000 l = 1 m ³			55 l	
Körnung	Anteil [%]	Stoffraum [l]	Rohdichte [kg/dm ³]	m _t [kg]	w		m _f [kg]	m _f [kg]
					[%]	[l] = [kg]		
0/4	29,8	204	2,7	550	0		550	30,25
4/8	13,6	93	2,7	252	0		252	13,86
8/16	18,6	127	2,7	344	0		344	18,92
RB-A2 0/16	38	260	2,385***	621	9,9	W _{GK} =61,48	682	37,51
					W _K	26,39		
				Σ 1768	0	W _{GK} -W _K = 35,09	Σ 1829	Σ100,50
Bindemittel							310 kg	17,05 kg
Zugabewasser		$W_{zug} = W - (W_{GK} - W_K)$					165 kg	9,08 kg
		Gesamteinwaage					2304 kg	126,63 kg

*) Kernfeuchte in M.-% gemäß Produktangabe, nach 30 Minuten Wasserlagerung, minus 0,5%

**) Rohdichte der (gesamten) Gesteinskörnung, gemittelt über die Korngruppen

***) Rohdichte der rezyklierten Gesteinskörnung gemäß Produktangabe „Rohdichte auf ofentrockener Basis“

Frischbetonprüfungsprotokoll RB-A2 38% (2)

Eingewogene Bestandteile je Mische:

<u>Anmerkung:</u> Die Körnung K wird feucht eingewogen Die Konsistenz ist sehr niedrig und der Beton kann nur schwer verarbeitet werden	Z'	17,05 kg
	ZU'	0 kg
	K'	100,53 kg
	ZM'	0 kg
	W _{zug} '	9,08 kg
Eingewogene Gesamtmenge	M _B '	126,63 kg

Rohdichte des verdichteten Betons: (LP-Prüftopf)

Masse der verdichteten Betonprobe + Form		23,144 kg
Masse der leeren Form		4,530 kg
Masse des Betons	m _B	18,614 kg
Frischbetonrohddichte	ρ _{Fb}	2327 kg/m ³

Konsistenz:

a = 35-36 cm	Zeit 10 min	a = cm	Zeit min
--------------	-------------	--------------	----------------

Luftgehalt:

LP 1,8 %	Zeit 15min	LP %	Zeit min
----------	------------	------------	----------------

Temperatur:

Luft	23 °C	Beton	23,4 °C
------	-------	-------	---------

Wassergehalt des Betons:

Masse der Probe vor dem Trocknen	m _f	2,00 kg
Masse der Probe nach dem Trocknen	m _t	1,808 kg
Absoluter Wassergehalt der Probe [m _f - m _t]	Δm	0,192 kg
Wassergehalt $\frac{\Delta m}{m_f} * \rho_{Fb} =$	W _{ges}	223,37 kg/m ³

AUSWERTUNG:

Zement [je m ³ Beton]	$\frac{\rho_{Fb} * Z'}{M_B'}$ =	Z	313,28 kg/m ³
Anrechenbarer Bindemittelgehalt	$\frac{\rho_{Fb} * ZU'}{M_B'}$ =	B	313,28 kg/m ³
Wasser- Kernfeuchte	W _k aus der Mischberechnung	W _K	26,39 kg/m ³
Wirksames Wasser	W = W _{ges} - W _K	W	196,98 kg/m ³
W/B – Wert	W/B = 0,63		

Festbetonprüfungen RB-A2 38% (2)**Druckfestigkeit f_c nach 27 Tagen**

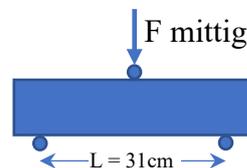
$$f_c = \frac{F_{\text{Bruch}}}{a_1 * a_2}$$

Bezeichnung	Abmessungen [cm]			Masse m [kg]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Bruchlast F_{Bruch} [kN]	Druckfestigkeit f_c [N/mm ²]
	a ₁	a ₂	h				
W1	15	15	15	7,694	2280	660	29,33
W2	15	15	15	7,608	2254	639	28,40
W3	15	15	15	7,688	2287	651	28,93
Mittelwert					2270	650	28,89

Spaltzugfestigkeit $f_{ct,sp}$ nach 27 Tagen

$$f_{ct,sp} = \frac{2 * F_{\text{Bruch}}}{h * l * \pi}$$

Bezeichnung	Abmessungen [cm]			Masse m [kg]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Bruchlast F_{Bruch} [kN]	Spaltzugfestigkeit $f_{ct,sp}$ [N/mm ²]
	b	h	l				
W4	15	15	15	7,737	2293	75	2,12
W5	15	15	15	7,676	2274	79	2,24
W6	15	15	15	7,668	2272	71	2,01
Mittelwert					2268	75	2,12

Biegezugfestigkeit $f_{ct,f}$ nach 30 Tagen

$$f_{ct,f} = \frac{6}{4} * \frac{F_{\text{Bruch}} * L}{b * h^2}$$

Bezeichnung	Abmessungen [cm]			Masse m [kg]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Bruchlast F_{Bruch} [kN]	Biegezugfestigkeit $f_{ct,f}$ [N/mm ²]
	b	h	l				
P1	12	12	36	11,96	2307	16,1	4,33
P2	12	12	36	12,12	2337	15,9	4,28
Mittelwert					2322	16,0	4,31

E-Modul $E_{C,0}$ nach 28 TagenP1 $E_{C,0} = 24\ 260\ \text{N/mm}^2$ P2 $E_{C,0} = 24\ 706\ \text{N/mm}^2$ P3 $E_{C,0} = 25\ 514\ \text{N/mm}^2$ **Mittelwert $E_{C,0} = 24\ 827\ \text{N/mm}^2$**

Diese Prüfung zur E-Modul Ermittlung wurde in der Prüfanstalt BPS in Leonding durchgeführt.

Die Ergebnisse wurden in diese Aufstellung übernommen.

Nach der E-Modul Ermittlung wurde von den Prismen P1 und P2 im Labor der HTL die Biegezugfestigkeit bestimmt.

Mischberechnung RB-A2 100%

Betonart	C 25/30 / XC2 / F45 / GK16 RB-A2 0/16 U-A			
Zementart	CEM II / B - M (S - L) 42,5 N	Zusatzmittel	FM	2%
Gesteinskörnung	RB-A2 0/16	Kernfeuchte * [Masse-%]	4,75%-0,5%	
W/B - Wert	0,65	$W_{ges} =$	200 kg/m ³	
Luft	1,5%	erf. B =	310 kg/m ³	min B = 260 kg/m ³

Stoffbedarf		Masse [kg]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l] = [dm ³]
wirksames Wasser	W	200	: 1,0 →	200
Bindemittel	B	310	: 3,1 →	100
Luftgehalt	L	-	-	15
Gesteinskörnung	K	1634 ←	2,385**	685
Wasser-Kernfeuchte	W _K	69,45		-
Frischbetonrohddichte		2213 kg/m ³		1000

Einwaagen für				1000 l = 1 m ³			55 l	
Körnung	Anteil [%]	Stoffraum [l]	Rohdichte [kg/dm ³]	m _t [kg]	w		m _f [kg]	m _f [kg]
					[%]	[l] = [kg]		
0/4	0	0	2,7	0	0		0	0
4/8	0	0	2,7	0	0		0	0
8/16	0	0	2,7	0	0		0	0
RB-A2 0/16	100	685	2,385***	1634	9,9	W _{GK} =162	1796	98,80
					W _K	69,45		
				Σ 1634	0	W _{GK} -W _K = 92,32	Σ 1796	Σ 98,80
Bindemittel							310 kg	17,05 kg
Zugabewasser		$W_{zug} = W - (W_{GK} - W_K)$					108 kg	5,92 kg
		Gesamteinwaage					2213 kg	121,77 kg

*) Kernfeuchte in M.-% gemäß Produktangabe, nach 30 Minuten Wasserlagerung, minus 0,5%

**) Rohdichte der (gesamten) Gesteinskörnung, gemittelt über die Korngruppen

***) Rohdichte der rezyklierten Gesteinskörnung gemäß Produktangabe „Rohdichte auf ofentrockener Basis“

Frischbetonprüfungsprotokoll RB-A2 100%

Eingewogene Bestandteile je Mische:

<u>Anmerkung:</u> Die Körnung K wird feucht eingewogen Die Konsistenz ist sehr niedrig und der Beton kann nur schwer verarbeitet werden	Z'	17,05 kg
	ZU'	0 kg
	K'	98,80 kg
	ZM'	2% von Z'=0,34 kg
	W _{zug} '	5,58 kg
Eingewogene Gesamtmenge	M _B '	121,77 kg

Rohdichte des verdichteten Betons: (LP-Prüftopf)

Masse der verdichteten Betonprobe + Form		23,064 kg
Masse der leeren Form		4,530 kg
Masse des Betons	m _B	18,534 kg
Frischbetonrohddichte	ρ _{Fb}	2317 kg/m ³

Konsistenz:

a = 28 cm	Zeit 10 min	a = cm	Zeit min
-----------	-------------	--------------	----------------

Luftgehalt:

LP 1,2 %	Zeit 15. min	LP %	Zeit min
----------	--------------	------------	----------------

Temperatur:

Luft	22,5 °C	Beton	21,8 °C
------	---------	-------	---------

Wassergehalt des Betons:

Masse der Probe vor dem Trocknen	m _f	1,200 kg
Masse der Probe nach dem Trocknen	m _t	1,060 kg
Absoluter Wassergehalt der Probe [m _f - m _t]	Δm	0,140 kg
Wassergehalt $\frac{\Delta m}{m_f} * \rho_{Fb} =$	W _{ges}	270,29 kg/m ³

AUSWERTUNG:

Zement [je m ³ Beton]	$\frac{\rho_{Fb} * Z'}{M_B'}$	Z	324,39 kg/m ³
Anrechenbarer Bindemittelgehalt	$\frac{\rho_{Fb} * ZU'}{M_B'}$	B	324,39 kg/m ³
Wasser- Kernfeuchte	W _k aus der Mischberechnung	W _K	69,45 kg/m ³
Wirksames Wasser	W=W _{ges} -W _K	W	200,84 kg/m ³
W/B – Wert	W/B = 0,62		

Festbetonprüfungen RB-A2 100%

Druckfestigkeit f_c nach 28 Tagen

$$f_c = \frac{F_{\text{Bruch}}}{a_1 * a_2}$$

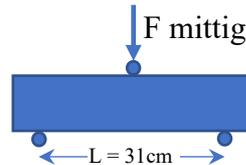
Bezeichnung	Abmessungen [cm]			Masse m [kg]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Bruchlast F_{Bruch} [kN]	Druckfestigkeit f_c [N/mm ²]
	a ₁	a ₂	h				
W1	15	15	15	7636	2263	950	42,22
W2	15	15	15	7,688	2278	960	42,67
Mittelwert					2270	955	42,44

Spaltzugfestigkeit $f_{ct,sp}$ nach 28 Tagen

$$f_{ct,sp} = \frac{2 * F_{\text{Bruch}}}{h * l * \pi}$$

Bezeichnung	Abmessungen [cm]			Masse m [kg]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Bruchlast F_{Bruch} [kN]	Spaltzugfestigkeit $f_{ct,sp}$ [N/mm ²]
	b	h	l				
W3	15	15	15	7,694	2280	101,0	2,86
W4	15	15	15	7,618	2257	94,0	2,66
Mittelwert					2268	97,5	2,76

Biegezugfestigkeit $f_{ct,f}$ nach 32 Tagen



$$f_{ct,f} = \frac{6}{4} * \frac{F_{\text{Bruch}} * L}{b * h^2}$$

Bezeichnung	Abmessungen [cm]			Masse m [kg]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Bruchlast F_{Bruch} [kN]	Biegezugfestigkeit $f_{ct,f}$ [N/mm ²]
	b	h	l				
P1	12	12	36	11,81	2278	14,7	3,96
P2	12	12	36	11,96	2308	14,3	3,85
Mittelwert					2384	14,5	3,90

E-Modul $E_{C,0}$ nach 28 Tagen

P1 $E_{C,0} = 24\ 463\ \text{N/mm}^2$

P2 $E_{C,0} = 24\ 716\ \text{N/mm}^2$

Mittelwert $E_{C,0} = 24\ 827\ \text{N/mm}^2$

Diese Prüfung zur E-Modul Ermittlung wurde in der Prüfanstalt BPS in Leonding durchgeführt.

Die Ergebnisse wurden in diese Aufstellung übernommen.

Nach der E-Modul Ermittlung wurde von den Prismen P1 und P2 im Labor der HTL die Biegezugfestigkeit bestimmt.

Dokumentationsfotos RB-A2 100%



Kegelstumpf



Ausbreitmaß



Luftporentopf vor dem Verdichten



Luftporentopf nach dem Verdichten



Bruchbild nach der Spaltzugfestigkeitsprüfung



Offensichtlich schlechte Konsistenz

Mischberechnung RH-B 25%

Betonsorte	C 25/30 / XC2 / F45 / GK16- RH-B 0/16 U-A		
Zementsorte	CEM II / B - M (S - L) 42,5 N	Zusatzmittel	
Gesteinskörnung	0/4, 4/8, 8/16 RH-B 0/16	Kernfeuchte * [Masse-%]	7,6%-0,5%
W/B - Wert	0,65	$W_{ges} =$	200 kg/m ³
Luft	1,5%	erf. B =	310 kg/m ³ min B = 260 kg/m ³

Stoffbedarf		Masse [kg]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l] = [dm ³]
wirksames Wasser	W	200	: 1,0 →	200
Bindemittel	B	310	: 3,1 →	100
Luftgehalt	L	-	-	15
Gesteinskörnung	K	1746 ←	2,549**	685
Wasser- Kernfeuchte	W _K	25,48		-
Frischbetonrohddichte		2281 kg/m ³		1000

Einwaagen für				1000 l = 1 m ³			55 l	
Körnung	Anteil [%]	Stoffraum [l]	Rohdichte [kg/dm ³]	m _t [kg]	w		m _f [kg]	m _f [kg]
					[%]	[l] = [kg]		
0/4	36	247	2,7	666	0		666	36,63
4/8	16,5	113	2,7	305	0		305	16,79
8/16	22,5	154	2,7	416	0		416	22,89
RH-B 0/16	25	171	2,095***	359	15	W _{GK} =54	413	22,70
					W _K	25,48		
				Σ 1746		W _{GK} -W _K = 28,35	Σ 1800	Σ 99,00
Bindemittel							310 kg	17,05 kg
Zugabewasser		$W_{zug} = W - (W_{GK} - W_K)$					172 kg	9,44 kg
		Gesamteinwaage					2281 kg	125,49 kg

*) Kernfeuchte in M.-% gemäß Produktangabe, nach 30 Minuten Wasserlagerung, minus 0,5%

**) Rohdichte der (gesamten) Gesteinskörnung, gemittelt über die Korngruppen

***) Rohdichte der rezyklierten Gesteinskörnung gemäß Produktangabe „Rohdichte auf ofentrockener Basis“

Frischbetonprüfungsprotokoll RH-B 25%

Eingewogene Bestandteile je Mische:

<u>Anmerkung:</u> Die Körnung K wird feucht eingewogen Die Konsistenz ist ideal und der Beton kann gut verarbeitet werden	Z'	17,05 kg
	ZU'	0 kg
	K'	99,00 kg
	ZM'	0 kg
	W _{zug} '	9,44 kg
Eingewogene Gesamtmenge	M _B '	125,49 kg

Rohdichte des verdichteten Betons: (LP-Prüftopf)

Masse der verdichteten Betonprobe + Form		23,010 kg
Masse der leeren Form		4,540 kg
Masse des Betons	m _B	18,470 kg
Frischbetonrohddichte	ρ _{Fb}	2308 kg/m ³

Konsistenz:

a = 51 cm	Zeit 10 min	a = cm	Zeit min
-----------	-------------	--------------	----------------

Luftgehalt:

LP 1,1 %	Zeit 15 min	LP %	Zeit min
----------	-------------	------------	----------------

Temperatur:

Luft	22 °C	Beton	21,8 °C
------	-------	-------	---------

Wassergehalt des Betons:

Masse der Probe vor dem Trocknen	m _f	2,00 kg
Masse der Probe nach dem Trocknen	m _t	1,800 kg
Absoluter Wassergehalt der Probe [m _f - m _t]	Δm	0,200 kg
Wassergehalt $\frac{\Delta m}{m_f} * \rho_{Fb} =$	W _{ges}	230,88 kg/m ³

AUSWERTUNG:

Zement [je m ³ Beton]	$\frac{\rho_{Fb} * Z'}{M_B'}$	Z	313,68 kg/m ³
Anrechenbarer Bindemittelgehalt	$\frac{\rho_{Fb} * ZU'}{M_B'}$	B	313,68 kg/m ³
Wasser- Kernfeuchte	W _k aus der Mischberechnung	W _K	25,48 kg/m ³
Wirksames Wasser	W = W _{ges} - W _K	W	205,40 kg/m ³
W/B – Wert	W/B = 0,65		

Festbetonprüfungen RH-B 25%**Druckfestigkeit f_c nach 28 Tagen**

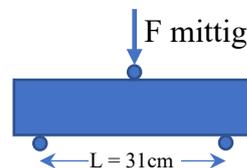
$$f_c = \frac{F_{\text{Bruch}}}{a_1 * a_2}$$

Bezeichnung	Abmessungen [cm]			Masse m [kg]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Bruchlast F_{Bruch} [kN]	Druckfestigkeit f_c [N/mm ²]
	a ₁	a ₂	h				
W1	15	15	15	7,664	2265	535	23,78
W2	15	15	15	7,516	2227	556	24,71
W3	15	15	15	7,590	2249	523	23,24
Mittelwert					2247	538	23,91

Spaltzugfestigkeit $f_{ct,sp}$ nach 28 Tagen

$$f_{ct,sp} = \frac{2 * F_{\text{Bruch}}}{h * l * \pi}$$

Bezeichnung	Abmessungen [cm]			Masse m [kg]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Bruchlast F_{Bruch} [kN]	Spaltzugfestigkeit $f_{ct,sp}$ [N/mm ²]
	b	h	l				
W4	15	15	15	7,574	2244	76	2,15
W5	15	15	15	7,618	2257	71	2,01
W6	15	15	15	7,660	2270	74	2,09
Mittelwert					2257	73,6	2,08

Biegezugfestigkeit $f_{ct,f}$ nach 32 Tagen

$$f_{ct,f} = \frac{6}{4} * \frac{F_{\text{Bruch}} * L}{b * h^2}$$

Bezeichnung	Abmessungen [cm]			Masse m [kg]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Bruchlast F_{Bruch} [kN]	Biegezugfestigkeit $f_{ct,f}$ [N/mm ²]
	b	h	l				
P1	12	12	36	12,02	2317	14,9	4,01
P2	12	12	36	11,99	2313	12,4	3,34
Mittelwert					2315	13,65	3,67

E-Modul $E_{C,0}$ nach 28 TagenP1 $E_{C,0} = 21\ 341\ \text{N/mm}^2$ P2 $E_{C,0} = 21\ 007\ \text{N/mm}^2$ P3 $E_{C,0} = 22\ 201\ \text{N/mm}^2$ **Mittelwert $E_{C,0} = 21\ 517\ \text{N/mm}^2$**

Diese Prüfung zur E-Modul Ermittlung wurde in der Prüfanstalt BPS in Leonding durchgeführt.

Die Ergebnisse wurden in diese Aufstellung übernommen.

Nach der E-Modul Ermittlung wurde von den Prismen P1 und P2 im Labor der HTL die Biegezugfestigkeit bestimmt.

Dokumentationsfotos RH-B 25 %



Sichtbar gute Konsistenz



Ausbreitmaß



Bruchbild nach der Spaltzugfestigkeitsprüfung



Bruchbild nach der Biegezugfestigkeitsprüfung

Mischberechnung RH-B 25% ungewaschen

Betonsorte	C 25/30 / XC2 / F45 / GK16- RH-B 0/16 U-A		
Zementsorte	CEM II / B - M (S - L) 42,5 N	Zusatzmittel	
Gesteinskörnung	0/4, 4/8, 8/16 RH-B 0/16	Kernfeuchte * [Masse-%]	7,6%-0,5%
W/B - Wert	0,65	$W_{ges} =$	200 kg/m ³
Luft	1,5%	erf. B =	310 kg/m ³ min B = 260 kg/m ³

Stoffbedarf		Masse [kg]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l] = [dm ³]
wirksames Wasser	W	200	: 1,0 →	200
Bindemittel	B	310	: 3,1 →	100
Luftgehalt	L	-	-	15
Gesteinskörnung	K	1747 ←	2,5493**	685
Wasser- Kernfeuchte	W _K	25,50		-
Frischbetonrohddichte		2282 kg/m ³		1000

Einwaagen für				1000 l = 1 m ³				55 l
Körnung	Anteil [%]	Stoffraum [l]	Rohdichte [kg/dm ³]	m _t [kg]	w		m _f [kg]	m _f [kg]
					[%]	[l] = [kg]		
0/4	36	247	2,7	666	0		666	36,63
4/8	16,5	113	2,7	305	0		305	16,79
8/16	22,5	154	2,7	416	0		416	22,89
RH-B 0/4****	12	82	2,095****	168	1,6	W _{GK} =3	170	9,37
RH-B 4/8****	5,5	38	2,095****	81	0,8	W _{GK} =1	82	4,49
RH-B 8/16****	7,5	51	2,095****	110	0,8	W _{GK} =1	111	6,12
					W _K	25,50		
				Σ 1747		W _{GK} -W _K = -20,5	Σ 1751	Σ 96,29
Bindemittel							310 kg	17,05 kg
Zugabewasser		$W_{zug} = W - (W_{GK} - W_K)$					221 kg	12,17 kg
		Gesamteinwaage					2282 kg	125,50 kg

*) Kernfeuchte in M.-% gemäß Produktangabe, nach 30 Minuten Wasserlagerung, minus 0,5%

**) Rohdichte der (gesamten) Gesteinskörnung, gemittelt über die Korngruppen

***) Rohdichte der rezyklierten Gesteinskörnung gemäß Produktangabe „Rohdichte auf ofentrockener Basis“

****) Dieses Material wurde nicht mit dem Nassaufbereitungsverfahren aufbereitet

Frischbetonprüfungsprotokoll RH-B 25% ungewaschen

Eingewogene Bestandteile je Mische:

<u>Anmerkung:</u> Die Körnung K wird feucht eingewogen Die Konsistenz ist ideal und der Beton kann gut verarbeitet werden	Z'	17,05 kg
	ZU'	0 kg
	K'	96,29 kg
	ZM'	0 kg
	W _{zug} '	12,17 kg
Eingewogene Gesamtmenge	M _B '	125,50 kg

Rohdichte des verdichteten Betons: (LP-Prüftopf)

Masse der verdichteten Betonprobe + Form		22,770 kg
Masse der leeren Form		4,534 kg
Masse des Betons	m _B	18,240 kg
Frischbetonrohddichte	ρ _{Fb}	2280 kg/m ³

Konsistenz:

a = 51 cm	Zeit 10 min	a = cm	Zeit min
-----------	-------------	--------------	----------------

Luftgehalt:

LP 1,1 %	Zeit 15 min	LP %	Zeit min
----------	-------------	------------	----------------

Temperatur:

Luft	22 °C	Beton	21,8 °C
------	-------	-------	---------

Wassergehalt des Betons:

Masse der Probe vor dem Trocknen	m _f	2,00 kg
Masse der Probe nach dem Trocknen	m _t	1,802 kg
Absoluter Wassergehalt der Probe [m _f - m _t]	Δm	0,198 kg
Wassergehalt $\frac{\Delta m}{m_f} * \rho_{Fb} =$	W _{ges}	225,72 kg/m ³

AUSWERTUNG:

Zement [je m ³ Beton]	$\frac{\rho_{Fb} * Z'}{M_B'}$	Z	309,75 kg/m ³
Anrechenbarer Bindemittelgehalt	$\frac{\rho_{Fb} * ZU'}{M_B'}$	B	309,75 kg/m ³
Wasser- Kernfeuchte	W _k aus der Mischberechnung	W _K	25,50 kg/m ³
Wirksames Wasser	W = W _{ges} - W _K	W	200,22 kg/m ³
W/B – Wert	W/B = 0,65		

Festbetonprüfungen RH-B 25% ungewaschen

Druckfestigkeit f_c nach 28 Tagen

$$f_c = \frac{F_{\text{Bruch}}}{a_1 * a_2}$$

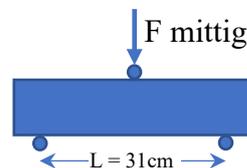
Bezeichnung	Abmessungen [cm]			Masse m [kg]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Bruchlast F_{Bruch} [kN]	Druckfestigkeit f_c [N/mm ²]
	a ₁	a ₂	h				
W1	15	15	15	7,470	2213	597	26,53
W2	15	15	15	7,448	2207	555	24,67
W3	15	15	15	7,580	2246	574	25,51
Mittelwert					2222	575	25,57

Spaltzugfestigkeit $f_{ct,sp}$ nach 28 Tagen

$$f_{ct,sp} = \frac{2 * F_{\text{Bruch}}}{h * l * \pi}$$

Bezeichnung	Abmessungen [cm]			Masse m [kg]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Bruchlast F_{Bruch} [kN]	Spaltzugfestigkeit $f_{ct,sp}$ [N/mm ²]
	b	h	l				
W4	15	15	15	7,460	2210	80	2,26
W5	15	15	15	7,490	2219	83	2,35
W6	15	15	15	7,498	2222	69	1,95
Mittelwert					2217	77,3	2,19

Biegezugfestigkeit $f_{ct,f}$ nach 32 Tagen



$$f_{ct,f} = \frac{6}{4} * \frac{F_{\text{Bruch}} * L}{b * h^2}$$

Bezeichnung	Abmessungen [cm]			Masse m [kg]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Bruchlast F_{Bruch} [kN]	Biegezugfestigkeit $f_{ct,f}$ [N/mm ²]
	b	h	l				
P1	12	12	36	11,75	2267	16,7	4,49
P2	12	12	36	11,78	2273	17,0	4,57
Mittelwert					2270	16,85	4,53

E-Modul $E_{C,0}$ nach 28 Tagen

P1 $E_{C,0} = 20\ 756\ \text{N/mm}^2$

P2 $E_{C,0} = 22\ 014\ \text{N/mm}^2$

Mittelwert $E_{C,0} = 21\ 385\ \text{N/mm}^2$

Diese Prüfung zur E-Modul Ermittlung wurde in der Prüfanstalt BPS in Leonding durchgeführt.

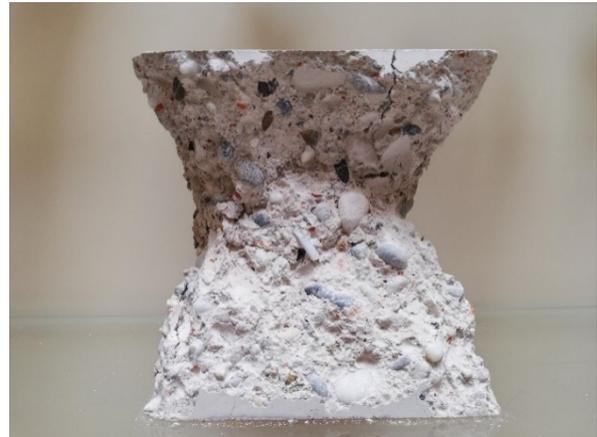
Die Ergebnisse wurden in diese Aufstellung übernommen.

Nach der E-Modul Ermittlung wurde von den Prismen P1 und P2 im Labor der HTL die Biegezugfestigkeit bestimmt.

Dokumentationsfotos RH-B 25 % ungewaschen



Bruchbild nach der
Druckfestigkeitsprüfung



Bruchbild nach der
Druckfestigkeitsprüfung

Mischberechnung RH-B 65%

Betonsorte	C 25/30 / XC2 / F45 / GK16- RH-B 0/16 U-A		
Zementsorte	CEM II / B - M (S - L) 42,5 N	Zusatzmittel	
Gesteinskörnung	0/4, 4/8, 8/16 RH-B 0/16	Kernfeuchte * [Masse-%]	7,6%-0,5%
W/B - Wert	0,65	$W_{ges} =$	200 kg/m ³
Luft	1,5%	erf. B =	310 kg/m ³ min B = 260 kg/m ³

Stoffbedarf		Masse [kg]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l] = [dm ³]
wirksames Wasser	W	200	: 1,0 →	200
Bindemittel	B	310	: 3,1 →	100
Luftgehalt	L	-	-	15
Gesteinskörnung	K	1580 ←	2,307**	685
Wasser- Kernfeuchte	W _K	66,24		-
Frischbetonrohddichte		2156 kg/m ³		1000

Einwaagen für				1000 l = 1 m ³			55 l	
Körnung	Anteil [%]	Stoffraum [l]	Rohdichte [kg/dm ³]	m _t [kg]	w		m _f [kg]	m _f [kg]
					[%]	[l] = [kg]		
0/4	16,8	115	2,7	311	0		311	17,19
4/8	7,7	53	2,7	142	0		142	7,83
8/16	10,5	72	2,7	194	0		194	10,68
RH-B 0/16	65	445	2,095***	933	15	W _{GK} =140	1073	59,01
					W _K	66,24		
				Σ 1580		W _{GK} -W _K = 73,71	Σ 1720	Σ 94,62
Bindemittel							310 kg	17,05 kg
Zugabewasser		$W_{zug} = W - (W_{GK} - W_K)$					126 kg	6,95 kg
		Gesamteinwaage					2156 kg	118,62 kg

*) Kernfeuchte in M.-% gemäß Produktangabe, nach 30 Minuten Wasserlagerung, minus 0,5%

**) Rohdichte der (gesamten) Gesteinskörnung, gemittelt über die Korngruppen

***) Rohdichte der rezyklierten Gesteinskörnung gemäß Produktangabe „Rohdichte auf ofentrockener Basis“

Frischbetonprüfungsprotokoll RH-B 65%

Eingewogene Bestandteile je Mische:

<u>Anmerkung:</u> Die Körnung K wird feucht eingewogen Die Konsistenz ist ideal und der Beton kann gut verarbeitet werden	Z'	17,05 kg
	ZU'	0 kg
	K'	94,62 kg
	ZM'	0 kg
	W _{zug} '	6,95 kg
Eingewogene Gesamtmenge	M _B '	118,62 kg

Rohdichte des verdichteten Betons: (LP-Prüftopf)

Masse der verdichteten Betonprobe + Form		22,570 kg
Masse der leeren Form		4,534 kg
Masse des Betons	m _B	18,036 kg
Frischbetonrohddichte	ρ _{Fb}	2255 kg/m ³

Konsistenz:

a = 43 cm	Zeit 10 min	a = cm	Zeit min
-----------	-------------	--------------	----------------

Luftgehalt:

LP 1,6 %	Zeit 15 min	LP %	Zeit min
----------	-------------	------------	----------------

Temperatur:

Luft	18,6 °C	Beton	17,8 °C
------	---------	-------	---------

Wassergehalt des Betons:

Masse der Probe vor dem Trocknen	m _f	2,00 kg
Masse der Probe nach dem Trocknen	m _t	1,778 kg
Absoluter Wassergehalt der Probe [m _f - m _t]	Δm	0,222 kg
Wassergehalt $\frac{\Delta m}{m_f} * \rho_{Fb} =$	W _{ges}	250,25 kg/m ³

AUSWERTUNG:

Zement [je m ³ Beton]	$\frac{\rho_{Fb} * Z'}{M_B'}$	Z	324,05 kg/m ³
Anrechenbarer Bindemittelgehalt	$\frac{\rho_{Fb} * ZU'}{M_B'}$	B	324,05 kg/m ³
Wasser- Kernfeuchte	W _k aus der Mischberechnung	W _K	66,24 kg/m ³
Wirksames Wasser	W = W _{ges} - W _K	W	184,01 kg/m ³
W/B – Wert	W/B = 0,57		

Festbetonprüfungen RH-B 65%

Druckfestigkeit f_c nach 28 Tagen

$$f_c = \frac{F_{\text{Bruch}}}{a_1 * a_2}$$

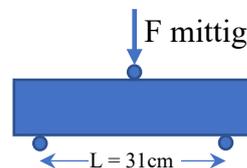
Bezeichnung	Abmessungen [cm]			Masse m [kg]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Bruchlast F_{Bruch} [kN]	Druckfestigkeit f_c [N/mm ²]
	a ₁	a ₂	h				
W1	15	15	15	7,398	2192	627	27,87
W2	15	15	15	7,462	2211	653	29,02
W3	15	15	15	7,380	2187	649	28,84
Mittelwert					2197	643	28,58

Spaltzugfestigkeit $f_{ct,sp}$ nach 28 Tagen

$$f_{ct,sp} = \frac{2 * F_{\text{Bruch}}}{h * l * \pi}$$

Bezeichnung	Abmessungen [cm]			Masse m [kg]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Bruchlast F_{Bruch} [kN]	Spaltzugfestigkeit $f_{ct,sp}$ [N/mm ²]
	b	h	l				
W4	15	15	15	7,384	2188	86	2,43
W5	15	15	15	7,380	2187	81	2,29
W6	15	15	15	7,398	2192	75	2,12
Mittelwert					2341	80,6	2,28

Biegezugfestigkeit $f_{ct,f}$ nach 32 Tagen



$$f_{ct,f} = \frac{6}{4} * \frac{F_{\text{Bruch}} * L}{b * h^2}$$

Bezeichnung	Abmessungen [cm]			Masse m [kg]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Bruchlast F_{Bruch} [kN]	Biegezugfestigkeit $f_{ct,f}$ [N/mm ²]
	b	h	l				
P1	12	12	36	11,63	2243	17,3	4,66
P2	12	12	36	11,72	2261	17,9	4,81
Mittelwert					2252	17,6	4,74

E-Modul $E_{C,0}$ nach 28 Tagen

P1 $E_{C,0} = 19\ 772\ \text{N/mm}^2$

P2 $E_{C,0} = 20\ 064\ \text{N/mm}^2$

P3 $E_{C,0} = 20\ 795\ \text{N/mm}^2$

Mittelwert $E_{C,0} = 20\ 210\ \text{N/mm}^2$

Diese Prüfung zur E-Modul Ermittlung wurde in der Prüfanstalt BPS in Leonding durchgeführt.

Die Ergebnisse wurden in diese Aufstellung übernommen.

Nach der E-Modul Ermittlung wurde von den Prismen P1 und P2 im Labor der HTL die Biegezugfestigkeit bestimmt.

Dokumentationsfotos RH-B 65 %



Kegelstumpf



Ausbreitmaß



Sichtbar gute Konsistenz



Bruchbild nach der Biegezugfestigkeitsprüfung

Mischberechnung RH-B 100%

Betonsorte	C 25/30 / XC2 / F45 / GK16- RH-B 0/16 U-A			
Zementsorte	CEM II / B - M (S - L) 42,5 N	Zusatzmittel	FM	1%
Gesteinskörnung	RH-B 0/16	Kernfeuchte * [Masse-%]	7,6%-0,5%	
W/B - Wert	0,65	$W_{ges} =$	200 kg/m ³	
Luft	1,5%	erf. B =	310 kg/m ³ min B = 260 kg/m ³	

Stoffbedarf		Masse [kg]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l] = [dm ³]
wirksames Wasser	W	200	: 1,0 →	200
Bindemittel	B	310	: 3,1 →	100
Luftgehalt	L	-	-	15
Gesteinskörnung	K	1435 ←	2,095**	685
Wasser- Kernfeuchte	W _K	101,91		-
Frischbetonrohddichte		2047 kg/m ³		1000

Einwaagen für				1000 l = 1 m ³			55 l	
Körnung	Anteil [%]	Stoffraum [l]	Rohdichte [kg/dm ³]	m _t [kg]	w		m _f [kg]	m _f [kg]
					[%]	[l] = [kg]		
0/4	0	0	2,7	0	0		0	0
4/8	0	0	2,7	0	0		0	0
8/16	0	0	2,7	0	0		0	0
RH-B 0/16	100	685	2,095***	1435	15	W _{GK} =215	1651	90,79
					W _K	101,91		
				Σ 1580		W _{GK} -W _K = 113,39	Σ 1651	Σ 90,79
Bindemittel							310 kg	17,05 kg
Zugabewasser		$W_{zug} = W - (W_{GK} - W_K)$					87 kg	4,76 kg
		Gesamteinwaage					2047 kg	112,60 kg

*) Kernfeuchte in M.-% gemäß Produktangabe, nach 30 Minuten Wasserlagerung, minus 0,5%

**) Rohdichte der (gesamten) Gesteinskörnung, gemittelt über die Korngruppen

***) Rohdichte der rezyklierten Gesteinskörnung gemäß Produktangabe „Rohdichte auf ofentrockener Basis“

Frischbetonprüfungsprotokoll RH-B 100%

Eingewogene Bestandteile je Mische:

<u>Anmerkung:</u> Die Körnung K wird feucht eingewogen Die Konsistenz ist durch das Fließmittel zu hoch, daher müssen auch 10 g Stellmittel verwendet werden	Z'	17,05 kg
	ZU'	0 kg
	K'	90,79 kg
	ZM'	1% Z'=0,175 kg
	W _{zug} '	4,558 kg
Eingewogene Gesamtmenge	M _B '	112,60 kg

Rohdichte des verdichteten Betons: (LP-Prüftopf)

Masse der verdichteten Betonprobe + Form		20,364 kg
Masse der leeren Form		4,534 kg
Masse des Betons	m _B	15,830 kg
Frischbetonrohddichte	ρ _{Fb}	1979 kg/m ³

Konsistenz:

a = 44,5 cm	Zeit 10 min	a = cm	Zeit min
-------------	-------------	--------------	----------------

Luftgehalt:

LP 8 %	Zeit 15 min	LP %	Zeit min
--------	-------------	------------	----------------

Temperatur:

Luft	17 °C	Beton	16,4 °C
------	-------	-------	---------

Wassergehalt des Betons:

Masse der Probe vor dem Trocknen	m _f	2,00 kg
Masse der Probe nach dem Trocknen	m _t	1,729 kg
Absoluter Wassergehalt der Probe [m _f - m _t]	Δm	0,271 kg
Wassergehalt $\frac{\Delta m}{m_f} * \rho_{Fb} =$	W _{ges}	268,12 kg/m ³

AUSWERTUNG:

Zement [je m ³ Beton]	$\frac{\rho_{Fb} * Z'}{M_B'}$ =	Z	299,84 kg/m ³
Anrechenbarer Bindemittelgehalt	$\frac{\rho_{Fb} * ZU'}{M_B'}$ =	B	299,84 kg/m ³
Wasser- Kernfeuchte	W _k aus der Mischberechnung	W _K	101,91 kg/m ³
Wirksames Wasser	W=W _{ges} -W _K	W	166,21 kg/m ³
W/B – Wert	W/B = 0,55		

Festbetonprüfungen RH-B 100%

Druckfestigkeit f_c nach 28 Tagen

$$f_c = \frac{F_{\text{Bruch}}}{a_1 * a_2}$$

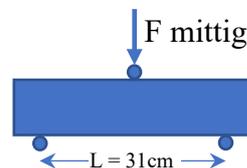
Bezeichnung	Abmessungen [cm]			Masse m [kg]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Bruchlast F_{Bruch} [kN]	Druckfestigkeit f_c [N/mm ²]
	a ₁	a ₂	h				
W1	15	15	15	6,574	1948	536	23,82
W2	15	15	15	6,422	1903	473	21,02
W3	15	15	15	6,404	1898	478	21,24
Mittelwert					1916	495	22,03

Spaltzugfestigkeit $f_{ct,sp}$ nach 28 Tagen

$$f_{ct,sp} = \frac{2 * F_{\text{Bruch}}}{h * l * \pi}$$

Bezeichnung	Abmessungen [cm]			Masse m [kg]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Bruchlast F_{Bruch} [kN]	Spaltzugfestigkeit $f_{ct,sp}$ [N/mm ²]
	b	h	l				
W4	15	15	15	6,552	1941	75	2,12
W5	15	15	15	6,574	1948	69	1,95
W6	15	15	15	6,040	1898	66	1,87
Mittelwert					1929	70	1,98

Biegezugfestigkeit $f_{ct,f}$ nach 32 Tagen



$$f_{ct,f} = \frac{6}{4} * \frac{F_{\text{Bruch}} * L}{b * h^2}$$

Bezeichnung	Abmessungen [cm]			Masse m [kg]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Bruchlast F_{Bruch} [kN]	Biegezugfestigkeit $f_{ct,f}$ [N/mm ²]
	b	h	l				
P1	12	12	36	10,52	2029	19,1	5,14
P2	12	12	36	10,56	2037	20,5	5,52
Mittelwert					2033	19,8	5,33

E-Modul $E_{C,0}$ nach 28 Tagen

P1 $E_{C,0} = 14\ 728\ \text{N/mm}^2$

P2 $E_{C,0} = 15\ 225\ \text{N/mm}^2$

P3 $E_{C,0} = 15\ 066\ \text{N/mm}^2$

Mittelwert $E_{C,0} = 15\ 006\ \text{N/mm}^2$

Diese Prüfung zur E-Modul Ermittlung wurde in der Prüfanstalt BPS in Leonding durchgeführt.

Die Ergebnisse wurden in diese Aufstellung übernommen.

Nach der E-Modul Ermittlung wurde von den Prismen P1 und P2 im Labor der HTL die Biegezugfestigkeit bestimmt.

Dokumentationsfotos RH-B 100%



Kegelstumpf



Ausbreitmaß



Sichtbar gute Konsistenz



Bruchbild nach der Biegezugfestigkeitsprüfung



Bruchbild nach der Spaltzugfestigkeitsprüfung



Bruchbild nach der Druckfestigkeitsprüfung



Bruchbild nach der
Spaltzugfestigkeitsprüfung



Bruchbild nach der
Biegezugfestigkeitsprüfung