



Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen
Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik
und Bauökologie
Karlsplatz 13/207, A-1040 Wien



Recyclingbaustoffe: Rezyklierte Gesteinskörnung im Upcycling

Stand der Technik in Österreich, 2025

Autor_innen:

Ildiko Merta, Prof. doc. Dr.techn. Dipl.-Ing. (TU Wien)

Daniella Mehanni, Dipl.-Ing. (TU Wien)

Lukas Hausner, Dipl.-Ing. (TU Wien)

Nico Scherzer, BSc (TU Wien)

Tudor Dobra, Dipl.-Ing. (IBO)

Philipp Boogman, Dipl.-Ing. (IBO)

VORWORT

Die Bau- und Immobilienwirtschaft steht im Zentrum mehrerer gleichzeitiger Transformationen: Klimaschutz, Ressourcenknappheit, Versorgungssicherheit und Wettbewerbsfähigkeit verlangen nach neuen Antworten. Eine dieser Antworten ist die konsequente Umsetzung der Kreislaufwirtschaft als handlungsleitendes Prinzip für Planung, Ausschreibung, Bauausführung und Rückbau.

Gerade im Umgang mit mineralischen Bau- und Abbruchabfällen entscheidet sich, ob Kreislaufwirtschaft in Österreich und Europa gelingt. Der Bausektor ist für einen erheblichen Anteil des Ressourcenverbrauchs und des Abfallaufkommens verantwortlich. Gleichzeitig verfügt kaum ein anderer Bereich über ein derart großes Potenzial, Stoffkreisläufe tatsächlich zu schließen und Primärrohstoffe wirksam zu substituieren.

Als Präsident des Österreichischen Baustoff-Recycling-Verbandes (BRV) sehe ich es als zentrale Aufgabe diesen Wandel aktiv mitzugestalten – auf nationaler wie auf europäischer Ebene. Als Fachverbandsobmann für Entsorgungs- und Ressourcenmanagement der Wirtschaftskammer Österreich ist es mir darüber hinaus ein besonderes Anliegen, praktikable, wirtschaftlich tragfähige und rechtssichere Rahmenbedingungen für Unternehmen zu schaffen. Und als Baumeister weiß ich: Politische Zielsetzungen entfalten nur dann Wirkung, wenn sie in der Baupraxis umsetzbar sind.

Rezyklierte Gesteinskörnungen und Recyclingbeton sind dabei kein Nischenthema mehr, sondern ein wesentlicher Baustein einer zukunftsfähigen Bauwirtschaft. Sie leisten einen messbaren Beitrag zur Ressourcenschonung, zur Reduktion von Deponievolumen und zur Verringerung von Umweltwirkungen – vorausgesetzt, sie werden qualitätsgesichert, normenkonform und anwendungsgerecht eingesetzt. Genau hier setzt diese Publikation an.

Der vorliegende Bericht zum *Stand der Technik* zeigt eindrucksvoll, wie weit Forschung, Normung und Praxis in Österreich bereits fortgeschritten sind – und wo zugleich noch Entwicklungs-, Umsetzungs- und Abstimmungsbedarf besteht. Er macht deutlich, dass die hochwertige Verwertung mineralischer Bau- und Abbruchabfälle kein Selbstläufer ist, sondern ein Zusammenspiel aus verwertungsorientiertem Rückbau, moderner Aufbereitungstechnik, klaren rechtlichen Rahmenbedingungen und dem Vertrauen der Anwenderinnen und Anwender erfordert.

Besonders hervorzuheben ist der Fokus auf das **Upcycling**: Ziel muss es sein, mineralische Sekundärrohstoffe – wo technisch und ökologisch sinnvoll – hochwertigen Verwendung zuzuführen. Der Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen im Betonbau ist dafür ein Schlüsselbeispiel. Er zeigt, dass Kreislaufwirtschaft Innovation, Qualität und Wettbewerbsfähigkeit miteinander verbindet.

Diese Publikation liefert dafür eine fundierte fachliche Grundlage. Sie verbindet wissenschaftliche Erkenntnisse mit praxisnahen Beispielen und ordnet nationale Entwicklungen in den europäischen Kontext ein. Damit leistet sie einen wichtigen Beitrag zur weiteren Etablierung von Recyclingbaustoffen im Hoch- und Tiefbau.

Ich danke den Autorinnen und Autoren sowie allen beteiligten Institutionen und Projektpartnern für ihr Engagement und ihre Expertise. Möge dieser Bericht dazu beitragen, das Vertrauen in hochwertige Recyclingbaustoffe weiter zu stärken und den Weg zu einer konsequenten Kreislaufwirtschaft im Bausektor weiter zu ebnen.

Bmstr. Dipl.-Ing- Mag.iur. Dr.mont. Thomas M. Kasper

Impressum

Verlag durch den Österreichischer Baustoff- Recycling Verband (BRV), 2026

Der Branche zur Verfügung gestellt.

© Technische Universität Wien, Wien, 2026 Alle Rechte vorbehalten

Dieses Dokument ist im Rahmen des Forschungsprojekts „UP!crete: Upcycling! Concrete – Performance von Recyclingbetonen im Upcycling“ entstanden.

Projektlaufzeit: 03/2023 - 02/2027

Das Projekt UP!crete wird von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft im Instrument „Collective Research“ des FFG-Basisprogramms gefördert und von den Projektpartnern kofinanziert. Die FFG ist die zentrale nationale Förderorganisation und stärkt Österreichs Innovationskraft (www.ffg.at).



Projektkoordination: Dipl.-Ing. Michaela Smertnig (ecoplus Bau.Energie.Umwelt Cluster NÖ)

Wissenschaftliche Projektleitung: Prof. doc. Dr.techn. Dipl.-Ing. Ildiko Merta (TU Wien)

Wissenschaftlicher Partner: Dipl.-Ing. Philipp Boogman (IBO)

DAS PROJEKTKONSORTIUM



ecoplus Bau.Energie.Umwelt Cluster Niederösterreich (Projektkoordination)

TU Wien – Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie (wissenschaftliche Projektleitung)

IBO – Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie (wissenschaftlicher Partner)

ABEZ GmbH

Alfred Trepka GmbH

Amt der Niederösterreichischen Landesregierung – Abteilung Umwelt- und Energiewirtschaft

Baumit Beteiligungen GmbH

Brantner Österreich GmbH

BRM Recycling GmbH

BRV – Österreichischer Baustoff-Recycling Verband

Gnant GmbH

Hans Zöchling Ges.m.b.H.

Hengl Mineral GmbH

K&K Beton – Beton Erzeugungs und Handels GmbH

Lasselsberger GmbH

Mapei Austria GmbH

Materialversuchsanstalt Strass GmbH

PORR Umwelttechnik GmbH

REGRUB Waste and Recycling GmbH

Rohrdorfer Transportbeton GmbH

RUBBLE MASTER HMH GmbH

Stadt Wien - Prüf-, Inspektions- und Zertifizierungsstelle (MA 39)

Umdasch Group Ventures GmbH

Wopfinger Transportbeton Ges.m.b.H.



Projektkonsortium (©Foto ecoplus)

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	8
1.1	Ausgangslage international	8
1.2	Ausgangslage Österreich	9
2	ÖKOLOGISCHE ASPEKTE	11
3	AKTUELLE HERAUSFORDERUNGEN	12
4	TECHNISCH-WISSENSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN	14
5	RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN: NATIONALE UND INTERNATIONALE NORMENLAGE	17
5.1	Aktuelle Entwicklungen Recyclingbaustoffe in Österreich	17
5.2	Europäische Rahmenbedingungen zum Thema Recyclingbaustoffe	19
5.3	Normative Festlegungen zur Verwendung von Rezyklierten Gesteinskörnungen in Recyclingbeton	20
	Verpflichtungen gemäß Recycling-Baustoffverordnung	22
	Rechtliche Lage: Deutschland	26
	Rechtliche Lage: Schweiz	28
	Rechtliche Lage: Niederlande	29
	Rechtliche Lage: Japan	29
	Weitere nennenswerte rechtliche Rahmenbedingungen	29
6	AUFBEREITUNGS- UND BEHANDLUNGSMETHODEN VON MINERALISCHEN BAUABFÄLLEN	30
6.1	Aufbereitungsanlagen	30
6.2	Trockenaufbereitung	33
	Zerkleinern	33
	Arten von Brechanlagen	34
	Klassierung	35
	Arten von Sieben	36
	Arten von Sichern	36
	Sortieren	37
6.3	Nassaufbereitung	38
	Nasse Dichtesortierverfahren	38
6.4	Umgang mit Schad- und Störstoffen	40

7	BESTEHENDE PRODUKTE AM MARKT	42
7.1	Bestehende rezyklierte Gesteinskörnung am Markt.....	42
7.2	Recyclingbeton am Markt	45
8	EINSATZBEREICHE FÜR RECYCLINGBETON	47
9	FORSCHUNGSPROJEKTE	50
10	PATENTE ZU RECYCLINGGESTEINSKORN UND RECYCLINGBETON	58
11	ZUSAMMENFASSUNG	60
11.1	Gesetzliches Reglement.....	60
11.2	Technischer Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung.....	60
11.3	Aufbereitung und nationale Verbesserungsmaßnahmen	61
11.4	Konklusion	61
11.5	Ausblick	62
12	LITERATURVERZEICHNIS	63

LISTE DER ABKÜRZUNGEN

ADR	Advanced Dry Recovery
AWG	Abfallwirtschaftsgesetz
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BRV	Baustoff Recycling Verband
DafStb	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton
DS	Dänischer Standard
EN	Europäische Norm
EU	Europäische Union
GWP	Global Warming Potential

ITZ	Interfacial Transition Zone
JIS	Japanischer Industrie Standard
LIBS	Laser Induced Breakdown Spectroscopy
MVV TB	Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen
NBN	Nationales Büro für Normung
OIB	Österreichisches Institut für Bautechnik
RB	Recyclingbeton
RBV	Recycling-Baustoffverordnung
RF	Recyclingfeinanteil
rGK	rezyklierte Gesteinskörnung
SCM	Supplementary Cementitious Materials
SIA	Schweizerische Ingenieur- und Architektenverein
SN	Schweizer Norm
w/z-Wert	Wassorzementwert

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage international

Die Baubranche zählt weltweit zu den ressourcenaufwendigsten Wirtschaftssektoren. Auch innerhalb der Europäischen Union (EU) ist der Bausektor für die Verwendung von rund 50 % aller geförderten Rohstoffe verantwortlich [1], [2]. Jährlich werden weltweit etwa 14,5 Mrd. m³ Beton verbaut. Das macht Beton zu einem der gegenwärtig am häufigsten verwendeten und wichtigsten Baustoffe [3]. Gleichzeitig ist dem Bausektor einer der massereichsten Abfallströme anzurechnen. Dieser ist für ca. 37 % der in der EU generierten Abfälle verantwortlich und besteht aus bis zu 64 % mineralischen Ursprungs. Das umfasst als Quellen neben Bau- und Abbruchtätigkeiten auch den Bergbau [4].

Unter Bau- und Abbruchabfälle fallen im Allgemeinen mineralische Abfälle (z.B. Bauschutt, Straßenaufbruch, Gleisschotter) und Aushubmaterial (z.B. Bodenaushub, Tunnelaushub, etc.), sowie in geringerem Ausmaß sonstige Abfälle (z.B. Kunststoffe, Metalle, Bau-/Abbruchholz) und gefährliche Abfälle (z.B. Asbest und PAK-haltige Abfälle) [5], [6]. EU-weit sind 55 % aller verwendeten Rohstoffe mineralischen Ursprungs (Stand 2023) [7]. Der Rohstoffbedarf wird, bedingt durch den steten Ausbau und Erhalt von Infrastruktur, in den kommenden Jahren weltweit weiter ansteigen [1].

Baurestmassen werden in der EU im Grunde schon zu großen Teilen aufbereitet und recycelt. So wird die von der Abfallrahmenrichtlinie (2008/98/EC) [8] vorgegebene Quote von 70 %, die für die Mitgliedsstaaten der EU gültig ist, von diesen auch weitestgehend erfüllt. Jedoch unterscheiden sich die Länder in der Art und Weise wie diese Ziele erreicht werden, da die Verwendung als Schüttung in unterschiedlichen Ausmaß Anwendung findet. Die rechtliche Lage zur Deponierung von Bau- und Abbruchabfällen ist national geregelt [9]. Als Vorreiter gelten die Niederlande, in denen die Deponierung von verwertbaren Baurestmassen bereits seit 1997 nicht mehr erlaubt ist [10], [11].

Um der bestehenden Rohstoff-, Energie-, und Klimakrise entgegenwirken zu können, hat sich die EU verpflichtet bis 2050 sich zu einer klimaneutralen, nachhaltigen und ressourceneffizienten Wirtschaft und Gesellschaft zu transformieren [12], [13], [14]. Einer der wichtigsten Bausteine dabei ist der neue **Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft** „für ein sauberes und wettbewerbsfähigeres Europa“ [2]. Dieser stellt kreislauffähige, ressourceneffiziente Produktionsprozesse, sowie die Nutzung von Sekundärrohstoffen und Recycling als wesentlichen Schwerpunkt dar. Die Sparte „Bauwirtschaft und Gebäude“ zählt hierbei zu den Bereichen, in denen einerseits die meisten Ressourcen genutzt werden und andererseits auch hohes Kreislaufpotenzial besteht. Eine der maßgebenden Strategien zur Förderung der geschlossenen Kreislaufwirtschaft in dieser Branche ist ebenfalls eine Einführung von Anforderungen an den Mindestgehalt an Rezyklat in bestehende Bauprodukten [2]. Des Weiteren wird die Veröffentlichung einer einheitlichen europäischen Strategie für eine nachhaltige bebaute Umwelt erwartet. Diese soll hinsichtlich der Implementierung von Prinzipien der Kreislaufwirtschaft im Bereich Gebäudedesign und Digitalisierung wegweisend sein [15]. Eine Überarbeitung der bestehenden EU-Abfallrahmenrichtlinie, hinsichtlich der stofflichen Verwertung von Bau- und Abbruchabfällen, ist ebenso

vorgesehen. Zudem ist die Implementierung von „Level(s)“, einem Berichts- und Bewertungsinstrument der EU-Kommission für nachhaltiges Bauen, bei der öffentlichen Auftragsvergabe denkbar [2].

1.2 Ausgangslage Österreich

Stoffströme im Baubereich stellen in Österreich mehr als 50 % des Ressourcenverbrauchs dar [15]. Der nationale Verbrauch an mineralischen Rohstoffen beträgt in etwa 95 Mio. Tonnen pro Jahr [16]. Hiervon werden etwa 35 Mio. Tonnen Gesteinskörnungen für die jährliche Produktion von etwa 11,6 Mio. m³ Beton verwendet (Stand 2021) [3]. Bis 2030 sollen gemäß der österreichischen **Kreislaufwirtschafts-Strategie** [17] der Anteil an Primärressourcen im Neubau insgesamt um 25% gesenkt werden.

Gleichzeitig fielen in Österreich im Jahr 2021 rund 12,5 Mio. Tonnen an Bau- und Abbruchabfällen an. Inklusive Aushubmaterial betrug der Anteil an Abfällen mineralischen Ursprungs im Jahr 2021 76 % des Gesamtabfallaufkommens. Verglichen mit dem Jahr 2015 stellt dies einen Anstieg um 41 % und für sonstige Bau- und Abbruchabfälle einen Anstieg um 25 % dar. Die aufkommenden Bau- und Abbruchabfälle stammen einerseits aus dem Hoch- und Tiefbau sowie von Instandhaltung und Sanierung. Die im Hochbau anfallenden Materialien umfassen vorwiegend Beton-, Ziegel- und Mauerwerksabbruch. Aushubmaterial fällt besonders bei Neubauten und im Tiefbau an. Das Aufkommen an Betonabbruch, der den größten Anteil an aufbereitetem Material ausmacht, betrug im Jahr 2021 etwa 4,2 Mio. Tonnen. Davon wurden 3,3 Mio. Tonnen aufbereitet, sowie ein geringer Teil deponiert. Aufbereitetes Material wird in Österreich hauptsächlich für Anwendungen im Straßenbau oder als Füllmaterial verwendet [18]. Es handelt sich hierbei um ein sogenanntes Open-Loop-Recycling. Eine darüberhinausgehende Strategie für den Ausbau der geschlossenen Kreislaufwirtschaft (Closed-Loop) im Betonbau, ergibt sich durch den Einsatz von hochwertiger rezyklierter Gesteinskörnung (rGK) [9], [11]. Dennoch wird die Recyclingquote laut Abfallrahmenrichtlinie (2008/98/EC) [8] in Österreich bereits um über 20 % übertroffen [9].

Der **Masterplan Rohstoffe 2030** [16] befasst sich in einem von drei Kernbereichen mit der Thematik „Umweltmanagement und Verringerung von Umweltauswirkungen“. Dies inkludiert auch die Gewinnung von natürlicher Gesteinskörnung, da der Abbau dieser Rohstoffe erhebliche Eingriffe in die Landschaft verursacht und dadurch die nationale Versorgungssicherheit stark beeinflusst. Beim Einsatz von Sekundärrohstoffen ist darauf zu achten, dass die Verwendung sowohl ökologisch als auch ökonomisch sinnvoll ist. Für diesen Zweck ist die Durchführung von Ökobilanzen empfohlen. Der Masterplan Rohstoffe 2030 [16] sieht ebenfalls vor, dass Materialien bevorzugt für eine höherwertigen Nutzung (Upcycling Prinzip) als einer Verwertung als Füllmaterial zuzuführen sind (Upcycling Prinzip).

Laut dem **Circularity Gap Report Austria 2019** [19] ist die österreichische Wirtschaft zu 9,7 % kreislauffähig. Eine wesentliche Verbesserung dieses Wertes wird laut dem Report in der Erhaltung des Bestands von Gebäuden und Infrastruktur gesehen. Dies erfordert den Bedarf an Baumaterial aus entstehenden Abrissen zu decken [19]. In diesem Zusammenhang ist für öffentlichen Ausschreibungen die verpflichtende Nutzung von Sekundärbaurohstoffen ein möglicher Ansatz zur Verbesserung. Ebenfalls wichtig ist die Berücksichtigung des Wiederverwendungspotentials bei Planung, Sanierung oder Abbruch von Gebäuden. Ein wesentliches Ziel des kreislauffähigen Bauens ist die Wiederverwendung von rezyklierten Materialien in einer ähnlichen oder

höheren Qualität [15]. Der Rahmen für die nationale Schwerpunktsetzung ist durch den europäischen **Aktionsplan Kreislaufwirtschaft 2020** [2] gegeben. Ziel ist eine Vorreiterrolle Österreichs bei der Entwicklung einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft zu schaffen. Durch eine effizientere Nutzung von Ressourcen soll das Erreichen der Klimaneutralität bis 2040 maßgeblich unterstützt werden. So verpflichtet sich Österreich bis 2030 den inländischen Materialverbrauch um 25 % zu senken (Vergleichsjahr 2018) und die Nutzungsrate wiederverwendbarer Stoffe um 35 % zu steigern (Vergleichsjahr 2020). Die Verfügbarkeit und Nutzung von Sekundärrohstoffen sind dabei essenzielle Punkte, um die Senkung des inländischen Materialverbrauchs und die Steigerung der Ressourceneffizienz zu erreichen [20]. In der Smart City Wien Rahmenstrategie „Die Wiener Strategie für eine nachhaltige Entwicklung“ [21] wird eine Reduktion des primären Ressourcenverbrauchs von 30 % bis 2030 und 50 % bis 2050 als Ziel definiert (Vergleichsjahr 2019). Auch die Verpflichtung zu zirkulärem Planen und Bauen ist ab 2030 als Ziel gesetzt [21], [22].

Das Institut für Bautechnik (OIB) hat in Form eines Grundlagendokuments 2023 die Richtlinie 7 „Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen“ in Planung. Diese regelt harmonisierte Kriterien für die Kreislaufwirtschaft im Bausektor, sowie konkretisiert die Grundanforderungen für zirkuläre Planung und Ausführung von Bauprojekten. Die Veröffentlichung der Richtlinie wird frühestens 2027 erfolgen und ist bis dahin ein verbindlicher Leitfadens [23]. Im Projektendbericht „KreislaufBAUwirtschaft“ [15] des Österreichischen Umweltbundesamts sind Grundsätze und Empfehlungen für die Umsetzung von Regularien in der Praxis vorgeschlagen.

Eine weitere Verbesserung der stofflichen Verwertung in Österreich kann durch Verwertungs-orientierten Rückbau und der Erhöhung des Anteils an Sekundärbaustoffen bei der Errichtung neuer Gebäude, erreicht werden. Hierfür ist die Entwicklung und Nutzung neuer Technologien und Geschäftsmodelle zielführend. Um auf nationaler Ebene eine nachhaltige Produktion zur gängigen Praxis zu machen, müssen gleichzeitig robuste Wirtschaftszweige für Kreislaufwirtschaft unterstützt und überbetriebliche Zusammenarbeit ausgebaut werden. Zudem muss Forschung und Innovation in diesem Bereich verstärkt werden [17].

Die Wiederverwendung von Betonabbruch in Form von Recyclingbeton (RB) stellt eine Möglichkeit dar, die Ressourcenschonung in der Baubranche zu steigern und einen erheblichen Teil der mineralischen Abfallmassen wieder in den Bausektor zurückzuführen und somit Stoffkreisläufe zu schließen. Unter der Voraussetzung kurzer Transportwege zwischen dem Abbruchort und der Neubau-Baustelle kann RB eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Alternative für Gesteinskörnung im konventionellen Beton darstellen [9].

Die Grenzwerte der nationalen Norm für Beton (ÖNORM B 4710 Anhang E [24]) lässt aufgrund hoher Qualitätsanforderungen nur geringe Austauschraten (siehe Kapitel 5.1) von natürlichen Gesteinskörnungen durch rGK zu. Um den Verbrauch von primären Rohstoffen zu reduzieren und das Kreislaufpotential von Beton wesentlich zu steigern, ist es notwendig Upcycling-Prinzipien bei der Verwertung von Betonabbrüchen zu fördern. Dies ermöglicht zulässige Austauschraten von Naturgesteinskörnung durch rGK zu erhöhen, ohne Downcycling zu betreiben. Hier ist darauf zu achten, dass die Produktion von hochqualitativen rGK ebenfalls mit der Herstellung von Recyclingfeinanteilen (RF) und rGK von minderer Qualität einhergeht. Eine Verwendung der rGK entsprechend ihrer Qualität ist dementsprechend essenziell [9].

Eine klare Verpflichtung zur Vermeidung, Wiederverwendung und Verwertung von Abfällen im Bausektor wurde über das Abfallrecht eingeführt. Mit Inkrafttreten der Änderung der Deponieverordnung [25] dürfen ab 01.01.2024 Abfälle, welche sich für Recycling und andere Formen der Verwertung eignen, nicht auf Deponien zur Ablagerung angenommen werden. Dies betrifft ebenfalls den Betonabbruch [26].

2 Ökologische Aspekte

Die Umweltperformance von Beton setzt sich aus verschiedenen Teilaspekten zusammen. Zu diesen gehören neben dem eigentlichen Betonherstellungsprozess, ebenfalls die Vorketten der benötigten Ökobilanz der eingesetzten Rohstoffe. Diese beinhalten Zement, Gesteinskörnung (natürlich oder rezykliert), Additive (z.B. Fließmittel und Luftporenmittel) sowie anderer Zuschlagsstoffe und deren zurechenbaren Emissionen durch Transportwege [3]. Je nach betrachtetem Indikator tragen diese Teilbereiche einen unterschiedlich großen Anteil. Während die meisten Indikatoren (u.a. Treibhauspotential, Versauerung und Energieverbrauch) vor allem durch die Zementproduktion beeinflusst werden, spielen Landnutzung und der abiotische Ressourcenverbrauch bei (natürlichen) Gesteinskörnungen die größte Rolle [27], [28]. Der Effekt einer Substitution des Primärmaterials mit einer rGK (Sekundärmaterial) ist somit für jeden Indikator separat zu quantifizieren. Der Energieaufwand und die damit verbundenen Umweltbelastungen für die Herstellung von rGK sind dabei durch die Transporte und den Energieaufwand der Aufbereitung geprägt. Sie liegen für die meisten Indikatoren in einer ähnlichen Größenordnung wie bei der Herstellung von natürlichen Gesteinskörnungen [29], [30].

Eine geringere Umweltbelastung durch den Beton beim Einsatz von rGK sind primär bei Rezepturen mit einem hohen ökologischen Impact der Gesteinskörnung vorhanden [31], [32]. Für Umwelt-Indikatoren, wie z.B. dem Treibhauspotential, sind die Vorteile gering bzw. vernachlässigbar, da das natürliche Material mit geringen Belastungen verbunden ist [3], [30]. Neben den (direkten) ökologischen Auswirkungen, welche durch die Unterschiede bei der Erschließung von natürlicher Gesteinskörnung und Produktion von rGK bedingt sind, muss im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung ebenfalls berücksichtigt werden, in wie fern das Gesamtsystem durch die Materialsubstitution beeinflusst wird. Dies inkludiert u.a. die Transportwege in der gesamten Prozesskette, die benötigte Menge an Zement pro m³ Beton sowie den Prozess der Entsorgung des Abbruchmaterials, welches beim Einsatz von natürlichen Gesteinskörnungen deponiert werden muss [28].

Verschiedene Berechnungen zeigen, dass umweltbezogene Vorteile beim Einsatz von rGK für die Betonherstellung vor allem hinsichtlich der Ressourcen- und Landnutzung gegeben sind. Das Optimierungspotenzial hinsichtlich dem Treibhauspotential ist hingegen bei den bisher etablierten Methoden der Substitution vernachlässigbar.

3 Aktuelle Herausforderungen

Etliche Herausforderungen stehen derzeit einer hochwertigen Wiederverwendung von Betonabbruch in Form von Recyclingbeton (RB) im Hochbau in Österreich und International entgegen:

Wissenschaftlich und technische Herausforderungen:

- Mangel an Wissen, Erfahrung und ausgebildeten Fachkräfte bezüglich RB [9], [33], [34];
- Genereller Mangel an Forschung zu RB [33], [35];
- Langsam fortschreitende Innovation [35];
- Kompatibilität mit traditionellen Herstellungsmethoden [35];
- Notwendige Anpassung der Betonrezepturen in Abhängigkeit des Recyclingmaterials und der Verwendung von innovativen Behandlungsmethoden von rezyklierte Gesteinskörnung (rGK) [9];
- Heterogene Materialbeschaffenheit führt zu unterschiedlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften [9];
- Erhöhte Wasseraufnahmefähigkeit und Rohdichte sowie kantige Kornform führen zur Qualitätsminderung von RB [9];
- Notwendige Investitionen in moderne Recyclinganlagen und Produktion fehlen [9], [36];
- Fehlende Anwendungsbereiche für anfallende Feianteile [9];
- Indikatoren zur Überwachung der Umweltverträglichkeit der Produktion sind verbesserungswürdig [9];
- Etablierung effizienter und ökonomisch sinnvoller Aufbereitungsprozesse der Baurestmasse zur Entfernung von Stör- und Schadstoffen [37].

Ökonomische Herausforderungen:

- Anfallende Kosten für die hochwertige Aufbereitung von Bauabfällen und Qualitätssicherung des hergestellten Materials [9], [33];
- Konkurrierende Märkte: einfache und etablierte Arbeitsweise mit natürlichen Gesteinskörnungen oder Verwendung von rGK im Straßenbau [9], [34], [35];
- Geringe Nachfrage sowie Angebot [33], [35];
- Zeitlich und lokale unbeständige Verfügbarkeit [33], [34];
- Schaffen von Steueranreizen oder Subventionen zur Förderung der Herstellung von RB [33], [34];
- Fehlende Nachhaltigkeitszertifizierung für die Verwendung von Recyclingmaterial [34], [38];
- Zusätzlicher Lagerplatz benötigt [38].

Soziale Hemmnisse:

- Mangelnde Behandlung von Nachhaltigkeit in Lehre auch in Bezug auf Rückbau und Recycling von Baustoffen [33];
- Fehlendes Bewusstsein über Umweltbelastung rund um die Betonherstellung und über die Existenz von RB [9], [34], [35];
- Bedenken zur Qualität und Sicherheit der Materialien, ebenfalls in Bezug auf gesundheitliche Auswirkungen [9], [35];
- Mangel an Qualitäts-Zertifikaten [35].

Rechtliche und politische Hemmnisse:

- Keine Förderungen bezüglich der Verwendung von RB in öffentlichen Ausschreibungen, die einen großen Anteil an Bauvorhaben ausmachen [36], [38];
- Handlungsunsicherheit bezüglich Regulierungen [33], [34], [35];
- Teilweise inkonsistente Vorschriften [33], [36];
- Unterschiedliche nationale Regulierung, Klassierung und Zertifizierung [9], [33];
- Regulierungen sind auf lineare Wiedergewinnung ausgelegt [9].

4 Technisch-wissenschaftliche Grundlagen

Aus technischer und wissenschaftlicher Sicht stellt die Rezyklierung von mineralischer Baurestmasse eine Herausforderung dar. Unter der Bezeichnung „rezyklierte Gesteinskörnung“ (rGK) versteht man jenes Produkt, welches aus der Aufbereitung von mineralischer Bau- und Abbruchabfälle entsteht [9]. Mineralische Bau- und Abbruchabfälle umfassen Betonabbruch, Bitumen/Asphalt und Gleisschotter [5], [6]. Der vorliegende Bericht zum Stand der Technik befasst sich mit der der Behandlung von sortenreinem Betonbruch. In Kapitel 6 werden die Aufbereitungsschritte näher erläutert.

Bei der Aufbereitung von Betonbruch entstehen Produkte, welche sowohl Naturgesteinskörnungen des Urbetons, als auch die umliegende erhärtete Zementmatrix (Zementstein) beinhalten [39]. In der mikroskopischen Darstellung (Abbildung 1 links) werden die Komponenten einer rGK anhand des Querschnittes ersichtlich.

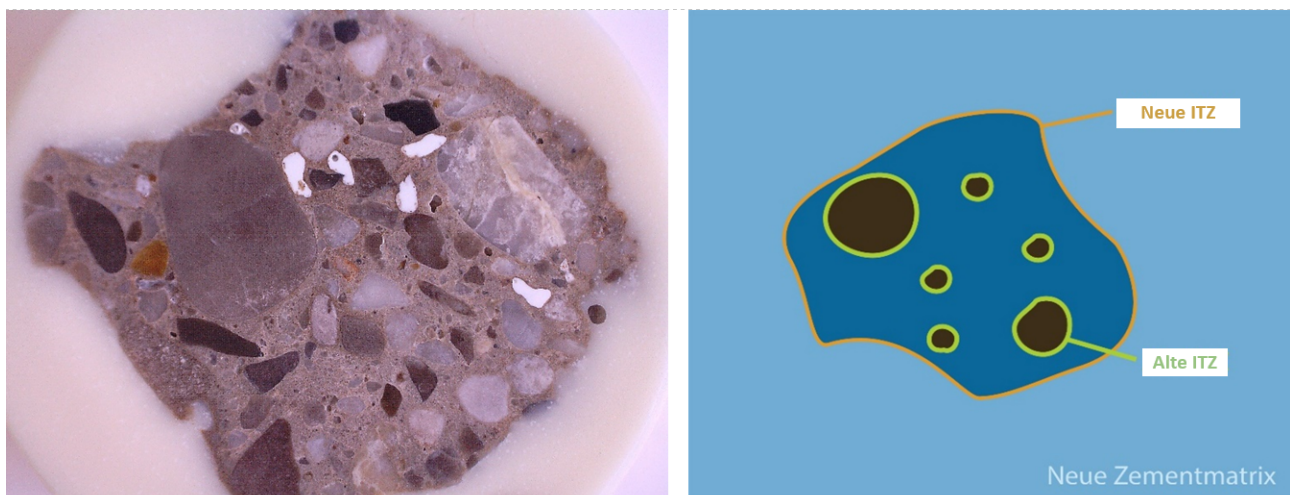


Abbildung 1: Darstellung der Interfacial Transition Zone ITZs in rezyklierter Gesteinskörnung

Der anhaftende Zementstein weist eine erhöhte Wasseraufnahmefähigkeit auf, welche durch seine erhöhte Porosität bedingt ist. Neben dieser sind Mikrorisse, welche während der mechanischen Aufbereitung der Baurestmasse induziert werden, sowie generierte Grenzflächen zwischen Naturgesteinskörnung und dem Zementstein des Urbetons, ebenfalls für eine erhöhte Wasseraufnahmefähigkeit verantwortlich. In der Fachliteratur wird besagte Grenzfläche als Interfacial Transition Zone (ITZ) bezeichnet [39].

Die ITZ entsteht durch eine Anlagerung von feinen Zementpartikeln an das Aggregat, wodurch gleichzeitig eine daran anliegende Zone entsteht, in der kaum feine Zementpartikel vorhanden sind („Wandeffekt“). Diese Auftrennung von Zementpartikeln findet man bei RB am natürlichen Aggregat und an rGK. Daher entstehen mehrere ITZ in RB und eine resultierende höhere Wasseraufnahmefähigkeit ist zu erwarten [39], [40]. Die Entstehung von weiteren ITZ in RB ist in Abbildung 1 rechts zu sehen. Durch die erhöhte Porosität und resultierende gesteigerte Wasseraufnahmefähigkeit wird der Wasser/Zement-Wert (w/z-Wert) lokalisiert

beeinflusst. An dieser Stelle wird auf den Projektbericht zum Stand der Wissenschaft, welcher im Rahmen von UP!crete entstanden ist, für nähere Informationen verwiesen.

Zur Nutzung und Steigerung der Qualität von rGK in Beton, müssen gemäß des Policy Report des EU Joint Research Centers [41] folgende Qualitätskriterien erfüllt sein:

- **Kornform:** Kubische Körner werden aufgrund der besseren Verarbeitbarkeit des zu mischenden Betons bevorzugt
- **Physikalische und mechanische Eigenschaften:** Die rGK sollen niedrige Wasseraufnahmefähigkeit und hohe Festigkeit und Steifigkeit aufweisen
- **Partikelgrößenverteilung:** Ein minimaler Hohlraumgehalt der rGK Sieblinien ist anzustreben
- **Kontaminationen:** Kontaminationen (u.a. Schad- und Störstoffe) sollen gemäß Recycling-Baustoffverordnung eingehalten werden (siehe Kapitel 5.1). Ebenso soll der Ziegel- und Feinanteil niedrig gehalten werden

Nach aktuellem Stand der Technik, bedarf der Einsatz von rGK für eine Betonrezeptur, einen erhöhten Zementanteil, um konstante mechanische Festigkeiten zu gewährleisten. Dadurch werden Betone mit konstanten mechanischen Eigenschaften und steigendem rGK-Anteil aufgrund des erhöhten Zementbedarfs ökologisch negativer [9]. Abhilfe schafft die Verwendung von Fließmittel zur Verbesserung der Eigenschaften und Einstellung des gewünschten w/z-Wertes [42]. Dies steigert jedoch die Kosten sowie das Global Warming Potential (GWP) der betrachteten Rezeptur. Es bedarf daher an Forschung, welche sich der Verbesserung der Eigenschaften von rGK widmet. Ein positiver Aspekt der rGK liegt in der lokalen Verfügbarkeit. Durch den Einsatz von rGK können ebenfalls Kosteneinsparungen durch die Verringerung der Transportwege erlangt werden [9].

Neben dem herkömmlichen Recycling von Baurestmassen, bei dem eine Zerkleinerung und Reinigung des Materials im Vordergrund steht, wird in einigen Fällen auch eine weitergehende Aufbereitung beziehungsweise Behandlung der gewonnenen Gesteinskörnung durchgeführt. Zu diesen weiteren Schritten zählt neben der Entfernung von Zementstein auch die Behandlung der rGK zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften [43].

Um den Materialkreislauf zu schließen, streben einige Produzenten den erneuten Einsatz der zementsteinreichen Feinfraktion aus der Baurestmassenaufbereitung als Rohstoff in der Zementherstellung an. Dadurch werden Materialkreisläufe geschlossen, während die CO₂-Bilanz des eingesetzten Betons verbessert werden kann [44], [45], [46]. Ein anderer Ansatz für die Verwendung der Feinfraktion wäre das Pelletisieren. Dadurch erhält man ein künstliches Aggregat, welches vergleichbar mit einer leichten Gesteinskörnung ist [47].

Ein Beispiel einer Methode zur Verbesserung der Eigenschaften von rGK, welche bereits global im industriellen Maßstab durchgeführt wird, ist die Karbonatisierung unter kontrollierten Bedingungen. Die Möglichkeit dieser Implementierung wurde auch im Rahmen des Projekts FastCarb in Kooperation mit französischen Zement- und Baustoffherstellern gezeigt [48]. Eine Karbonatisierung des Materials wird hierbei von einigen internationalen Akteuren angestrebt, um zusätzlich zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften, auch den anfallenden CO₂-Ausstoß von Industrien zu senken. Darüber hinaus kann durch diesen Prozess das Schließen von weiteren Stoffkreisläufen ermöglicht werden [45], [49]. Hierbei ist die Menge an gespeicherten CO₂ von

mehreren Faktoren abhängig. Es zeigt sich, dass feine rGK Fraktionen, unter identen Bedingungen, das beste Potential zur CO₂ Speicherung vorweisen [48]. Die Anwendung der Karbonatisierung ist demnach nicht auf grobe rGK beschränkt, sondern deckt ein breiteres Anwendungsfeld ab. Es ist festzuhalten, dass Feinanteile, Betonfertigteile und Transportbetone von unterschiedlichen Anbietern mit CO₂ behandelt werden [50], [51]. Der behandelte Feinanteil des Baurestmassenrecyclings kann so als alternatives und zementfreies Bindemittel eingesetzt werden, oder als Zusatz in Zementen Verwendung finden [44], [52], [53]. Des Weiteren findet die Karbonatisierung auch bei der Produktion von Zementersatz und Zumahlstoffen, welche z.B. aus Schlacken der Stahlerzeugung gewonnen werden, Anwendung [54], [55], [56]. Auch Betonbausteine werden unter Verwendung von Schlacken der Stahlindustrie als Alternative zur natürlichen Gesteinskörnung, oder mit alternativen Bindemittel mit anschließender Karbonatisierung, hergestellt [57], [58], [59], [60]. Gegenwärtig arbeiten international viele Zement- und Baustoffhersteller, teilweise unabhängig oder in Kooperationen, an der Weiterentwicklung und Implementierung der Karbonatisierung von rGK mit CO₂ aus Industrieprozessen [45], [49], [61]. Im Europäischen Raum ist besonders das ETH Spin-off Neustark an mehreren Standorten mit unterschiedlichen Partnern an der Karbonatisierung von rGK beteiligt [62]. Dabei konnten verschiedenste Anlagentypen umgesetzt werden. Sowohl mobile Speicheranlagen als auch stationäre Anlagen, welche in Silos, Reihendoseuren oder Materialboxen integriert wurden. Weiters existieren erfolgreich umgesetzte Bauprojekte in Österreich mit Holcim in der Schweiz und Salzburg Wohnbau (siehe Kapitel 5) [63], [64]. Neustark setzt auf die Verwendung von CO₂ aus Biogasanlagen, während andere Firmen für ihre Karbonatisierungsverfahren auf die Abgase der Zementproduktion zurückgreifen [45], [56], [65].

Weitere Methoden zur Verbesserung der Eigenschaften von rGK und der damit verbundenen Verbesserung von Recyclingbetonen, umfassen unter anderem die Vorbehandlung mit Nanosilika-Lösungen oder Silikastäuben und die Zugabe von Kompositmaterial (Puzzolane, Flugasche, granuliert Hochofenschlacke, etc.). Neben diesen Methoden werden auch zwei- oder mehrstufigen Mischprozesse sowie eine Kombination dieser Methoden durchgeführt [43]. Eine Umsetzung im größeren Maßstab konnte jedoch nicht bestätigt werden, daher sei an dieser Stelle auf den Stand der Wissenschaft verwiesen.

5 Rechtliche Rahmenbedingungen: Nationale und Internationale Normenlage

5.1 Aktuelle Entwicklungen Recyclingbaustoffe in Österreich

In Österreich lassen sich in den letzten Jahren bedeutende Entwicklungen beobachten, welche die Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung (rGK) in Recyclingbeton (RB) ermöglichen. Zu den Relevantesten zählen unter anderem die 2016 durch das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft verordnete **Recycling-Baustoffverordnung** [66]. Hierbei werden Verpflichtungen bei Bau- und Abbruchtätigkeiten, Qualitätsbestimmungen zur Herstellung, Verwendung sowie bei dem Abfallende von Recycling-Baustoffen festgelegt [67]. In Kapitel 6 wird im Abschnitt „Umgang mit Schad- und Störstoffen“ näher auf diese eingegangen.

Normativ zählt die Novellierung der **ÖNORM B 4710-1** [24] im Jahr 2018 und deren Erweiterung durch **Anhang E** „Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen gemäß ÖNORM 3140“ als eine der wichtigsten normativen Entwicklungen. Die damit in Verbindung stehende **ÖNORM B 3140** [68], welche relevante Mindestanforderungen für die Verwendung von rGK festlegt, wurde 2016 herausgegeben.

Weitere nennenswerte Werke rund um den Umgang mit Baurestmassen sind die von dem Österreichischen Institut für Bautechnik veröffentlichten OIB-Richtlinien. Insbesondere die **OIB Richtlinie 7** [23] umfasst die Grundanforderungen zur nachhaltigen Nutzung von natürlichen Ressourcen in Bauwerken bezogen auf den gesamten Lebenszyklus. Der **Bundes-Abfallwirtschaftsplan (BAWP)** 2023 [6] beinhaltet die Anforderungen zur Verwendung von Rückständen aus Abfallverbrennungsanlagen als Tragschicht und Gesteinskörnung für Beton. Für die Verwendung von Rückständen in Beton ist ein maximaler Anteil von 20 % erlaubt, wobei die festgelegten Grenzwerte abhängig von der Austauschrate sind.

Die Mindestanforderungen, die zur Verwendung von rGK in RB gestellt sind, werden in ÖNORM B 4710-1 Anhang E [24], ÖNORM EN 12620 [69], ÖNORM B 3131 [68], ÖNORM B 3140 [70], sowie in der RBV [71] dargestellt. In *Tabelle 1* wird eine Übersicht der relevanten Normen geschaffen. Weiters dienen folgende nationale Verordnungen bzw. Gesetze als Regelungen unter anderem zur Beseitigung, Behandlung und Deponierung von Baurestmassen:

- Recycling-Baustoffverordnung (RBV, BGBl. II Nr. 181/2015) [71]
- Abfallwirtschaftsgesetz (AWG, BGBl. I Nr. 102/2002) [72]
 - Zusätzliche Veröffentlichung des Bundes-Abfallwirtschaftsplan alle sechs Jahre
- Altlastensanierungsgesetz (ALSAG, BGBl. Nr. 299/1989) [73]
- Abfallnachweisverordnung (ANV, BGBl. II Nr. 341/2012) [74]
- Abfallverzeichnisverordnung (AVV, BGBl. II Nr. 409/2020) [75]
- Deponieverordnung (BGBl. II Nr. 39/2008) [25]
- Festsetzungsverordnung gefährlicher Abfälle (BGBl. II Nr. 227/1997) [76]

Tabelle 1: Zusammenfassung aller relevanten österreichischen Normen zu den Anforderungen und der Verwendung von rGK in Beton

ÖNORM	Titel der ÖNORM	Kurzbeschreibung
ÖNORM B 4710-1 (Anhang E)	Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität	Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206; Anhang E: Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung gemäß ÖNORM B 3140; Anforderungen an Fraktionen und Gemische in Bezug auf Expositionsklasse / Kurzbezeichnung; Austauschraten für natürliche Gesteinskörnungen durch rGK; Inklusive Berechnungsbeispiele.
ÖNORM EN 12620	Gesteinskörnungen für Beton	Nationale Bestimmung der harmonisierten EN 12620; Festlegung der Mindestanforderungen (Geometrisch, Physikalisch sowie Chemisch) und Kennzeichnung für rGK. Festlegung der Prüfverfahren mit Normverweis; Klassifizierung der Bestandteile von rGK; Anhang G: Auswirkungen chemischer Bestandteile; Anhang H: Festlegung Prüfhäufigkeiten.
ÖNORM B 3131	Gesteinskörnungen für Beton - Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 12620	Anwendung der ÖNORM EN 12620; Mindestprüfhäufigkeit gemäß ÖNORM EN 12620 Anhang H.
ÖNORM B 3140	Rezyklierte Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Anwendungen sowie für Beton	Anwendung der ÖNORM EN 12620; Bautechnische Anforderungen, Umweltverträglichkeit; Anhang B: Anforderungen Umweltverträglichkeit von rGK; Prüfparameter und Grenzwerte für Qualitätsklassen.
ÖNORM EN 933	Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen Teil 11: Einteilung der Bestandteile grober recycelter Gesteinskörnung	Übernommene EN 933; Klassifizierung der Bestandteile grober rGK
ÖNORM EN 1744	Prüfverfahren für chemische Eigenschaften von Gesteinskörnungen Teil 1: Chemische Analyse	Übernommene EN 1744; Teil 1: Bestimmung des Sulfatgehalts von rGK. Teil 6: Bestimmung des Einflusses wasserlöslicher Bestandteile aus rGK auf den Erstarrungsbeginn des Zements. Berücksichtigung anorganischer Verunreinigungen.

5.2 Europäische Rahmenbedingungen zum Thema Recyclingbaustoffe

Zusätzlich gelten auf europäischer Ebene die Bauprodukteverordnung (EU-Verordnung 305/2011) [77] sowie die Abfallrahmenrichtlinie (EU-Richtlinie 2008/98/EG) [8].

Bereits seit 2011 ist die „Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen“ in der **EU-Bauprodukteverordnung** [77] in einer Grundanforderung vorgegeben. Die Wiederverwertung und die Rezyklierung eines Bauwerkes, sowie seinen Baustoffen und -teilen muss möglich sein. Ebenso muss die Umweltverträglichkeit der eingesetzten Rohstoffe und Sekundärbaustoffe des Bauwerks gegeben sein.

Die **Abfallrahmenrichtlinie** [8] umfasst relevante Rahmenbedingungen hinsichtlich des Umganges mit Abfällen innerhalb der EU. Die darin festgelegte Abfallhierarchie schafft im Wesentlichen eine Priorisierung der Behandlungsoptionen des Abfalls wie in Abbildung 2 dargestellt. Hierbei steht die Vermeidung an erster Stelle, gefolgt von der Vorbereitung zur Wiederverwendung, der Rezyklierung, sonstige Verwertungsmethoden (z.B. energetische Verwertung) und zuletzt die Beseitigung des Abfalls. Weiters werden Zielvorgaben definiert, welche bis zum Jahr 2020 zu erfüllen waren. Es werden Mindestmengen zur Vorbereitung zur Wiederverwendung, Rezyklierung sowie sonstiger stofflicher Verwertung für nicht-gefährliche Bau- und Abbruchabfälle definiert. Unter sonstiger stofflicher Verwertung wird die „Verfüllung, bei der Abfälle als Ersatz für andere Materialien genutzt werden“ definiert [8]. Die Mindest-Recyclingquote für Bau- und Abbruchabfälle wird hierbei auf 70 Gewichtsprozent festgelegt, wobei Österreich dieses Ziel mit 90 % Prozent (Stand 2018) erreicht [78].



Abbildung 2: Darstellung der Abfallhierarchie gemäß Abfallrahmenrichtlinie [8]

5.3 Normative Festlegungen zur Verwendung von Rezyklierten Gesteinskörnungen in Recyclingbeton

Aus *Tabelle 2* können die Materialbezeichnungen von verschiedenen rezyklierten Gesteinskörnungen gemäß ÖNORM 3140 [70] entnommen werden.

Tabelle 2: Materialbezeichnung verschiedener rGK gemäß ÖNORM B 3140

Bezeichnung	Beschreibung
RA	Rezykliertes gebrochenes Asphaltgranulat
RAB	Rezykliertes gebrochenes Asphalt-Beton-Mischgranulat
RB	Rezykliertes gebrochenes Betongranulat
RG	Rezykliertes Granulat mit einem Masseanteil von mindestens 50 % Gestein (natürliches und/oder rezykliertes) sowie allenfalls Beton und/oder Asphalt
RM	Rezykliertes gebrochenes Mischgranulat mit einem Masseanteil von maximal 50 % Gestein (natürliches und/oder rezykliertes) sowie Beton und/oder Asphalt
RH	Rezyklierter Hochbausand, rezyklierter Hochbausplitt
RHZ	Rezyklierter Hochbauziegelsand, rezyklierter Hochbauziegelsplitt
RMH	Rezyklierte mineralische Hochbaurestmassen
RS	Recyclingsand
RZ	Rezyklierter Ziegelsand, rezyklierter Ziegelsplitt

Die Materialien sind zur Verwendung gemäß ÖNORM EN 12620 [69] durch Zusatzbezeichnungen zu klassifizieren. Die Kategorisierung erfolgt gemäß *Tabelle 2* der ÖNORM B 3140 [70] aus der stofflichen Zusammensetzung. Die unterschiedenen Bestandteile sind in *Tabelle 3* ersichtlich. Das Prüfverfahren zur Bestimmung der Bestandteile in groben rGK wird in ÖNORM EN 933-11 [79] abgedeckt. Daraus ergeben sich folgende Materialbezeichnungen: RB-A1, RB-A2, RG-A3, RH-B und RM-C.

Tabelle 3: Klassifizierung der Bestandteile von grober rGK nach ÖNORM EN 12620 und ÖNORM EN 933-11

Bezeichnung	Beschreibung
Rc	Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauersteine aus Beton
Ru	Ungebundene Gesteinskörnung, Naturstein, hydraulische gebundene Gesteinskörnungen
Rb	Mauerziegel (d.h. Mauersteine und Ziegel), Kalksandsteine, nichtschwimmender Porenbeton
Ra	Bitumenhaltige Materialien
Rg	Glas
FL	Schwimmendes Material, als Volumenanteil angegeben
X	Sonstige Materialien (bindige Materialien (Ton und Böden), verschiedene Materialien (Metalle, nichtschwimmendes Holz, Kunststoff und Gummi, Gips)

In Anhang E der ÖNORM B 4710-1 [24] werden auf Basis von Erfahrungswerten in Österreich Regelungen zur Verwendung von rGK der Typen RB-A1, RB-A2, RG-A3 und RH-B in Beton aufbauend auf der ÖNORM B 3140 [70] ergänzt. Bei einem Anteil > 5 % der Masse der Gesamtgesteinskörnung ist der Beton durch Angabe der rGK gemäß ÖNORM B 3140 [70] zu klassifizieren. Zulässige Einsatzgebiete und Verwendungsverbote für die Verwendung von rGK sind entsprechend der RBV [71] einzuhalten. Die gleichzeitige Verwendung verschiedener Typen von rGK ist unzulässig. Weiters gelten gemäß ÖNORM B 4710-1 Anhang E [24] für die rGK der Typen RB-A1, RB-A2 und RG-A3 folgende Bestimmungen:

- Nicht zugelassen für vorgespannte Bauteile
- Nicht zugelassen für ermüdungsgefährdete Bauteile
- Festigkeitsklasse < C40/50
- Bauteile ohne treibende Angriffe (XAT)
- Geringer Alkalieintrag und Durchfeuchtung

Für die Verwendung von RH-B sind zusätzlich folgende Punkte angesichts des Einsatzes einzuhalten:

- Anwendung im Trockenen
- Festigkeitsklasse < C30/37
- Bauteile, die vorwiegend Druckbelastungen ausgesetzt sind.

Die Verwendung von feinen rGK als Zuschlag in RB ist lt. ÖNORM B 4710-1 Anhang E [24] nach nasser Aufbereitung möglich. Für Gesteinskörnungen mit einer Korngröße kleiner als 0,063 mm ist der Gesamtanteil auf 3 % der Masse zu limitieren. Die Mindestanforderungen an rGK werden für unterschiedliche Expositionsklassen in Tabelle E.1 bzw. für unterschiedliche Betonsorten in Tabelle E.2 der Norm dargelegt.

Die Austauschrate beschreibt den Masseanteil in % von natürlichen Gesteinskörnungen durch rGK. Die Grenzwerte werden in den Tabellen E.3 und E.4 der ÖNORM B 4710-1 [24] in Abhängigkeit der Expositionsklassen bzw. Betonsorten aufgelistet. Der Austausch von natürlichen GK mit rGK ist nur innerhalb der jeweiligen Korngruppe, sofern der Korngrößenbereich gedeckt ist, möglich. Zusammenfassend werden in *Abbildung 3* und *Abbildung 4* die Austauschraten in Bezug auf die jeweilige Expositionsklasse bzw. Betonkurzbeschreibung dargelegt.

Verpflichtungen gemäß Recycling-Baustoffverordnung

Folgende Verpflichtungen sind gemäß RBV [71] einzuhalten:

- Die Herstellung von Recyclingbaustoffen darf lediglich aus vordefinierten Abfallarten durchgeführt werden
- Schad- und Störstofferkundungen:
 - Abfallmengen > 750 t unterliegen einer orientierenden Schad- und Störstofferkundung gemäß ÖNORM B 3151 [80]
 - Bei Abfallmengen > 750 t und einem Bruttoreaminhalt > 3500 m³ hat eine Schad- und Störstofferkundung gemäß ÖNORM EN ISO 16000-32 [81] durch eine extern befugte Fachperson zu erfolgen
 - Abfallmengen < 750 t: Schad- und Störstofferkundung ist nicht verpflichtend. Eine freiwillige Erkundung wird empfohlen.
 - Schadstoffe (z.B. Asbestzement, asbesthaltige Abfälle, teerhaltige Abfälle, PCB-haltige Abfälle, phenolhaltige Abfälle und (H)FCKW-haltige Dämmstoffe oder Bauteile)
- Verwertungsorientierter Rückbau gemäß ÖNORM B 3151 [80] inkl. Dokumentation bei Abfallmengen > 750 t
- Trennpflicht bei Bau- und Abbruchtätigkeiten von gefährlichen und nicht gefährlichen Komponenten
- Erfüllung der Qualitätsanforderungen an rezyklierte Gesteinskörnung zur Qualitätssicherung

Relevante Qualitätsklassen und Anwendungsbereiche gemäß der RBV [71] sind in *Tabelle 4* dargestellt. Für rGK gemäß ÖNORM EN 12620 [69] bzw. ÖNORM B 3140 [70] sind die Qualitätsklassen U-A, U-B, U-E und H-B erlaubt. Die Einteilung in Qualitätsklassen ist auch in der RBV [71] geregelt und erfolgt über chemische ermittelte Parameter. Dies umfasst sowohl Eluatwerte als auch Gesamtgehalte. Die Bestimmung der Parameter erfolgt gemäß ÖNORM EN 1744 [82].

Da zum gegenwärtigen Zeitpunkt ein Großteil der Recyclinggesteinskörnung für den Straßenbau verwendet wird, ist die Bezeichnung nach ÖNORM EN 13242 [83] verbreitet. Für die Verwendung in Beton ist die ÖNORM EN 12620 [69] die relevante Regelung. Je nach Norm unterscheidet sich die Kennzeichnung des Materials.

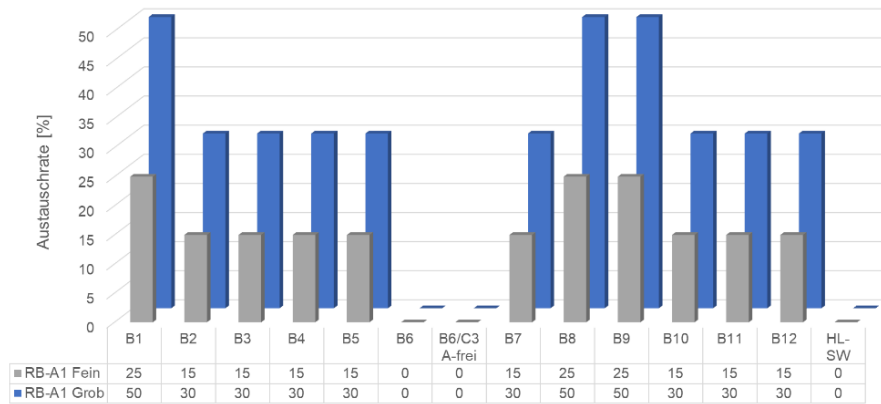
Die Materialbezeichnung, die nach beiden Normen anzugeben ist, ergibt sich aus den Bestandteilen (siehe *Tabelle 2* und *Tabelle 3*). Die Angabe der unteren und oberen Korngröße (d/D) und die Qualitätsklasse (siehe *Tabelle 4*) sind für beide Normen ident. Die Kennzeichnung für Material, hergestellt nach ÖNORM EN 13242 [83] beinhaltet zudem eine anwendungsspezifische Bezeichnung: die Güteklasse (S, I, II, III, IV) und die U-Klasse (U1-U11).

Das Abfallende wird gemäß RBV [71] vor allem für Recycling-Baustoffe, welche in die Qualitätsklasse U-A fallen, nach der Übergabe des Herstellers an einem Abnehmer definiert. Dies ist als Maßnahme im Sinne der Qualitätssicherung anzusehen, um Umweltrisiken zu minimieren und die Qualität des Produktes aufrecht zu erhalten.

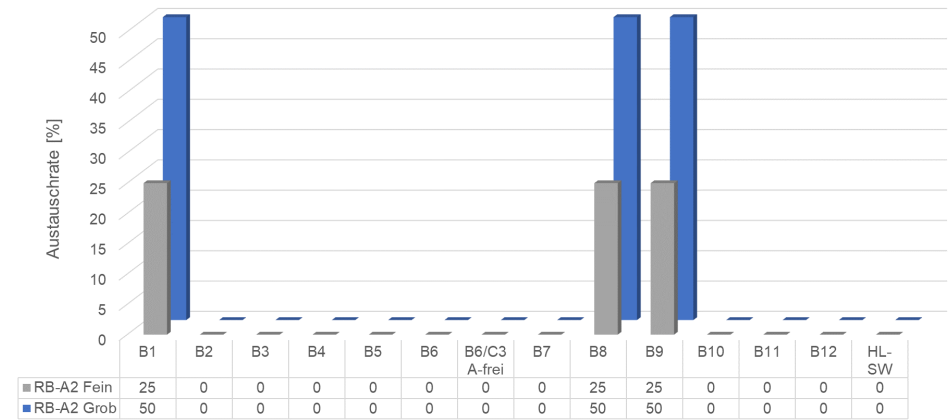
Tabelle 4: Relevante Qualitätsklassen nach Anhang 2 der RBV

Qualitätsklasse		Anwendungsbereich
Ungebunden	U-A U-B	Gesteinskörnungen für den ungebundenen sowie für den hydraulisch oder bituminös gebundenen Einsatz
	UE	Gesteinskörnungen zur Verwendung im Trapez des Gleiskörpers oder in Verkehrsflächen gemäß § 13 Z 4 sowie für den hydraulisch oder bituminös gebundenen Einsatz
Hydraulische Bindung	H-B	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
Bituminöse Bindung	B-C B-D	Gesteinskörnungen (insbesondere Ausbauasphalt), die ausschließlich zur Herstellung von Asphaltmischgut oder zur Herstellung einer ungebundenen oberen Tragschicht gemäß § 13 Z 9 verwendet werden

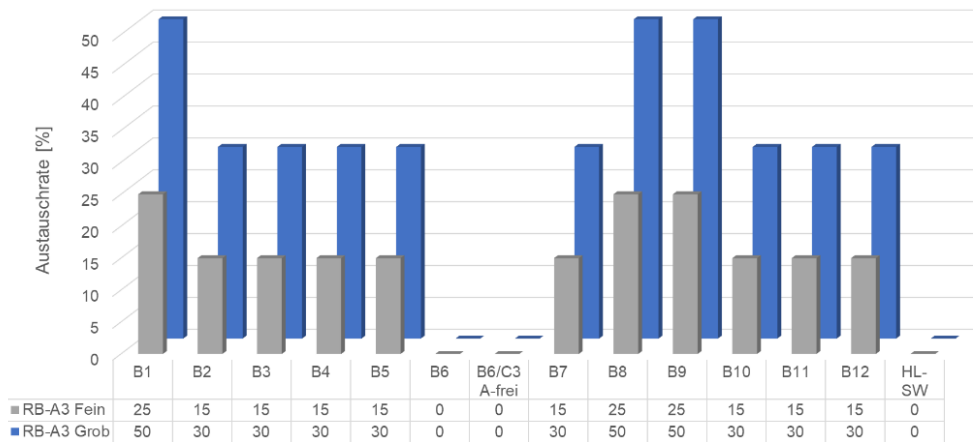
RB-A1 - Grenzwerte für den Austausch von natürlichen GK durch R-GK in Abhängigkeit der Betonkurzbeschreibung gemäß Tabelle E.4



RB-A2 - Grenzwerte für den Austausch von natürlichen GK durch R-GK in Abhängigkeit der Betonkurzbeschreibung gemäß Tabelle E.4



RB-A3 - Grenzwerte für den Austausch von natürlichen GK durch R-GK in Abhängigkeit der Betonkurzbeschreibung gemäß Tabelle E.4



RH-B - Grenzwerte für den Austausch von natürlichen GK durch R-GK in Abhängigkeit der Betonkurzbeschreibung gemäß Tabelle E.4

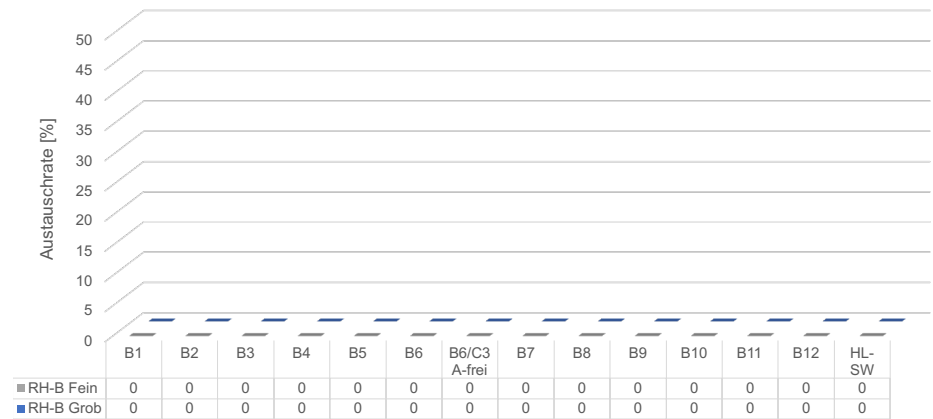
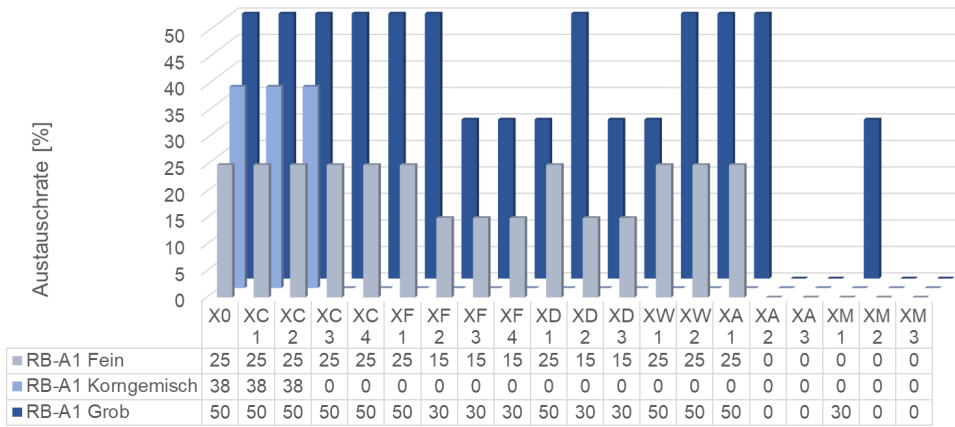
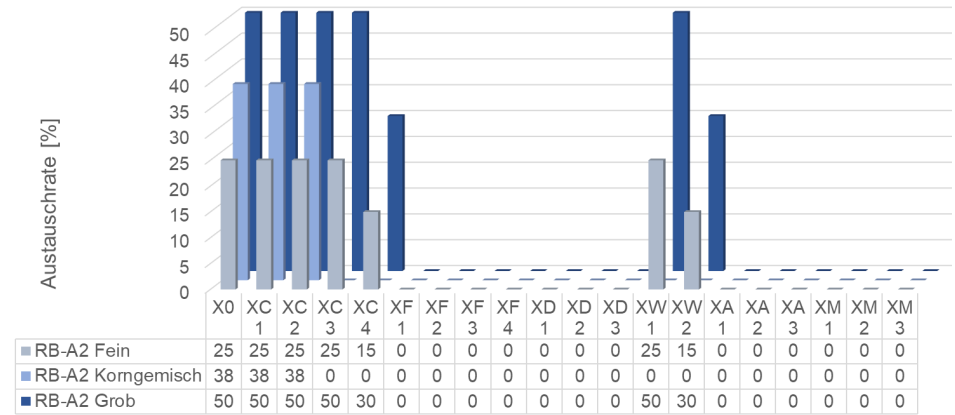


Abbildung 3: Grenzwerte für die Austauschraten von natürlichen Gesteinskörnung mit rGK mit Bezug auf die Betonkurzbeschreibung

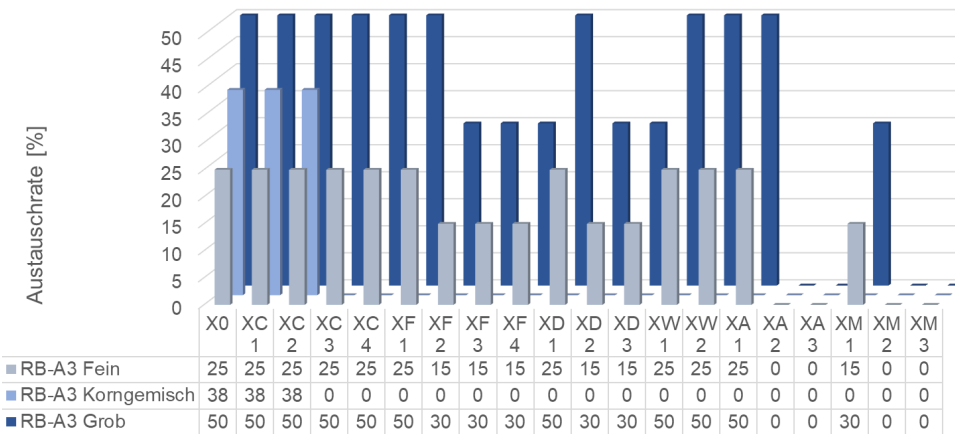
RB - A1 - Grenzwerte für den Austausch von natürlichen GK durch R-GK gemäß Tabelle E.3



RB-A2 - Grenzwerte für den Austausch von natürlichen GK durch R-GK gemäß Tabelle E.3



RB-A3 - Grenzwerte für den Austausch von natürlichen GK durch R-GK gemäß Tabelle E.3



RH-B - Grenzwerte für den Austausch von natürlichen GK durch R-GK gemäß Tabelle E.3

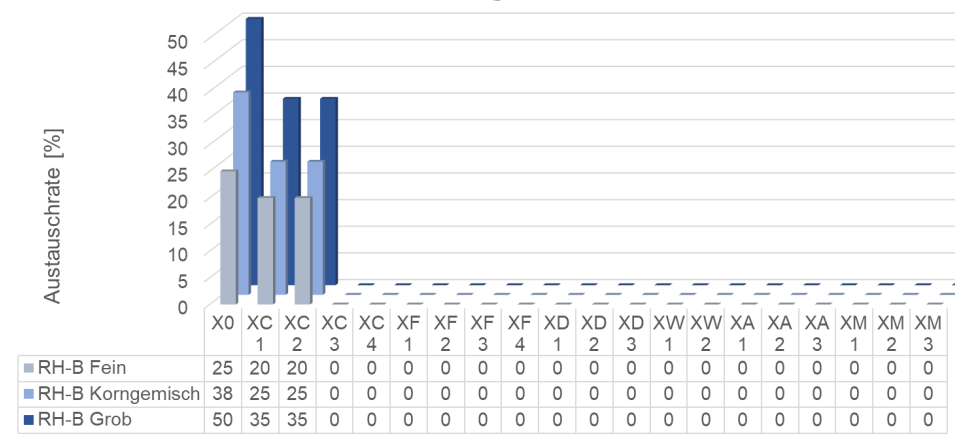


Abbildung 4: Grenzwerte für die Austauschraten von natürlicher Gesteinskörnung mit rGK mit Bezug auf die Expositionsklasse

Rechtliche Lage: Deutschland

In Deutschland gelten für den Einsatz von rGK die DIN EN 12620 [84] sowie die Normen zur Umsetzung dieser (DIN 4226-101 [85] und DIN 4226-102 [86]). Die Normen für die Prüfverfahren der Gesteinskörnung sind in DIN EN 933 [87] und DIN EN 1744 [88] festgehalten. Eine Übersicht ist in *Tabelle 5* dargestellt.

Die maximalen Austauschraten für grobe rGK zur Betonherstellung, gemäß DIN EN 206 [89] und deren Umsetzung DIN 1045-2 [90], ist jeweils im Anhang E der Normen beigefügt. Die zulässige Austauschrate ist dabei abhängig von der Kategorie der Gesteinskörnung und dem Anwendungsbereich. Der empfohlene maximal zulässige Anteil liegt dabei nach DIN EN 206 [89] für die Expositionsklasse X0 bei 50 % für beide Typen von grober rGK und nach DIN 1045-2 [90] bei 45 % für Typ 1 und 35 % bei Typ 2. Als Typ 1 wird jene Gesteinskörnung bezeichnet, welche ≥ 90 M.-% Beton und Betonprodukte beinhaltet. Als Typ 2 werden rGK mit ≥ 70 M.-% Beton und Betonprodukten und ≤ 30 M.-% Mauerziegel, Kalksandstein und Porenbeton bezeichnet.

Neben den genannten Normen gibt es ebenfalls eine ergänzende Richtlinie des "Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DafStb)" für Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierter Gesteinskörnung nach DIN EN 12620" [91]. Zudem sind die Vorgaben der Anforderung an bauliche Anlagen bezüglich der Auswirkungen auf Boden und Gewässer (ABuG) gemäß Anhang 10 der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) [92], beziehungsweise deren Umsetzung in Landesrecht, zu erfüllen.

Tabelle 5: Übersicht über relevante Regelungen in Deutschland

NORM/Richtlinie/Verordnung	Titel	Kurzbeschreibung
Verordnung 494/21	Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung	Verordnung unter anderem über Anforderungen an den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technische Bauwerke (Ersatzbaustoffverordnung; EBV)
DafStb Richtlinie	Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620	Verwendung von rGK der Typen 1 und 2 zur Herstellung und Verarbeitung von Beton (nach DIN 1045-2 und DIN EN 206-1); maximale Druckfestigkeitsklasse C30/37; Normverweis zur Bemessung von Bauteilen aus Beton mit Anteil an rGK (DIN EN 1992-1-1);

		<p>Verbot von rGK für Spann- und Leichtbeton; Prinzip der Betonfamilien darf auf Beton mit rGK nicht angewendet werden.</p>
DIN EN 12620	Gesteinskörnungen für Beton	<p>Übernommene EN 12620; Mindestanforderungen (Geometrisch, Physikalisch, Chemisch) und Kennzeichnung für rGK; Prüfverfahren mit Normverweis. Klassifizierung der Bestandteile von rGK; Einteilung der Gesteinskörnung in Typen nach Zusammensetzung; Behandelt auch rGK mit einer Korndichte zwischen 1,5 und 2 Mg/m³; Anhang G: Auswirkungen chemischer Bestandteile; Anhang H: Prüfhäufigkeiten.</p>
DIN 4226-101	Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen	<p>Betrifft rGK mit Kornrohichte $\geq 1\,500\text{ kg/m}^3$ für die Verwendung in Beton; Legt Prüfung und Bewertung geregelter gefährlicher Substanzen in rGK fest.</p>
DIN 4226-102	Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 102: Typprüfung und werkseitige Produktionskontrolle	<p>Betrifft rGK mit Kornrohichte $\geq 1\,500\text{ kg/m}^3$ für die Verwendung in Beton; Präzisierung der Mindestprüfhäufigkeit gemäß ÖNORM EN 12620 Anhang H.</p>
DIN EN 206-1	Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität	<p>Übernommene EN 206; Anhang E: Empfehlungen für Verwendung von grober rGK ($d \geq 4\text{ mm}$); Höchstwerte für Austausch grober Gesteinskörnungen durch rGK in Abhängigkeit mit der Expositionsklassen.</p>
DIN 1045-2	Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton	<p>Konkretisiert Forderungen nach DIN EN 206; Gilt für Ortbetonbauwerke, vorgefertigte Betonbauwerke und Fertigteile für Gebäude und Ingenieurbauwerke. Anhang E: Regelung für die Anwendung von rGK. Höchstzulässige Wasseraufnahme nach Typ. Zulässige Anteile an grober rGK nach Anwendungsbereich. Festlegung Prüfungen und Prüfhäufigkeit.</p>

Rechtliche Lage: Schweiz

In der Schweiz gilt für rGK die SN EN 12620 [93] sowie die BAFU-Richtlinie Nr. 0631 [94]. Für die Betonherstellung gilt die SIA 262 [95] sowie die SN EN 206 [96]. Die übernommenen Normenreihen SN EN 933 [97] und SN EN 1744 [98] regeln, wie auch in Österreich und Deutschland, die Prüfverfahren für rGK.

Die maximalen Austauschraten sind ebenfalls im Merkblatt 2030 [99] der SIA zu finden. Für grobe rGK zur Betonherstellung beträgt diese sowohl bei der Verwendung von Mischgranulat (M) als auch Betongranulat (C) 100 %. Betongranulat umfasst jenes Korngemisch, welches einen Mindestgehalt an 25 M.-% rezyklierte Körner Rc (z.B. Beton, Betonprodukte, ...) und maximal 5 M.-% rezyklierte Körner Rb (z.B. Mauer- und Dachziegel, gebrannter Ton, ...) aufweist. Zugelassen sind unter anderem auch verschmutztes Aushubmaterial (inkl. bzw. exkl. gefährliche Stoffe) sowie gemischte und evtl. verschmutzte Bauabfälle inkl. bzw. exkl. gefährliche Stoffe, welche den Anforderungen der Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA) [100] entsprechen. Außerdem müssen Anforderungen gemäß SN EN 933-11 [97] wie folgend eingehalten werden: $R_c < 5 \text{ M.-%}$, $R_b < 5 \text{ M.-%}$ ($X+R_g$) $\leq 0,5 \text{ M.-%}$, $FL \leq 0,2 \text{ cm}^3/\text{kg}$ und $R_a \leq 1 \text{ M.-%}$.

Auch in Liechtenstein sind die Normen der Schweiz zu berücksichtigen. Zudem wird die Anwendung von RB durch eine Vorschreibung zur Nutzung, wo dies technisch möglich ist, verstärkt [101], [102].

Tabelle 6: Übersicht über relevante Regelungen in der Schweiz

NORM/Richtlinie	Titel	Kurzbeschreibung
BAFU-Richtlinie Nr. 0631	Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle	Ökologischen Anforderungen für die Verwertung mineralischer Bauabfälle; Qualitäten von mineralischen Recyclingbaustoffen sowie Verwendungsmöglichkeiten.
SIA 2030:2021	Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen	Sichere Anwendung von RB nach NORM SIA 262; Als Ergänzung zur SN EN 206 und SN EN 12620.
SIA 262 / SN EN 206	Betonbau – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität	Umsetzung der EN 206; Gilt für die Betonherstellung unter Verwendung von rGK.
SN EN 12620	Gesteinskörnung für Beton	Übernommene EN 12620.

Rechtliche Lage: Niederlande

Die Normen NEN 8005 [103] und NEN 5905 [103] setzen die NEN EN 206 [104] und NEN EN 12620 [104] für die Niederlande um. In der NEN EN 206 [105] wird zwischen 2 Typen von rGK (Typ A, Typ B) unterschieden. In der NEN 8005 [106] wird zwischen 4 Typen (Typ A1, Typ A2, Typ B, Typ C) unterschieden. Die maximale Austauschrate ist von der Expositionsklasse abhängig und beträgt nach NEN EN 206 (Typ A) und NEN 8005 (Typ A1, Typ A2 und Typ B) 50 % für rGK und einem Beton der Expositionsklasse X0. Für die übrigen Expositionsclassen ist für die 4 Typen laut NEN 8005 eine Austauschrate von 20-50 % erlaubt. Neben den Normen gibt es auch Empfehlungen der CROW CUR:

- Empfehlung 106[107], Empfehlung für den Feinanteil der rGK,
- Empfehlung 112 [108], Empfehlung für grobe rGK.
- Empfehlung 127 [109], Empfehlung für gemischte rGK,

Die CUR-Empfehlung 127 [109] schließt von der Wasserabsorption auf die maximale Austauschrate und erlaubt eine Austauschrate von 100 % für grobe Gesteinskörnung und bis zu 60 % für den Feinanteil [110].

Rechtliche Lage: Japan

Japan teilt rGK in drei Klassen ein: H, L und M. Die Klasse H beschreibt eine Gesteinskörnung, bei der Zementstein zum größten Teil durch die Aufbereitung entfernt wurde und kann dadurch normativ wie eine natürlich Gesteinskörnung eingesetzt werden. Die Klassen L und M beschreiben rGK bei welcher eine weniger aufwendige Aufbereitungen durchgeführt wurden. Das Limit für die Wasserabsorption von Gesteinskörnungen der Klasse H ist ident zu der von natürlichem Aggregat. Für die Klassen M und L gelten diesbezüglich höhere Grenzwerte. Betone dürfen bis zu 100 % rGK enthalten, die geforderten Mindest-Druckfestigkeiten sind 45 N/mm² für die Klasse H, 36 N/mm² für die Klasse L und 24 N/mm² für die Klasse M festgelegt. Die Anwendungen sind entsprechend eingeschränkt, so ist Beton mit rGK der Klasse M nur für wenige Anwendungen zugelassen (z.B. Füllungen). Die Japanischen Industrie Standards (JIS) 5021 [111], 5022 [112] und 5023 [113] beschreiben die rGK und deren Anwendungen. Zudem ist in JASS 5N-2013 [114] eine Regelung zur Nutzung von rGK zu finden, die durch Abbau von Atomkraftwerken gewonnen wird und für den Bau von neuen Atomkraftwerken eingesetzt werden kann [115].

Weitere nennenswerte rechtliche Rahmenbedingungen

Dänemark: Dänemarks aktuellste Umsetzung der EN 206 ist die DS 206 : 2024 [116]. In früheren und derzeitigen Umsetzungen (DS 2426 [117]) war und ist bereits eine Austauschrate von bis zu 100 % erlaubt [118].

Belgien: NBN B 15-001 [119] ist die Norm zur Umsetzung der NBN EN 206 [120]. In Flandern soll bis 2030 jeglicher Beton aus Abbrüchen, sofern die Qualität ausreichend ist, für die Herstellung von Betonzuschlagstoffen verwendet werden können und in Transportbeton, Straßenbeton und Fertigteilen einsetzbar sein [121].

6 Aufbereitungs- und Behandlungsmethoden von mineralischen Bauabfällen

Die Aufbereitung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen kann im Wesentlichen in drei Grundoperationen eingeteilt werden: (1) Zerkleinerung, (2) Klassierung und (3) Sortierung. Die Klassierung dient der Erzeugung von Stoffströmen mit definierter Korngröße. Die Sortierung dient der Entfernung von Schad und Störstoffen [122].

Die Qualität der rezyklierten Gesteinskörnung (rGK), die durch Aufbereitung gewonnen werden kann, ist vom Ausgangsmaterial und der Art der Aufbereitung abhängig. Mit steigender Inhomogenität des aufzubereitenden Materials steigt der Aufwand, um Baustoffe hoher Qualität zu erzeugen. Alle Prozessschritte, die beginnend beim Abbruchprozess versäumt werden, müssen in der darauffolgenden Prozesskette mit höherem Aufwand kompensiert werden. Es ist daher von großer Bedeutung den Abbruch so selektiv wie nur möglich zu gestalten, um den Störstoffgehalt gering zu halten.

6.1 Aufbereitungsanlagen

Bei der Aufbereitung wird zum einen zwischen Nass- und Trockenaufbereitung und zum anderen zwischen stationären und mobilen Anlagen unterschieden. Zudem gibt es eine weitere Unterkategorie der semimobilen Anlagen. Diese unterscheiden sich von mobilen Anlagen dadurch, dass sie nicht selbstständig bewegbar sind, sondern von separaten Fahrwerken transportiert werden. Semimobile Anlagen werden daher in der Regel mit stationären zusammengefasst [11].

Mobile Anlagen umfassen Brecher und Siebe, wobei erstere den Großteil der registrierten mobilen Anlagen ausmachen [123]. Mobile Brecher bestehen aus einem Aufgabetrichter mit Vorsieb (Rost), einem Brecher (Backen-, Prall- oder Kegelsieb) sowie der Möglichkeit eines Überbandmagnetscheiders und Sichters zur Abtrennung von Störstoffen [11]. Mobile Anlagen haben den Vorteil, dass Transportwege reduziert werden. Stationäre Anlagen besitzen größere Kapazitäten und verwenden oft mehrere Zerkleinerungs- und Klassierungsschritte. Dies ermöglicht die Erzeugung von hochwertigeren Recyclinggesteinskörnungen. Der Betrieb einer stationären Anlage ist jedoch nur ökonomisch, wenn ein steter Strom an Baurestmassen zur Verfügung steht [124]. Ein urbaner Standort, welcher kurze Transportwege gewährleisten kann, ist jedoch aufgrund von Lärm und Emissionen meist mit negativen Nebeneffekten verbunden [125].

Es gibt in Österreich 165 stationäre und 776 mobile Anlagen zur Aufbereitung von Baurestmassen (Stand 2021). Die Verteilung nach Bundesland ist *Abbildung 5* zu entnehmen [18]. Mobile Anlagen werden aufgrund ihrer wechselnden Standorte nicht einzelnen Bundesländern zugeteilt. Die Rechtsgrundlage für die Aufzeichnung und Registrierung im Zusammenhang mit dem Betrieb einer Aufbereitungsanlage ist im AWG [72] und der Abfallbilanzverordnung [126] gegeben.

In Österreich wurden im Jahr 2021 rund 13,6 Mio. Tonnen mineralische Bau- und Abbruchabfälle sowie Aushubmaterialien aufbereitet. Dadurch wurden rund 9 Mio. Tonnen an Baustoffen gemäß RBV [71] gewonnen. Von diesen erfüllen wiederum rund 8,5 Mio. Tonnen die Anforderung der höchsten Qualitätsklasse für Recycling-Baustoffe.

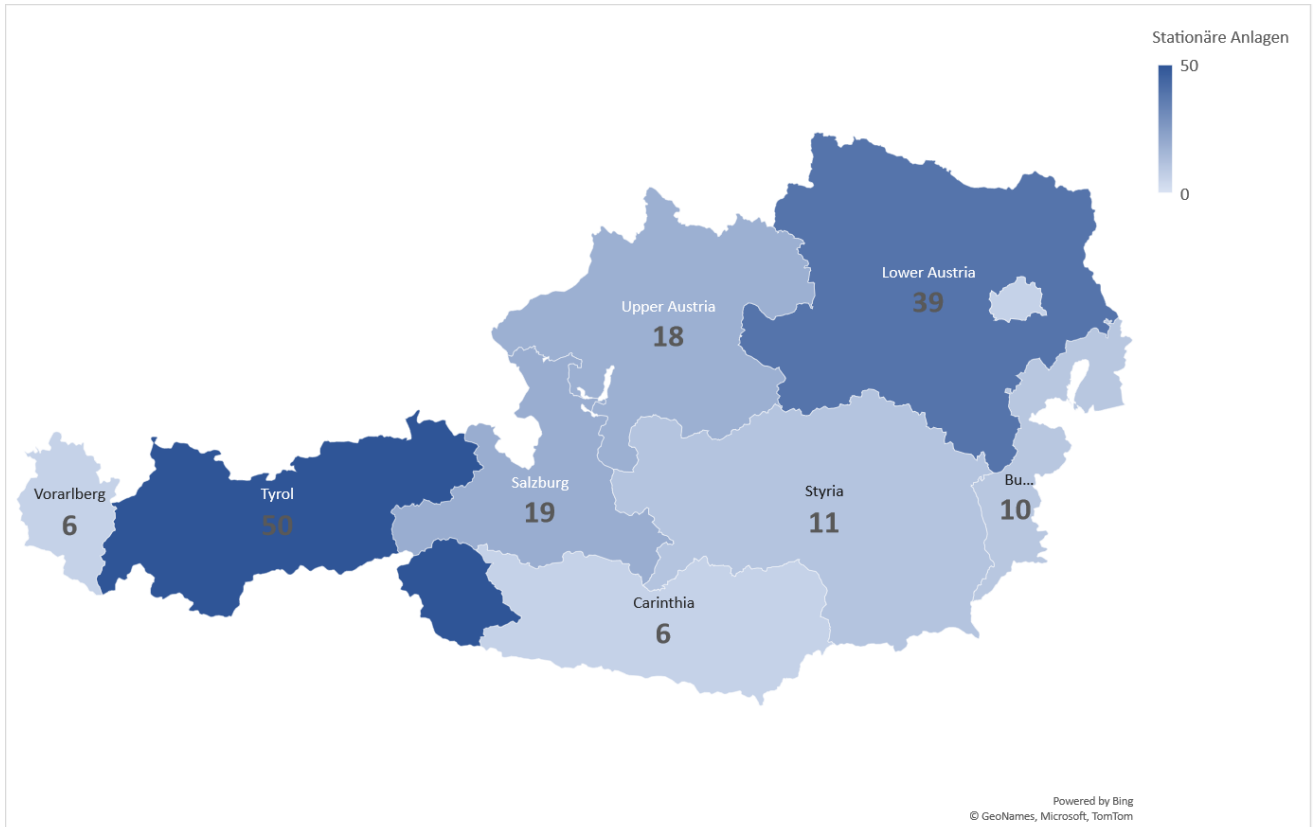


Abbildung 5: Übersicht über die geografische Verteilung der verfügbaren stationären Anlagen in Österreich

In der Tabelle 7 sind die relevanten Stoffströme der Baurestmassenaufbereitung dargestellt. Die durch Aufbereitung gewonnenen Baustoffe sind in *Tabelle 8* beschrieben [18]. Auf Basis des § 21 des AWG [72] und der Abfallbilanzverordnung [126] wurde die Stammdatenregistrierung (ZAReg) zur elektronischen Erfassung von Stammdaten zu AbfallbehandlerInnen begründet. Hier können Daten zu aktuell betriebenen Anlagen in Österreich aufgerufen werden.

Tabelle 7: Relevante Inputströme für die Aufbereitung (Stand: 2021)

Abfallbezeichnung	Input (t)
Betonabbruch	3.303.000
Bauschutt	2.569.000
Bodenaushub Klasse A2	1.854.000
Bitumen, Asphalt	1.759.000
Bodenaushub mit Hintergrundbelastung	1.442.000
Summe	10.927.000

Tabelle 8: Output Recycling Baustoffe (Stand: 2021)

Recycling-Baustoff Qualitätsklasse	Output (t)
U-A	8.477.000
U-B	302.000
B-B	87.000
B-D	54.000
H-B	36.000

Grundsätzlich kann keine universell anwendbare Anlagenkonfiguration zusammengefasst werden, da sich diese an die jeweiligen lokalen und produktspezifischen Anforderungen richtet. In *Abbildung 6* ist eine verallgemeinerte Darstellung basierend auf Empfehlungen aus der Literatur abgebildet [11]. Im folgenden Abschnitt werden die wichtigsten Aufbereitungsschritte zusammengefasst.

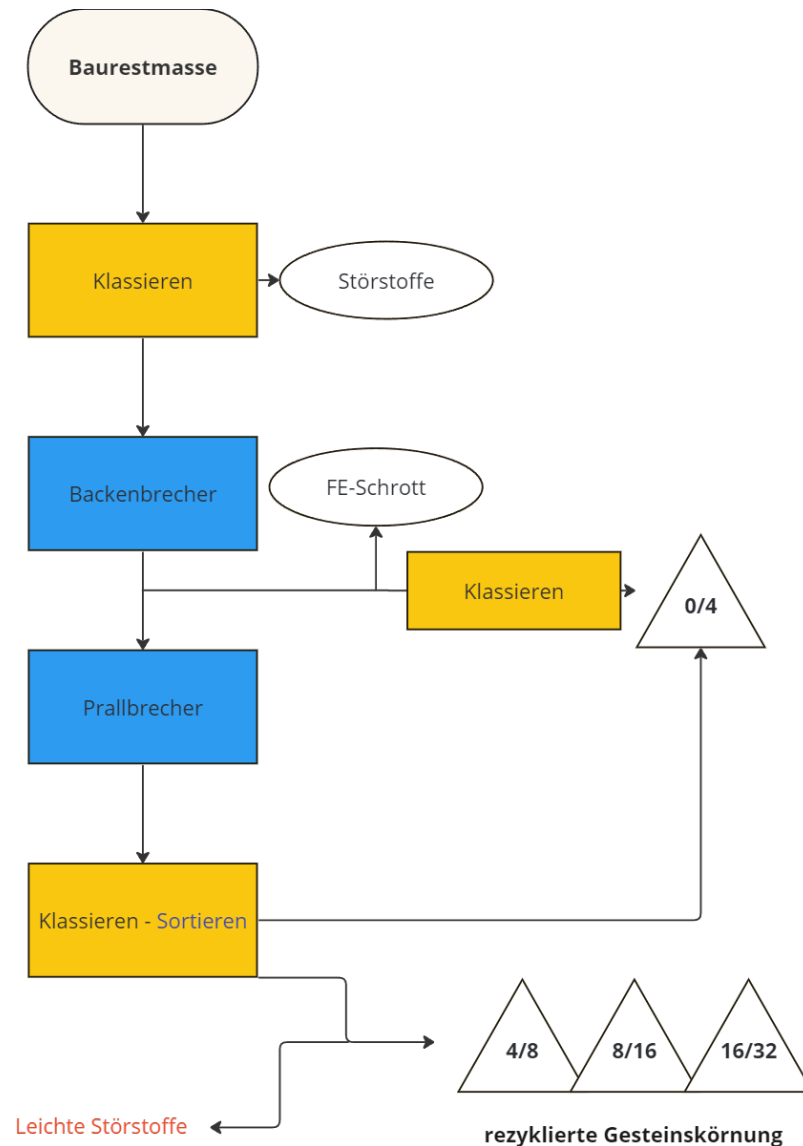


Abbildung 6: Vereinfachte Darstellung der Prozessschritte der Trockenaufbereitung von Baurestmasse

6.2 Trockenaufbereitung

Zerkleinern

Ziel der Zerkleinerung ist die Reduktion der Korngröße und resultiert in einer damit verbundenen Vergrößerung der Oberfläche. Der für die Zerkleinerung notwendige Energieeintrag ist abhängig vom Zerkleinerungsgrad. Die unterschiedlichen Zerkleinerungsaggregate unterscheiden sich dabei in ihrer Funktionsweise und durch: erzieltes Zerkleinerungsverhältnis, produzierten Feingutanteil, Art der Kornbeanspruchung sowie Kornform des Produkts [11]. Eine weitere Trennung von Gesteinskorn und Zementstein ist mit mehrstufigen Zerkleinerungsprozessen erreichbar, wobei aber in Folge auch die Masse an Grobgut reduziert und die Menge an

Feingut erhöht wird [115]. In der zweiten Zerkleinerungsstufe kommen in Pilotanlagen auch Mühlen zum Einsatz, bei denen die Kornbeanspruchung primär durch Scherung (Abrasion) stattfindet [11], [127], [128].

Arten von Brechanlagen

- **Backenbrecher:** Wurden ursprünglich entwickelt für die Grobzerkleinerung von hartem, druckfestem Gestein. Bevorzugt werden Einschwingenbrecher (Kurbelschwingbrecher) eingesetzt, da sie ein besseres Förderverhalten zeigen als Kniehebelbackenbrecher. Die Hauptbeanspruchung wird durch Druck ausgeübt. Neben kubischen wird auch plattiges, splittriges Brechkorn erzeugt [129].
 - **SmartCrusher:** Ein Backenbrecher, dessen Kinematik verändert worden ist, wodurch neben Druckbeanspruchung vermehrt Scherkräfte, und damit Beanspruchung durch Abrasion ermöglicht wird. Die Intensität der Beanspruchung ist geringer als in traditionelle Backenbrechern, wodurch anhaftender Zementstein abgetragen wird, während eine Kornzertrümmerung vermieden wird. Die Feinfraktion ist mit Zementstein angereichert. Auf den Brecher wirken niedrigere Kräfte, was positiv auf die Lebensdauer wirken kann [11], [130].
- **Prallbrecher:** Wurde für die Zerkleinerung von Material mit mittlerer Festigkeit entwickelt. Dieser Brecher besteht aus einem Gehäuse, Prallplatten und einem Rotor mit Schlagleisten. Der Verschleiß ist vergleichsweise hoch. Die Hauptbeanspruchung erfolgt durch Prall. Bei dieser Behandlungsmethode wird kubisches Brechkorn erzeugt [11]. Grundsätzlich existieren zwei technische Ausführungen: vertikale und horizontale Prallbrecher [131].
- **Kegelbrecher:** Besteht aus einem Brechkegel, der eine schnelle Taumel- und Schlagbewegung ausführt. Die Zerkleinerung erfolgt zwischen Brechkegel und äußerem Mantel. Hauptbeanspruchung durch Druck. Erzeugt ein kubisches Brechkorn [131], [132].
 - **Modifizierter Kegelbrecher (Rotormühle):** Verwendung eines vertikalen Rotors mit zylindrischer Hülle. Die Abtragung des Zementsteins erfolgt primär durch Abrasion und erzeugt eine Anreicherung des Zementsteins in der Feinfraktion [11].

Backenbrecher eignen sich besonders als Vorbrecher, oder bei niedrigeren Anforderungen an das Endprodukt in einstufigen Anlagen, da sie weniger kubisches Korn produzieren. Prallbrecher eignen sich durch die kubische Kornform des Produkts als Nachbrecher in ein- oder mehrstufigen Anlagen mit hohen Anforderungen an das Endprodukt. Der Einsatz von Kegelbrecher erfolgt nur zum Nachbrechen in der sekundären und tertiären Brechstufe [11]. Das Aufgabegut für Kegelbrecher muss vorzerkleinert sein, da Störstoffe wie Eisenbewehrung problematisch sind. Für die Aufbereitung von Baurestmasse wird typischerweise ein Backen- oder Prallbrecher in Erwägung gezogen. SmartCrusher und modifizierter Kegelbrecher können zwar mehr Zementstein entfernen, werden aber gegenwertig nur in Pilotanlagen eingesetzt [11], [130]. Ein Vergleich der Eigenschaften der gängigen Brecher ist in *Tabelle 9* dargestellt.

Tabelle 9: Vergleich gängiger Brecher (Ergänzungen durch [129], [131], [132])

	Backenbrecher	Prallbrecher	Kegelbrecher
Aufgabekorngröße (mm)	150 - 2000	50 - 1000	25 – 400
Hauptbeanspruchung	Druck	Prall	Druck, Scherung
Kornform des Produkts	Kubisch, teilweise plattig bis splittrig	kubisch	Kubisch
Zerkleinerungsgrade (-)	3 - 7	20-50	10-30
Fehlaustrag Überkorn	Hoch bei plattenförmigen Aufgabegut	niedrig	-
Feingutanteil	Geringer	Höher	-
Eignung im Prozess	Vorbrecher	Vor und Nachbrecher	Nachbrecher
Robustheit ggü. Störstoffen	Hoch	Mittel	Niedrig (sehr empfindlich!)

Bei mobilen Anlagen gibt es Prall-, Backen- und Kegelbrecher am Markt, wobei Kegelbrecher aufgrund ihrer Einschränkung als Sekundärstufenbrecher seltener in Verwendung sind [132], [133], [134], [135].

Klassierung

Durch Klassierung erzielt man die Auftrennung eines polydispersen Partikelgemisches in zwei oder mehr Fraktionen in verschiedene Korngrößenklassen. Zu den Verfahren der Klassierung zählen Sieben, (Wind-)Sichten und Stromklassieren [136].

Bei der Siebklassierung erfolgt die Auftrennung der Fraktionen über die geometrischen Abmessungen der Partikel. Hierfür werden ein oder mehrere Siebböden (z.B. Spaltroste, perforierte Platten, Drahtgewebe, ...) verwendet [136]. Um den Fehlkornanteil gering zu halten ist eine gleichmäßige Verteilung und ausreichende Verweilzeit des Materials auf dem Siebboden zu gewährleisten. Die Siebung dient in der Baurestmassenaufbereitung mehreren Zwecken:

- Abtrennung von Grob und Feianteilen zum Schutz der Zerkleinerungsanlagen (Abtrennung von Feinanteil zur Entlastung der Zerkleinerungsanlagen, Abtrennung von Grobanteil zum Schutz vor Überbelastung und Beschädigung).
- Begrenzung der Korngrößen zur Erzeugung bestimmter Kornfraktionen für die weitere Anwendung.
- Vorbereitung und anschließende Sortierung, sofern in einer Siebfraction Stoffe angereichert sind.

Beim Sichten erfolgt die Auftrennung in einem Gas (Luft) als kontinuierliche Phase aufgrund von Dichteunterschieden durch Strömungsumlenkung. Die Sichtung erlaubt somit die Auftrennung von Partikeln gleicher geometrischer Abmessung, wobei die zu trennenden Partikel in einer ausreichend engen Fraktion und vereinzelt vorliegen müssen. Die Sichtung wird neben der Klassierung auch zur Abscheidung von Schad- und Störstoffen eingesetzt (siehe Punkt 6.4) [11], [136].

Beim Stromklassieren ist die kontinuierliche Phase eine Flüssigkeit (siehe Punkt 6.3) [11], [131].

Arten von Sieben

- **Roste** bestehen aus parallelen Profilstäben oder Walzen. Sie unterscheiden sich durch Abstand der Stäbe und Neigungswinkel. Roste werden im Grob- und Mittelkornbereich eingesetzt und können auch zur Auftrennung von feuchtem Material, das tendenziell zum Zusetzen von Siebböden führen kann, eingesetzt werden. Man unterscheidet je nach Transport des zu siebenden Guts feste Roste, bewegte (angeregte) Roste und Rollenroste. Ein Einsatzgebiet fester Roste ist die Verwendung als Vorsieb bei Brecheranlagen, um den Verschleiß durch Feinanteile gering zu halten [11].
 - **Sternsiebe** sind eine Sonderform der Rollenroste, bestehend aus Wellen mit „Siebsternen“. Das Feingut fällt zwischen den Sternen herab, während Grobgut ans Ende des Siebs transportiert wird. Ausführungen mit mehreren Siebdecks sind möglich, wodurch eine Aufteilung in mehrere Fraktionen gelingt. Sternsiebe werden hauptsächlich für die Siebung von Aushubmaterialien verwendet [11], [137], [138].
- **Trommelsiebe** bestehen aus einem leicht geneigten, rotierenden, zylindrischen Sieb. Feingut verlässt das Sieb durch die Öffnungen des Trommelmantels, das Grobgut gelangt zum Ende der Trommel. Trommelsiebe werden zur Trennung im Mittelkornbereich (10-80 mm) verwendet [11].
- **Schwingsiebe** sind horizontal bewegte Siebböden. Sie finden bei der Aufbereitung von mineralischen Baurestmassen eher keine Verwendung [11].
- **Wurfsiebe** sind Siebböden bei denen die Siebbewegung senkrecht erfolgt. Sie werden eingesetzt für die Klassierung von zerkleinertem Baurestmassen [11].

Arten von Sichern

- **Windsichten:** stellt ein Trennverfahren dar, welches Partikel in einem Luftstrom aufgrund ihrer Dichte separiert. Folgende Sichter können auf Basis der Stromrichtung unterschieden werden:
 - **Zick-Zack-Sichter** sind Schwerkraftsichter bei denen ein Luftstrom dem Materialstrom in einem (mehrfach) geknickten Kanal entgegenwirkt. Zick-Zack-Sichter haben meist mehrere Trennstufen. In jedem Knick des Sichters findet eine Querstromsichtung statt [11], [136], [139].
 - **Querstromsichter** sind Schwerkraftsichter bei denen ein Luftstrom quer zum Materialstrom wirkt. Eine Anordnung bei der der Luftstrom von unten nach oben gerichtet ist führt dazu, dass leichteres Material weiter ausgetragen wird, während schwereres Gut weniger abgelenkt wird. Wirkt der Luftstrom senkrecht von oben am Ende des Förderbands so wird leichteres Material

nach unten gedrückt während grobes Material weniger stark beeinflusst und somit weiter ausgetragen wird [11].

- **Advanced Dry Recovery (ADR)** verwendet einen Prallsichter zur Auftrennung. Auch feuchtes Material kann getrennt werden und Agglomerate werden am Prallrad aufgebrochen. Der Auftrennung in Fein- und Grobgut folgt eine weitere Auftrennung des Feinguts durch Querstromsichtung. ADR kann für die Klassierung von Material der Kornfraktion < 16 mm angewendet werden [11].

ADR ist im Pilotmaßstab zu finden. Neben der Baurestmassenaufbereitung auch in der Aufbereitung von Müllverbrennungsaschen [11], [140], [141].

Sortieren

Sortierung bezeichnet die Auftrennung von Partikeln nach Sortiermerkmalen. Diese Merkmale sind z.B. Farbe, Form, Magnetisierbarkeit oder Dichte. Das wichtigste Sortiermerkmal der nichtmetallischen Bestandteile von Baurestmassen ist die Rohdichte. Die Rohdichte spannt sich über 3 Größenordnungen ($\sim 30 \text{ kg/m}^3$ für Dämmstoffe, $\sim 3000 \text{ kg/m}^3$ für bestimmte natürliche Gesteine). Vor einer Sortierung findet im Regelfall eine Klassierung statt [11].

- **Händische Sortierung/sensorbasierte Sortierung:** Bei der händischen Sortierung wird grobes Material nach einem Siebschritt auf einem Förderband vereinzelt und von Mitarbeitern auf Schad- und Störstoffe untersucht. Eine Weiterentwicklung ist die Verwendung von Sensoren in Kombination mit Entfernung durch Roboter oder Druckluftdüsen [11], [142].
- **Trenntische/Luftherde:** von unten mit Luft durchströmte geneigte, schwingende Siebe sorgen für eine Fluidisierung des Materials. Partikel werden abhängig von Luftwiderstand und Masse entweder nach oben ausgetragen (Leichtgut) oder am unteren Ende des Siebs gesammelt (Schwergut). Partikel gleicher Form werden nach Dichte und Partikel ähnlicher Dichte nach Partikelform sortiert [11].
- **Schrägbandscheider:** Förderband das in Laufrichtung sowie senkrecht zu dieser geneigt ist. Dadurch wird rundes und kubisches Material seitlich vom Band ausgetragen während flache, blattförmige Partikel (Glas, Fliesen, Holz) das Ende des Förderbands erreichen. Die Eignung für eine Aufbereitung von Beton muss für den Einzelfall überprüft werden [11].
- **3D-Sortiertrommeln:** Das zu sortierende Material durchläuft eine rotierende Siebtrommel die von einer zweiten, geschlossenen Trommel umgeben ist. Kubische und runde Partikel können durch das Sieb hindurchfallen, während längliche Partikel am Durchgang gehindert werden und somit in der inneren Trommel verbleiben [11], [143].
- **Luftsetzmaschine:** Von unten mit Luft durchströmter geneigter Siebboden. Es gibt Ausführungen mit oder ohne Sandbett. Die Trennung erfolgt in beiden Fällen aufgrund von Dichteunterschieden. Das Material bewegt sich entlang des Siebs wobei sich das Leichtgut nach oben und Schwergut nach unten bewegt. Am Ende erfolgt die Auftrennung der zwei Fraktionen. Ermöglicht zudem Trocknung von Leichtmaterialien [11], [144].
- **Windsichtung:** Dichtesortierung mit Luft als fluides Medium. Vielzahl an unterschiedlichen Umsetzungen, die sich auch in der Strömungsrichtung unterscheiden. Beispielsweise Aufstrom-, Querstrom-

und Zick-Zack-Sichter. Oft Verwendung eines aufwärts gerichteten Luftstroms am Ende eines Förderbandes in stationären und mobilen Aufbereitungsanlagen (Querstromsichtung). Schwere Partikel fallen am Ende des Förderbands ab, leichtere Partikel werden vom Luftstrom weiter ausgetragen. Die Windsichtung erfordert eine Vereinzelung des Materials am Förderband [11].

- **Magnetscheider:** Ermöglichen die Abtrennung von magnetisierbarem Material mit Permanent- oder Elektromagneten. Magnetscheider werden eingesetzt, um Bewehrungsstahl und andere Eisenpartikel abzutrennen. Die Ausführungen erfolgen als Überbandmagnetscheider und Trommelmagnetscheider, wobei ersterer häufiger eingesetzt wird. Ein Überbandmagnetscheider ist ein senkrecht zur Förderrichtung des Hauptförderbandes angeordnetes Förderband mit einem Magneten zwischen den Umlenk- Antriebsrollen. Beim Trommelmagnetscheider befindet sich der Magnet fest in der sich drehenden Umlenktrommel am Ende eines Förderbands [11].
- **Wirbelstromscheider:** Durch ein sich zeitlich änderndes Magnetfeld wird in leitfähigem Material ein Wirbelstrom induziert, welcher wiederum ein Magnetfeld induziert. Das induzierte Magnetfeld wirkt dem permanenten Magnetfeld entgegen, wodurch es zur Abstoßung kommt. Diese Technologie ermöglicht die Abtrennung von nicht magnetisierbaren Metallen aufgrund ihrer elektrischen Leitfähigkeit. Es gibt unterschiedliche Konzepte zur Erzeugung des Wirbelstroms. Die Auftrennung der Materialien erfolgt am Ende eines Förderbands, wobei die nicht leitfähigen Materialien ohne Ablenkung fallen. Leitfähige Materialien werden in einer Parabel abgeworfen [11].

6.3 Nassaufbereitung

Die Nassaufbereitung bietet einige Vorteile: die gleichzeitige Entfernung von Schad- und Störstoffen, eine geringe Staubentwicklung, eine enge Klassierung des Ausgangsmaterials vor einer Sortierung ist nicht erforderlich, eine höhere Trenndichte und -schärfe kann erzielt werden [122], [145]. Das beim Aufbereitungsprozess genutzte Wasser wird im Kreis geführt, wobei die Menge an Wasser, die mit dem aufbereiteten Gut ausgetragen wird, durch Frischwasser ersetzt werden muss. Die Wasseraufnahme des Aufgabeguts ist abhängig von der Verweilzeit in den unterschiedlichen Aggregaten. Zu bedenken ist auch, dass der Schlamm der bei der Wasseraufbereitung anfällt eine Senke für Schadstoffe (z.B. Sulfat) ist [11]. Die Nassaufbereitung hat sich, aufgrund des zusätzlichen Aufwands für Prozesswasseraufbereitung und Trocknung, nicht durchgesetzt und ist im Vergleich mit der trockenen Aufbereitung weit seltener anzutreffen [146], [147], [148]. Es gibt in Österreich neben der Verwendung für die Aufbereitung von Baurestmassen auch Anwendungen bei der Aufbereitung von Müllverbrennungsschlacken [149], [150].

Nasse Dichtesortierverfahren

- **Schwimm-Sink-Sortierung** verwendet eine Trennflüssigkeit deren Dichte zwischen der der zu trennenden Stoffe liegt. Jene Stoffe deren Dichte größer ist als die der Trennflüssigkeit werden absinken, während Stoffe deren Dichte unterhalb der Trennflüssigkeit liegt aufschwimmen. Bei der Aufbereitung von Baurestmassen wird Wasser als Trennflüssigkeit genutzt, wobei sich durch die eingebrachten

Feinanteile eine Trübe mit höherer Dichte bildet ($1200-1400 \text{ kg/m}^3$). Zum abgetrennten Leichtgut gehören unter anderem Kunststoffe, Folien, Holz, Styropor und Leichtbaustoffe [11].

- **Leichtstoffabscheider** unterscheiden sich untereinander durch die Art des Austrags von Leicht- und Schwergut. Der Austrag kann über Bänder, Räder oder Schnecken erfolgen.
- **Hydrobandscheider** sind leicht geneigte, gemuldete Förderbänder. Die Aufgabe von Material erfolgt mit Wasser. Das Wasser strömt nach unten und nimmt dabei das Leichtgut mit, das Schwergut wird am oberen Ende des Bandes ausgetragen [11].
- **Aufstromsortierung** verwendet einen Aufstrom durch die Einbringung von Prozesswasser am unteren Ende des Aggregats. Das Aufschwimmen von leichten Bestandteilen und der Austrag werden somit weiter begünstigt. Zu den Aufstromsortierern zählen Schnecken-Aufstrom Sortierer und Hydrotrommel [11].
- **Setzmaschinen** erreichen eine Fluidisierung des Materials durch einen pulsierenden aufwärtsgerichteten Strom. Dadurch wird eine Auftrennung entsprechend der Dichte beschleunigt und es kommt zu einer Schichtung des Materials. Setzmaschinen werden aufgrund der Erzeugung der Pulsation unterschieden. Bei Setzsortierung ist die Verweilzeit des zu sortierenden Guts länger als bei Leichtstoffabscheidern mit aktivem Austrag [11].
- **Hydrozyklon** werden zur Trennung von festen Partikeln aus einem fluiden Medium verwendet. Die Trennung erfolgt über Fliehkräfte. Es kommt bei der resultierenden Entwässerung auch zu einer Abtrennung der feinsten Partikel mit dem Wasser [11], [131].

Eine Entwässerung von Leicht- und Schwergut kann auch über Siebe erfolgen. Bei direkter Verwendung des Schwerguts wird eine erforderliche Befeuchtung beeinflusst werden [11].

Für die Komponenten von Nassaufbereitungsanlagen sind mobile und semimobile Versionen seltener [151], [152].

Grundsätzlich wird die Auswahl von trockenen bzw. nassen Aufbereitungsmethoden abhängig gemacht von den spezifischen Anforderungen an die herzustellende Gesteinskörnung. Durch die nasse Aufbereitung können Feinanteile im Wesentlichen von Grobkörnern ausgewaschen werden.

6.4 Umgang mit Schad- und Störstoffen

Entsprechend der RBV [71] ist vor dem Abbruch eines Bauwerks bei dem mehr als 750 Tonnen an Bau- oder Abbruchabfällen anfallen, von einer rückbaukundigen Person eine Erkundung auf Schad- und Störstoffe nach ÖNORM B 3151 [80] durchzuführen. Sollte das Aufkommen an Abbruchabfällen (ausgenommen Bodenaushubmaterial) mehr als 750 Tonnen betragen und größer als 3500 m³ sein, so ist stattdessen bzw. zusätzlich von einer externen befugten Person nach ÖNORM EN ISO 16000-32 [81] vorzugehen. Schad- und Störstoffe sind vor dem Abbruch zu entfernen [71].

Die ÖNORM B 3151 [80] definiert Schadstoffe und Störstoffe:

- „Schadstoffe“ – Stoffe, die Mensch oder Umwelt schädigen oder zur Wertminderung/Nutzungseinschränkung von Bauwerken führen könnten. Dies kann durch Eigenwirkung aber auch im Zusammenwirken mit anderen Stoffen, Abbauprodukte oder Emissionen geschehen.
- „Störstoffe“ – Stoffe, die vorgesehene Behandlung, einen Behandlungsschritt, die Wiederverwendung oder Verwertung verhindern oder erschweren

Demnach sind Schadstoffe laut ÖNORM B 3151 [80] z.B. Mineralfasern; mineralöhlhaltige Bauteile; radioaktive Rauchmelder; Industriekamine; Dämmstoffe; Schlacken; Aschen; verunreinigte Böden; Brandschutt; polychlorierte biphenylhaltige Materialien; elektrische Betriebsmittel (PCB-, Quecksilberhaltige Materialien); Kühlmittel; Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffhaltige (PAK) Materialien; salz-, öl-, teeröl- oder phenolhaltige oder -imprägnierte Bauteile; asbesthaltige Materialien.

In ÖNORM EN ISO 16000-32 [81] wird neben den Quellen, die sich zum Teil mit ÖNORM B 3151 [80] decken, für Asbest, Schwermetalle und chemischen Verbindungen (PAKs, VOCs, SVOCs, PCB, Siloxane, etc.) auch auf die notwendige Probennahme und Analyse eingegangen.

Die BRV Richtlinie für Recycling-Baustoffe [153] empfiehlt zur Erzielung entsprechender Qualitäts- und Güteklassen eine Vorsortierung des Materials. Weiters wird empfohlen Material im Zweifelsfall, sofern möglich einer niedrigeren Qualitäts- bzw. Güteklasse zuzuordnen oder auszusondern [153].

Die ÖNORM B 3140 [70] legt die Mindestanforderungen für die rGK fest die für Beton bzw. für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische zu erfüllen sind. Limitiert sind unter anderem der Gehalt an Sulfaten, Chloriden und leichtgewichtigen organischen Verunreinigungen. Für die unterschiedlichen Qualitätsklassen, U-Klassen und Güteklassen sind unterschiedliche Grenzwerte festgelegt [154]. Die Parameter stehen im direkten Zusammenhang mit der Entfernung der in ÖNORM B 3151 [80] gelisteten Schad- und Störstoffe. Bei einer unzureichenden Entfernung wird das Einhalten der Grenzwerte beeinflusst und eine niedrigere Qualitätsklasse erzielt, wodurch es zwangsläufig zum Downcycling kommt.

Bei der trockenen Aufbereitung erfolgt die Abtrennung der Störstoffe mit den in Abschnitt 6.2 beschriebenen Aggregaten für Sortierung. Händische Sortierung ist nach wie vor im Einsatz, wenngleich eine Integration sensorbasierter Systeme schon seit mehreren Jahren im Gange ist. In Kombination mit Greifrobotern oder Druckluftdüsen wird die Abtrennung von Leichtstoffen (Kunststoffe, Holz, etc.) ermöglicht. Eine Vereinzelung des Aufgabeguts am Förderband ist sowohl für sensorbasierte als auch händische Sortierung wichtig. Zur

Bestimmung des Materials dienen unterschiedliche Sensoren. Farbkameras für Trennung nach Farbe, NIR Sensoren für Trennung nach der Zusammensetzung an der Oberfläche, Röntgendetektoren für Trennung nach Dichtedifferenzen und Laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) für Trennungen nach chemischer Zusammensetzung der Oberfläche. Die sensorunterstützte/automatisierte Sortierung ist grundsätzlich technisch möglich, wird dennoch aus Kostengründen seltener herangezogen [136]. Zur Abtrennung von magnetischen Metallen, etwa Stahlbewehrungsresten, werden Überbandmagnetscheider eingesetzt. Zur Abtrennung von nicht magnetischen Metallen (Kupfer, Aluminium und Messing) kann ein Wirbelstromscheider verwendet werden [11].

Bei der Nassaufbereitung erfolgt die Abtrennung von Störstoffen (Leichtgut) mit den in Abschnitt 6.3 beschriebenen Dichtesortierverfahren. Zur Abtrennung von Metallen sind wieder Magnetscheider und Wirbelstromscheider einsetzbar. Bei der Nassaufbereitung werden durch das Waschen wasserlösliche Schadstoffe und beim Entwässern feinste Partikel teilweise entfernt. Dies ist insofern hilfreich, da die Feinfraktionen im Vergleich zu den groben Gesteinsfraktionen tendenziell stärker mit Schadstoffen belastet sind [147], [155].

Nach ÖNORM B 4710-1 Anhang E [24] ist die Feinfraktion der Baurestmassenaufbereitung nur für die Betonproduktion erlaubt, sofern eine Nassaufbereitung erfolgte oder die Eignung der Aufbereitung nachgewiesen wurde. Der Anteil der rGK welcher kleiner als 0,063 mm ist, muss in Summe auf 3 % der Masse begrenzt sein.

Bei der Verwendung von rGK im Straßenbau stellt sich darüber hinaus die Frage des Einflusses auf die Umwelt durch eine potentielle Auslaugung des rezyklierten Materials. In Österreich sind normative Grenzwerte für Eluate von rGK zu finden. Diese decken die Verwendung in Beton sowie für den ungebundene Einsatz ab [70], [71]. In anderen Ländern beziehen sich Studien auf Grenzwerte für den Grundwasserschutz. In diesen sind erhöhte Eluat-Werte für Elemente zu finden, die von den österreichischen Vorgaben für rezyklierte Gesteinskörnung nicht abgedeckt werden, aber von besonderem Interesse für die Grundwasserqualität sind. So sind unter anderem erhöhte Werte für Aluminium, Molybdän, Vanadium, Mangan, Antimon und Strontium festgelegt [156], [157]. Die gemessenen Werte liegen teils über den Grenzwerten für Grundwasser im jeweiligen Studienland. Untersuchte Gesteinskörnungen aus Norwegen beispielsweise würden auch die in Österreich geltenden Indikatorwerte für Grundwasser für Nickel und Mangan bei pH 8 überschreiten [158], [159]. Dennoch ist prinzipiell die Auslaugung von Schadstoffen der rGK durch den Einschluss in einer Zementmatrix gehindert [160]. Eine Verwendung von rGK kann daher in Form von gebundenem Recyclingbeton, im Vergleich zu ungebundenen Systemen, vorteilhafter sein.

7 Bestehende Produkte am Markt

7.1 Bestehende rezyklierte Gesteinskörnung am Markt

Im folgenden Abschnitt soll ein Überblick über aktuelle rezyklierte Gesteinskörnung (rGK) am österreichischen Markt geschaffen werden. Die Produkte wurden auf den jeweiligen Herstellerseiten gefunden bzw. können in der vom BRV zur Verfügung gestellten Plattform „Recycling-Börse Bau“ aufgerufen werden (Link zur Webseite: <http://www.recycling.or.at/>). Die Börse dient im Sinne der Materialwertschöpfung zur Erfassung aktuell verfügbarer mineralische Baurestmasse und soll Anbieter und Interessierte vernetzen. In der *Tabelle 10* sind Beispiele unterschiedlicher rGK und deren Hersteller dargestellt.

Tabelle 10: Bestehende Recyclinggesteinskörnung am Markt (Stand Dezember 2025)

Produkt	Anbieter
RA 0/22	Brantner
RA 0/22 U-A	Regrub, Rohrdorfer, Lasselsberger (LB Recycling)
RA 0/32	RC-Himberg
RA I 0/22 U-A	RC-Retznei, Bernegger
RA I 0/32 U-A	Contracon, (Pittel+Brausewetter GmbH)
RA I 0/32 U-A	Hengl Mineral GmbH, contracon
RA II 0/16 U-A	Kieswerk Berta Nagele GmbH & Co KG, Kieswerk Mieders GmbH
RA II 0/22 U-A	Plattner & CO Kalkwerke Zirl in Tirol GmbH, Gubert GmbH
RA X/X U-A	Zöchling
RB 0/16	Wopfinger
RB 0/63	Brantner
RB 0/63 U-A	RC-Retznei
RB 0/63 U-A	Regrub, Lasselsberger (LB Recycling)
RB I 0/32 U3 U-A	Asphalt-Bau Oeynhausens GmbH, (BRG, Baustoff-Recycling GmbH)

Produkt	Anbieter
RB I 0/63 U3 U-A	Langes Feld GmbH
RB I 32/63	RC-Himberg
RB II 0/63 U7 U-A	Bernegger
RB III 0/32 U-A	Hengl Mineral GmbH
RB S 0/32	RC-Himberg
RB S 0/32 U1 U-A	Contracon
RB S 0/63	RC-Himberg
RB S 0/63 U1 U-A	Contracon
RB S 0/63 U2 U-A	Pittel+Brausewetter
RB x/x U-A	Zöchling
RG 0/32 U1 U-A	Contracon
RG S 0/63 A2 (Frostkoffer) U-A	Plattner & CO Kalkwerke Zirl in Tirol GmbH, Gubert GmbH, Kieswerk Mieders GmbH
RH-B 0/16	Wopfinger
RH-B 16/32	Wopfinger
RM 0/45	RC-Himberg
RM 0/63	RC-Himberg
RM 0/63 U-A	RC-Retznei
RM 0/63 U-A	Regrub, Rohrdorfer
RM I 0/32 U1 U-A	Contracon
RM I 0/32 U1 U-A	Contracon
RM I 0/32 U3	Langes Feld GmbH

Produkt	Anbieter
RM I 0/32 U3 U-A	Asphalt-Bau Oeynhausen GmbH, Ökotechna
RM I 0/63 U1 U-A	Contracon
RM I 0/63 U3 U-A	Kieswerk Berta Nagele GmbH & Co KG
RM I 0/63 U4 U-A	Gubert GmbH
RM II 0/63 U10 U-A	Bernegger, ASAMER
RM II 0/63 U6 U-A	Ökotechna, WIBAU Holding GmbH (BRG, Baustoff-Recycling GmbH)
RM II 0/63 U7 U-A	Bernegger, ASAMER
RM III 0/32 U10 U-A	Pittel+Brausewetter
RM III 0/63 U-A	Plattner & CO Kalkwerke Zirl in Tirol GmbH
RM X/X U-A	Zöchling
RMH 0/16	Wopfinger
RMH 0/63 U9 U-A	Asphalt-Bau Oeynhausen GmbH
RMH 0/63 U-A	RC-Retznei
RMH 0/63 U-A	Regrub, Lasselsberger (LB Recycling)
RMH 0-63	Brantner
RMH IV 0/90 U-A	Hengl Mineral GmbH
RS III 0/4 U-A	Asphalt & Beton GmbH
RS III 0/4 U-A	Contracon
RZ 0-4	Brantner
RZ 2/11	RC-Himberg
RZ 2/8	RC-Himberg
RZ 4-12	Brantner

RZ 8/11	RC-Himberg
RZ X/X U-A	Zöchling

7.2 Recyclingbeton am Markt

Ähnlich wie bei rGK gibt es eine von der Initiative ÖkoKauf Wien ins Leben gerufene Plattform „baubook Öko-BauKriterien“, welche sich der Erfassung zertifizierter Bauprodukte widmet. Neben Bauprodukten wie u.a. Dämmstoffen und Estrichen werden Informationen zu Ortbetonen, welche Sekundärrohstoffe inkludieren, zugänglich gemacht (Link zur Webseite: <https://www.baubook.at/oea/>).

Im folgenden Abschnitt werden national etablierte Recyclingbetonprodukte zusammengefasst.

Österreich:

- **GO2morrow Recycling Beton B20:** Produkt der Firma Baumit. Verwendung von 100 % rGK (Festigkeitsklasse C16/20). Für Anwendungen ohne statische Anforderungen. Im Einzelhandel erhältlich [161].
- **KLIMA PROTECT Trockenbeton C25/30:** Produkt der Firma Lasselsberger (Marke CEMIX - Verwendung von RB und CO₂-reduziertem Zement. Im Einzelhandel erhältlich [162].
- **Ökobeton R / Ökobeton+:** Produkte der Firma Wopfinger. Verwendung von rGK (Ökobeton R), sowie zusätzliche CO₂-Einsparungen durch Anpassung des Bindemittels (Ökobeton+) [163].
- **R-Beton / Klima R-Beton:** Produkte der Firma Rohrdorfer. Verwendung von rGK (R-Beton), sowie zusätzlich mit CO₂-Einsparungen durch Anpassung des Bindemittels (Klima R-Beton) [164].
- **ECOPact+:** Produkt der Firma Holcim. Verwendung von rGK mit zusätzlicher CO₂-Einsparung durch Anpassung des Bindemittels [165].
- **ecoTB:** Produkte der Firma Transportbeton (Asamer). Verwendung von rGK [166].
- **Tritech Ökobeton:** Produkt der Firma Hasenöhr. Verwendung von ziegelreichen Hochbaurestmassen [167].

Schweiz:

- **ECOPact+ / ECOPact RECARB:** Produkt der Firma Holcim. Verwendung von rGK mit zusätzlicher CO₂-Einsparung durch Anpassung des Bindemittels (ECOPact+). Zusätzliche Karbonatisierung der eingesetzten rGK (ECOPact RECARB) [168].
- **NovoCon:** Produkt der Firma Möckli Beton. Bis zu 100 % Einsatz von rGK [169].
- **zirkulit / zireco:** Produkt der Firma Eberhard Bau. Verwendung von rGK (zireco). Zusätzlich Karbonatisierung der verwendeten rGK und höherer Anteil an rGK (zirkulit) [170].
- **Greenline:** Produkt der Firma Kies + Beton Münchwilen. Verwendung von rGK [171].
- **Recyclingbeton:** Produkt der Firma Spross. Verwendung von rGK [172].

Deutschland:

- **Ecocrete R:** Produkt der Firma Heidelberg Materials. Nutzung von rGK im Ausmaß von mindestens 10 % und maximal 45 %. Auch in Kombination mit CO₂-Einsparungen durch Bindemitteländerungen [173].
- **R-Beton:** Produkte der Firma Rohrdorfer. Verwendung von rGK nach DAfStb-Richtlinie [174].
- **Vertua recycelte Materialien:** Produkt der Firma CEMEX. Nutzung von rGK [175].

Tschechische Republik:

- **Rebetong:** Produkt der Firma Skanska. Verwendung von rGK [176].

8 Einsatzbereiche für Recyclingbeton

Die zulässige Anwendung von rezyklierter Gesteinskörnung (rGK) in der Betonherstellung ist in Österreich normativ geregelt (siehe Kapitel 2). Je nach verwendetem Recycling Material sind unterschiedliche Austauschraten für Grob- und Feingut entsprechend der Expositionsclassen zulässig. Die Verwendung von rGK in Betonen für chemisch mäßig und stark angreifender Umgebung (XA2, XA3), sowie starke und sehr starke Verschleißbeanspruchung (Expositionsclassen XM2, XM3), ist nicht zulässig. Der Einsatz von rGK in Spannbeton und ermüdungsgefährdeten Bauteilen ist gegenwärtig in Österreich ebenfalls nicht erlaubt [24], [177].

In Deutschland ist ebenfalls die Anwendung von rGK in Spannbeton sowie in Betone für die Expositionsclassen XS3, XA2, XA3, XM1, XM2, XM3 nicht zugelassen [90]. Im Vergleich mit Österreich sind Anwendungen mit der Expositionsclassen XS3 und XM1 normativ nicht zugelassen. Die Expositionsclassen XS3, welche ein Risiko der Bewehrungskorrosion durch Chloride aus Meerwasser beschreibt, ist durch den fehlenden Meerzugang Österreichs jedoch hinfällig [178].

In der Schweiz ist die Verwendung von Recycling Mischgranulat für Spannbeton und ermüdungsgefährdete Bauteile nicht zulässig. Die Nutzung von rezykliertem Betonbruch bei entsprechenden Voruntersuchungen ist jedoch zulässig. Zudem ist die Verwendung von Recycling Mischgranulat nicht zulässig für die Betonsorten D, E, F und G (Tiefbau). Der Einsatz von Recycling Betonbruch für eine Betonsorte D ist nach entsprechender Voruntersuchung erlaubt [99]. Die relevanten Risiken und zugehörigen Expositionsclassen der nicht zulässigen Betonsorten sind, Angriff durch Frost und Frosttausalz (XF2, XF3, XF4), Bewehrungskorrosion durch Tausalz (XD1, XD2, XD3) chemisch mäßig und stark angreifende Umgebung (XA2, XA3) sowie die Expositionsclassen für Abwasserreinigungsanlagen (XAA). Im Vergleich zu Österreich ist daher die Anwendung von rGK strenger bezüglich der Exposition gegenüber Feuchtigkeit und Tausalzen. Für Verschleißbeanspruchung existiert keine eigene Expositionsclassen in der Schweiz [179].

Die Verwendung von RB ist in Österreich, Deutschland und der Schweiz unterschiedlich. Besonders in der Schweiz ist die Verwendung von rGK schon seit mehreren Jahren gängig, aber auch in Deutschland wurden schon im Jahr 2010 Ein- und Mehrfamilienhäuser mit RB-Anteilen gebaut [39]. Teilweise wird auch in Rahmen von Pilotprojekten über die normativen Vorgaben und Empfehlungen hinaus RB eingesetzt. Innerhalb Österreichs ist die Verwendung von RB in den Bauprojekten, welche im Rahmen des Projekts CICO der Salzburg Wohnbau durchgeführt werden, zu nennen [180]. Zudem wurde im Jahr 2023 das erste Mal RB bei der Errichtung eines öffentlichen Bauwerks in Wien eingesetzt [181]. In *Tabelle 11* sind einige aktuelle sowie in den letzten 6 Jahren abgeschlossene Bauprojekte mit RB innerhalb und außerhalb Österreichs gelistet.

Tabelle 11: Aktuelle und abgeschlossene Projekte mit RB in Österreich und Europa

Land	Stadt	Jahr	Kurzbeschreibung
AT	Schwarzach	2021	Wohnhaus mit 28 Wohnungen. Verwendung von Abbruchmaterial, Teil des Projekts CICO [182].
AT	Anif	2022	Neubau einer Volksschule, Verwendung von Abbruchmaterial, Teil des Projekts CICO [180].
AT	Siezenheim	2023	Neubau einer Volksschule, Verwendung von Abbruchmaterial, Teil des Projekts CICO [183].
AT	Wien	Im Bau	Bau einer Unterkunft für etwa 250 Mitarbeiter*innen. Ca. 1500 m ³ Recyclingbeton Fertigstellung geplant 2024. Erstes öffentliche Gebäude mit RB in Wien [181].
AT	Golling	Im Bau	Wohnhaus (36 Wohnungen) unter Verwendung von karbonatisierter rGK (Karbonatisierung von neustark). Teil des Projekts CICO [63].
AT	Wien	Im Bau	Segment der Innenschale eines U-Bahn-Tunnels aus RB [184].
DE	Würzburg	2019	Erster Einsatz von RB in einem öffentlichen Gebäude in Bayern. ~ 650 m ³ RB [185].
DE	Sindelfingen	2020	Einsatz von RB in der Fassade [186].
DE	Pirmasens	2021	25 m ² großer Pavillon aus RB-Halbfertigteilen mit Ortbetonergänzung. 35 % rGK. Entstand im Rahmen von SeRaMCo [187].
DE	München	2021	20 m ² großer Pavillon, 100 % rGK, gebaut von Studierenden der Hochschule München [188].
DE	Heek	2023	Erstes Recyclinghaus aus Betonfertigteilen, Innenwandelemente (tragend und nichttragend) aus 100 % rGK, Austausch insgesamt 75 % [189], [190].
DE	Nürnberg	2023	Sanierung des Volksbads, 1500 m ³ RB [191].
DE	Augsburg	2023	Errichtung einer künstlichen Surfwellen in Augsburg für Wassersport, 100 % rGK [192].
DE	Düsseldorf	2023	Baubeginn 2020, Treppenhauskern aus RB [193].
DE	Heiden	2023	Produktion von Betonfertigteilen mit RB [194].
DE	Geilenkirchen	im Bau	Ersatzneubau Finanzamt Geilenkirchen, Baubeginn 2022 [195].
DE	München	Im Bau	Einsatz von 100 % rGK für Bohrpfahlwand und Bodenplatte eines Bürokomplexes [196].
DE	Wangen	Im Bau	Soziales Wohnquartier bestehend aus 6 Gebäuden, ~9000 m ³ RB, rGK von abgerissenen Seniorenheim [197].

Land	Stadt	Jahr	Kurzbeschreibung
DE	Ulm	Im Bau	Tiefgarage eines Anker-Anlieger Projekts [198].
DE	Esslingen	Im Bau	Neubau des Landratsamt, Verwendung von RB, wesentlicher Teil des Rohbaus aus RB [199].
CH	Kreuzlingen	2020	Erweiterungsbau der pädagogischen Hochschule Thurgau, 80 % RB [200].
CH	Grellingen	2021	Errichtung einer Stützmauer mit 95 % Recyclinganteil, Tiefbau Pilotprojekt [201].
CH	Frauenfeld	Im Bau	Ergänzungsbau zum Regierungsgebäude, etwa 50 % RB [202].
CH	Zug	Im Bau	~ 4200 m ³ RB. Zusammenarbeit von Holcim und neustark. Karbonatisierung der rGK durch neustark, Aufbereitung und Zement Herstellung durch Holcim [64], [203].
LI	Schaan	Im Bau	Neubau des Firmenareals aus 100 % RB, ~ 8000 m ³ RB [204].
FR	Paris	Im Bau	Sozialer Wohnbau aus 100 % RB. Fertigstellung geplant Ende 2024 [205].

9 Forschungsprojekte

In

Tabelle 12 sind einige Beispiel nationaler sowie europäische Forschungsprojekte der letzten Jahre gelistet, welche neben den Themen Recyclingbeton (RB), rezyklierte Gesteinskörnung (rGK) und Recycling-Feinanteile (RF) auch andere dazu im Bezug stehende Bereiche inkludieren. Die behandelten Fragestellungen umfassen exemplarisch neben "Carbon Capture and Storage" auch Karbonatisierung von Stoffströmen der Zementproduktion, Weiterentwicklungen von Abfallsortierung, Sekundärrohstoffquellen und Transportwegoptimierungen.

Tabelle 12: Forschungsprojekte zu den Themen Recyclingbeton, Recyclinggesteinskörnung und darüber hinaus

rGK / RB / RF	Land	Akronym	Projektname	Laufzeit	Fokus des Projektes
RB, rGK	ES	IRCOW	Innovative Strategies for High-Grade Material Recovery from Construction and Demolition Waste	2011-2014	Erhöhung der Wiederverwendungsrate von Komponenten von Baurestmassen, Entwicklung von Recyclingtechnologien für höhere Qualität an Recyclingmaterial aus gemischten Abfallströmen, Entwicklung Hochqualitativer Produkte unter Verwendung von Recyclingmaterial, Basis für Europäische Richtlinien setzen [206].
rGK, RF	NL	C2CA	Advanced Technologies for the Production of Cement and Clean Aggregates from Construction and Demolition Waste	2011-2015	Entwicklung neuartiger Aufbereitungs-/Sortierungstechnologien für RG, thermische Behandlung von Calciumreichen Fraktionen zur Herstellung neuer Bindemittel [207].
RB	IT	EnCoRe	Environmentally-friendly solutions for Concrete with Recycled and natural components	2012-2014	physikalische und mechanische Eigenschaften von Recyclingbeton, Recyclingbeton mit Recycling Fasern, Beton mit natürlichen Fasern [208].

RB, rGK, RF	FR	recybeton	Complete recycling of concrete	2012-2018	Verwendung aller Stoffströme des Baurestmassenrecyclings [209].
rGK / RB / RF	Land	Akronym	Projektname	Laufzeit	Fokus des Projektes
RB, rGK	DE	R-Beton	Ressourcenschonender Beton - Werkstoff der nächsten Generation	2014-2018	Einsatz und Anwendung von RG in Baustoffen + Ökobilanz, Versuche mit RG, Bestehende Hemmnisse ausräumen, Erforschung von R-Zusatzmittel, Optimierung der Aufbereitung von RG, Einführung DIN 4226-101:2017-08 [210].
RB, rGK	ES	HISER	Holistic Innovative Solutions for an Efficient Recycling and Recovery of Valuable Raw Materials from Complex Construction and Demolition Waste	2015-2019	Sortier- und Recyclingtechnologien zur Gewinnung von reinen Materialien aus gemischten Baurestmassen, Entwicklung und Optimierung von Bauprodukten unter Verwendung von höheren Anteilen an Sekundärrohstoffen [211].
RB	IT	RE4	designing solutions for circular buildings, integrating recycled materials from construction and demolition waste	2016-2020	Weiterentwicklung von Sortiertechnologie für Baurestmassen, Reduktion von Primärrohstoffverbrauch, Entwicklung neuer Betonrezepturen [212].
RB	UK	GREEN IN-STRUCT	Green Integrated Structural Elements for Retrofitting and New Construction of Buildings	2016-2020	Betonfertigteile mit über 70 % Recyclinganteil [213].

RB, rGK	IT	VEEP	Cost-Effective Recycling of CDW in High Added Value Energy Efficient Prefabricated Concrete Components for Massive Retrofitting of our Built Environment	2016-2021	Umweltbewusste Produktgestaltung, Zirkuläres Baurestmassenrecycling, Betonrezepturen mit mindestens 75 w.% Recyclingmaterial [214].
rGK / RB / RF	Land	Akronym	Projektname	Laufzeit	Fokus des Projektes
RB	IT	FuRIC	Future Recycled Inert Concrete Made of Steelworks Residues	2017-2018	Austausch von Natürlicher Gesteinskörnung durch Hüttensand [215].
RB	DE	SeRaMCo	Secondary Raw Materials for Concrete Precast Products	2017-2020	Verbesserung von Baurestmassenaufbereitung, Entwicklung und Testung neuer Betonrezepturen für Betonfertigteile [216].
rGK	FR	Fastcarb	accelerated carbonation of recycled concrete aggregates	2018-2021	Karbonatisierung von rezyklierter Gesteinskörnung [217].
RB, rGK, RF	NL	BNB	Concrete to high quality concrete	2018-2022	Herstellung von Betonfertigteilen mit hohem Recyclinganteil, Innovative Aufbereitung, Mikrowellenbehandlung [218].
RB, rGK	GB	TRAC	Tailor-made Recycled Aggregate Concretes	2018-2024	Forschung an ITZ, Mikrostruktur, SCMs in RB, Festigkeitsprüfungen, Kostenanalyse RG in RB [219].
RB	DK	CIRCuiT	Circular Construction in Regenerative Cities	2019-2023	Verwertungsorientierter Rückbau [220].

RF	CH	Swisscarb	Swisscarb	2019-unbekannt	Reduktion von CO ₂ Ausstoß bei der Zementproduktion durch Carbon Capture and Utilization (CCU) Ansatz, Ausstoß aus der Zementproduktion nutzen um Betonabbruch zu karbonatisieren, Karbonatisierung des Feinanteils [221].
RB, rGK, RF	DE	Baucycle	Baucycle	2020-2022	Sortierung und Aufbereitung von Baurestmassen, Herstellung von Recycling Baustoffen [222].
rGK / RB / RF	Land	Akronym	Projektname	Laufzeit	Fokus des Projektes
RB, rGK	GB	Code-DEMO	Construction and Demolition Waste - based "Green" demountable structural components	2021-2023	Zementfreie Betonfertigteile (Geopolymere) aus 100 % Baurestmassen [223].
RB	AT	CICO	Circular Concrete	2021-2024	Betonrecycling und Digitalisierung des Prozesses [180].
RB, rGK	DE	THINK-TANK HollisCon	Machbarkeitsstudie für ganzheitliches Betonrecycling - Anforderungen, Potenzialanalyse und Handlungsempfehlungen	2022-2023	Umfassendes Betonrecycling, Ersatz aller Betonrohstoffe durch Sekundärrohstoffe, Machbarkeitsanalyse und Handlungsempfehlungen zum Betonrecycling [224].
RB	AT	CRUFI	Modelling of transient thermal and moisture performance of concrete structures and prediction of reinforcement corrosion	2022-2024	Entwicklung von instationären Vorhersagemodellen. Korrosionsgefährdung von Bewehrung. Einfluss von Karbonatisierung, Einsatz Chlorid-belastetes Material [225].
rGK	AT	CO2 max	CO2 max	2022-unbekannt	Ergänzungsprojekt zum Projekt CICO. Karbonatisierung von RG [226].

rGK, RB	AT	Upcycling&CO2storage	Upcycling von Fahrbahnplatten mit CO2-Speicherung	2023-2024	Herstellung von Betonfertigteilen (Fahrbahnplatten) unter Verwendung von rGK und Speicherung von CO ₂ [227].
RB	AT	CarboRate	CO ₂ -Aufnahmepotenzial von Beton durch Karbonatisierung	2023-2023	Karbonatisierung von Recyclingmaterial, Karbonatisierungstiefe und CO ₂ -Aufnahmepotential, Einfluss auf Produkteigenschaften [228].
RB, rGK	AT	-	Upcycling von Fahrbahnplatten mit CO2-Speicherung	2023-2025	Verwendung von recycelten Baumaterialien, das aus alten Fahrbahnplatten gewonnen wird [229].
rGK / RB / RF	Land	Akronym	Projektname	Laufzeit	Fokus des Projektes
RB	LU	RECOMPOSE	Resource Efficient Steel - Recycled Aggregate Concrete Composite Floor Systems	2023-2025	Verwendung von RB in Stahlbetonböden [230].
RF	NO	W2WGCO2	Waste to Worth: A green solution for waste concrete powder and incinerator bottom ash reinforced by CO2 capturing in concrete	2023-2025	Verwendung von RF und Rostaschen als Zementersatzstoffe [231].
RF	DK	DETOCS	Data to Enable Transformation and Optimisation for Concrete Sustainability	2023-2027	Verwendung von RF als Zementersatzstoff [232].
rGK, RF	FR	Circo ₂ Beton	Circo ₂ Beton	2024-2026	Auftrennung von Baurestmassen, Karbonatisierung von Zementstein [233].
RF	DE	-	Aktivierung von Zementstein als Weg zur Dekarbonatisierung von Beton	2024-?	Vergleich von thermischer Aktivierung sowie nasser Karbonatisierung von Zementstein aus Abbruchbeton [234].

RB, rGK, RF	DE	Bn	Bauwerk zu Bauwerk zu Bindemittel	2024-?	Entwicklung erneuerbarer Gesteinskörnung für Leichtbeton sowie Verwendung von Rezyklierten Bindemitteln [235].
RF	DE	re-CEM	Anwendbarkeit von recycelten Betonfeinanteilen als SCM durch CCU	2024-?	Charakterisierung der Eigenschaften und Verwendung von RF zur Herstellung von SCM [236].
RF	NL	C2CA	Revolutionary solution to unlock concrete-to-concrete circularity	2025-2027	Errichtung einer Aufbereitungsanlage zur Herstellung von Bindemittel aus Betonabbruch. Folgeprojekt des gleichnamigen Projekts.[237].
rGK / RB / RF	Land	Akronym	Projektname	Laufzeit	Fokus des Projektes
RF	FI	CEMCON	Cement from concrete – A circular solution for recycled concrete fines into supplementary cementitious material	2026-2028	Verwendung von RF als SCM in Zement [238].
weiteres	AT	ZEROWIN	Towards zero waste in industrial networks	2009-2014	Entwicklung von Abfallvermeidungsstrategien auch in Bezug auf den Bausektor [239].
weiteres	FI	Superbuildings	Sustainability and performance assessment and benchmarking of buildings	2010-2012	Indikatoren und Benchmarks für die Nachhaltigkeit von Gebäuden [240].
weiteres	ES	ECO-Cement	New microbial carbonate precipitation technology for the production of high strength, economic and ecological Cement	2012-2015	Enzymbasierte Karbonatisierung mittels Bionik zur Produktion von Ökologischem Zement [241].
weiteres	NO	CEMCAP	CO ₂ capture from cement production	2015-2018	Großtechnische CO ₂ -Abscheidung (Carbon Capture (CC)) mit Fokus auf Zementwerken [242].

weiteres	BE	BAMB	Buildings as Material Banks: Integrating Materials Passports with Reversible Building Design to Optimise Circular Industrial Value Chains	2015-2019	Prävention von Baurestmassenanfall, Reduzierung von Primärrohstoffverbrauch [243].
weiteres	DE	KartAL III	Kartierung des anthropogenen Lagers III	2017-2022	Urbanmining in Deutschland, anthropogenes Rohstofflager Deutschland [244].
rGK / RB / RF	Land	Akronym	Projektname	Laufzeit	Fokus des Projektes
weiteres	FR	TRACK4R EUSE	Defining new waste traceability standards for the green Demolition and Construction industry	2020-2022	Optimisierung von Transportwegen für Abbruch- und Baumaßnahmen [245].
weiteres	SP	ICEBERG	Innovative Circular Economy Based solutions demonstrating the Efficient recovery of valuable material Resources from the Generation of representative End-of-Life building materials	2020-2024	Verbesserung des Abfallmanagement im Bausektor, Entwicklung von Technologien für Produktion von reinen Sekundärrohstoffen, Erhöhung des Vertrauens in Material aus Baurestmassen [246].
weiteres	CH	demoupCARMA	Demonstration and Upscaling of Carbon dioxide Management solutions for a net-zero Switzerland	2021-2025	CCUS und CCTS [247].
weiteres	DE	Smart Recycling UP	KI-basierte Methoden zur automatischen Sortierung großstückiger Abfälle	2022-2024	Sensor- und Roboterbasierte Abfallsortierung [248].

weiteres	CH	Low CM	Low carbon magnesium based binders	2023-2027	Teilweiser Austausch von Portlandzement durch hydratisierte Magnesiumcarbonate [249].
-----------------	----	--------	------------------------------------	-----------	---

rGK / RB / RF	Land	Akronym	Projektname	Laufzeit	Fokus des Projektes
weiteres	NO	CIRCULess	UpCycling mineral and timber-based waste from Construction & manufacturing process industries through eco-design, advanced logistics, quality control and digital solutions	2024-2027	Verbesserung des Abfallmanagement im Bausektor. Entwicklung von zirkulären Produkten [250].
weiteres	DE	A-COMBS	Aktive Karbonatisierung poröser mineralischer Bindemittelsysteme	2024-tba	Karbonatisierung von aufgeschäumten mineralischen Bindemitteln zur Beschleunigung der Karbonatisierung [251].
weiteres	DE	-	Bau einer Upcycling-Anlage für Baurestmassen unter Einsatz eines Farbsortierers mit NIR-Technik	2024-tba	Einsparungen von Primärrohstoffen und Deponievolumen durch hohe Rückgewinnungsraten beim Baustoff-Recycling [252].

10 Patente zu Recyclinggesteinskorn und Recyclingbeton

Zu den Themen Aufbereitung von rezyklierter Gesteinskörnung (rGK), Recyclingbeton (RB) und Recycling-Feinanteile (RF) konnten einige Patente aus den vergangenen Jahren recherchiert werden und sind in *Tabelle 13* zusammengefasst. Da die Patente aus verschiedenen Jurisdiktionen stammen, variieren ihre rechtliche Gültigkeit und ihr territorialer Schutzbereich. Es wird kein Anspruch auf Vollständigkeit gestellt.

Tabelle 13: Übersicht relevanter Patente rund um rGK, RB und RF

Einreichung	Patent	Kurzbeschreibung
2024	DE202024002079U1	Ersatz von Natursand durch Brechsand nach Veredelung [253].
2024	US2024391830A1	Methode zur Gewinnung von rGK [254].
2024	WO2024194222A1	Verbesserung der Eigenschaften von rGK durch mikrobielle Zusatzstoffe [255].
2023	WO2024256758A1	Methode für Betonrecycling unter Verwendung von Mikrowellen [256].
2023	US2024190767A1	Methode zur Gewinnung von RF zur Substituierung von Zement [257].
2023	US2023242444A1	Behandlung von rGK aus Betonabbruch in einer CO ₂ -Kammer [258].
2022	US2024262743A1	Nasse Aufbereitungsmethode für Betonbruch [259].
2022	JP2023182465A	Methode zur Gewinnung und Karbonatisierung von rGK [260].
2022	JP2023182463A	Methode zur Herstellung von RF [261].
2022	US2024034675A1	Nasse Karbonatisierung von rGK [262].
2022	KR102468125B1	Anlage zur Herstellung von rGK [263].
2022	EP4324801A1	Bindemittel auf Basis von karbonatisiertem RF [264].
2022	KR102445384B1	Gerät zur Beschichtung von rGK [265].
2022	US2022340490A1	Material mit niedriger Druckfestigkeit, das Betonabbruch beinhaltet [266].
2021	AU2021104544A4	Herstellung von rGK und Behandlung mit Silikastaub [267].
2021	KR102282149B1	Modifizierung eines Prallbrechers zur Herstellung von rGK [268].
2021	KR102309810B1	Aufbereitungsanlage zur Gewinnung von rGK [269].

Einreichung	Patent	Kurzbeschreibung
2021	WO2021254902A1	Verfahren und Anlage zur Aufbereitung von Betonabbruch zur Wiederverwendung in Frischbeton [270].
2019	KR102188071B1	Betonrezeptur mit rGK [271].
2019	EP3744700B1	Verbessertes Verfahren und Vorrichtung zur Karbonatisierung von Betonabfall [272].
2018	DE102018120331B3	Verwendung von rGK aus Betonabbruch für Herstellung von Beton. Brechen mit Hochdruckrollenpresse, Agglomerieren und erneutes Brechen zum Erhalt homogener Korngrößenverteilung [273].
2018	KR102127491B1	Methode zur Gewinnung von rGK [274].
2018	DE202018105762U1	Betonmischung die natürliche Gesteinskörnung in Teilen oder ganz durch rezyklierte Bauabfälle ersetzt [275].
2018	EP3724147B1	Verwendung von CO ₂ aus Abgasen zur Herstellung von Klinkererersatzmaterials [276].
2017	EP3498681A1	Verwendung von kohlenstoffhaltigen, wiederverwendeten Betonteilchen als zusätzliches Zementmaterial [277].
2013	EP2895436B9	Herstellung eines Zuschlagstoffs und Calciumcarbonat durch Behandlung von Betonabbruch mit CO ₂ [278].
2012	EP2708520A1	Verfahren zur Herstellung von Zuschlag sowie von Kalziumkarbonat aus Beton-Gesteinskörnung sowie eine Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens [279].
2010	US8226765B1	Fertigbeton mit mindestens 70 % grober rGK und Flugasche [280].
2009	CN101560073A	Methode zum Recycling von Betonabbruch. Brechen, Sieben, Formen, Schleifen und Mischen von Komponenten [281].
2008	EP2183193B1	Bindemittelherstellung durch Mahlung von Betonabbruch [282].
2008	EP2192095A1	Herstellung eines hydraulischen Bindemittels aus feinkörnigen Rückständen der Baurestmassenaufbereitung [283].
2001	WO0158822A1	Verwendung von Bruchglas in Beton als teilweiser oder vollständiger Ersatz für natürliche Gesteinskörnung [284].
1995	DE19548645A1 (Patent erloschen)	Herstellung von hochwertigen Sekundärrohstoffen aus sortenreinen Baurestmassen [285].

11 Zusammenfassung

11.1 Gesetzliches Reglement

Österreich hat sich im Zuge der Gesetzesvorlage „Fit for 55“ zu einer Klimaneutralität bis zum Jahr 2040 verpflichtet. Dies entspricht eine Zielerhöhung bis zum Jahr 2030 auf minus 48 Prozent gegenüber dem Jahr 2005 in den Sektoren außerhalb des EU-Emissionshandels. Weiters umfasst der „Masterplan Rohstoffe 2030“ die Wettbewerbsfähigkeit in Bezug auf mineralische primäre und sekundäre Stoffe entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Der Ausbau der Kreislaufwirtschaft soll dazu beitragen, die nachhaltige Versorgung mit Ressourcen zu stärken.

Mit Hilfe der europäischen Umwelntaxonomie Verordnung ist ein Dokument geschaffen worden, welches bei Neubauten einen Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz definiert. Dabei ist z.B. der Einsatz von Sekundärrohstoffen bei Neubauten auf mindestens 30 % definiert. Dieser Wert gilt jeweils für die Summe aus Beton, Naturwerkstein und Agglomeratstein.

Als weiteren besonderen Punkt im österreichischen Recht ist das Deponieverbot von Betonbruch zu sehen. Gegenwärtig wird der gesamte Anfall von Betonbruch im Straßenbau eingesetzt, jedoch kann das rezyklierte Material ebenfalls im Hochbau verwendet werden. Der Einsatz von Betonbruch ist durch den Transportweg beschränkt und bedarf im Einzelfall eine ökologische Abschätzung, um eine Emissionsreduzierung zu ermöglichen.

Die rechtliche Steuerung der sekundären Stoffwege wird in der Baustoff Recycling Verordnung festgelegt. Hier werden neben Einsatzszenarien sowie chemische und physikalische Kennwerte von rezyklierten mineralischen Baurestmassen festgelegt. Darüber hinaus wird in der ÖNORM B 4710-1 der Einsatz von rezyklierte Gesteinskörnung (rGK) für Anwendungsfälle festgelegt. Hierbei sind Austauschraten sowie granulometrische Kennwerte verankert.

11.2 Technischer Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung

Rezyklierte Gesteinskörnung kennzeichnet sich durch eine sogenannte „Interfacial Transition Zone“ (ITZ), welche durch die heterogene Zusammensetzung von altem Zementstein und ursprünglicher Gesteinskörnung hervorgerufen wird. In diesem Bereich ist durch die Aufbereitung vor allem mit einer erhöhten Porosität und Dichte an Mikrorissen zu rechnen und führt in der Regel zu einer geringeren Festigkeit sowie Verarbeitbarkeit bei steigender Austauschrate. Dies hat auch zur Ursache, dass für Betonklassen eine Austauschrate von natürlicher Gesteinskörnung mit rGK in nationalen Normen mit Maximaldosierungen geregelt ist.

Ein Blick in das nahe Umfeld Österreichs zeigt, dass z.B. in den Niederlanden sowie in der Schweiz eine rechtliche Basis für höhere Austauschraten bereits besteht und industriell eingesetzt wird. Durch eine bessere Quantifizierung der Eigenschaften könnten diese ebenfalls in Österreich evaluiert und angehoben werden.

11.3 Aufbereitung und nationale Verbesserungsmaßnahmen

Ein besonderes Problem beim Einsatz von Sekundärrohstoffen stellt hierbei die notwendige Aufbereitung von rGK dar. Hierbei wird Betonbruch in verschiedensten Anlagen aufbereitet, um dem gesetzlich verankerten Deponieverbot entgegen zu kommen. Dadurch werden die rGK gesammelt, gebrochen und klassifiziert, sowie nach gesetzlichen Anforderungen für die wirtschaftliche Weiterverarbeitung zertifiziert. Diese werden meist gewaschen, um den meist hohen nicht zulässigen Feinanteil der rezyklierten Gesteinskörnung gemäß ÖNORM B 4710-1 zu reduzieren.

Unabhängig dazu, ist ebenfalls der Einsatz von rGK im Bezug auf die Expositionsklasse des Betons geregelt. Der ursprünglich eingesetzte sekundäre Rohstoff muss derzeit unabhängig einer Aufbereitung, zumindest der Expositionsklasse des neu hergestellten Betonwerkstoffes entsprechen.

Die Aufbereitung ist besonders im Bezug auf die Transportwege ebenfalls schwer abzuschätzen, da dieser zumeist den bestimmenden ökologischen Fußabdruck festlegt. Dadurch werden mobile Anlagen und Verwendung in Projekten, welche lokal verfügbar sind, besonderem Augenmerk geschenkt. Der Einsatz von mobilen Anlagen ist jedoch durch eine erhöhte Lärm- und Staubbelastung eingeschränkt. Zusätzlich ist die Qualität dieser rGK limitiert, da mobile Anlagen meist nur eine einstufige Aufbereitung bewerkstelligen können.

11.4 Konklusion

Der Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung (rGK) sowie die Schließung aller mineralischen Stoffkreise wird in Österreich durch gesetzliche Maßnahmen gefördert. Die Verwendung ist durch Umwelt-relevante Kennwerte, sowie durch eine Festlegung und Klassifizierung im Bezug auf die technische Verwertbarkeit, eingeschränkt.

Rezyklierte Gesteinskörnungen werden in der Regel durch Waschen aufbereitet, wobei die Qualität der rGK im Vergleich zum ursprünglichen Material abnimmt. Es existieren keine industriellen Verfahren für die Herstellung von hochwertigeren rGK aus dem ursprünglichen Material. Dadurch ist bei einem vollständigen Einsatz von 100% rGK mit geringen Festigkeiten und Verarbeitbarkeit zu rechnen.

Transportwege sind die Emissionstreibenden Faktoren bezüglich der Herstellung von rGK und sollten z.B. mit Hilfe von mobilen Anlagen besonders gering gehalten werden.

11.5 Ausblick

Durch gegenwertige Wissenslücken besteht international ein Bestreben, Verfahren sowie Einsatzgebiete zu erforschen, welche den Einsatz von rGK vereinfacht. Hierbei sind unter anderem Aufbereitungsschritte, welche z.B. aus Karbonatisierung der rGK und Aktivierung von rezykl. Feinanteilen in der Literatur auffindbar. International werden unterschiedlich hohe Austauschraten normativ zugelassen und können für Österreich einen zukünftigen Ausblick für einen vermehrten Einsatz von rGK bieten.

Die Karbonatisierung von rGK wird vor allem durch NEUSTARK in Europa ausgebaut. Auch in Österreich sind zukünftig mehr Projekte möglich. Auch wenn das Verfahren die Eigenschaften nicht notwendigerweise verbessern würde, besteht ein grundsätzliches Interesse daran, CO₂ im Baumaterial zu speichern, um die Ökobilanz zu verbessern. Dennoch ist kein industrieller Maßstab im Moment erkennbar, welcher einheitlich die Verbesserung von rGK für den Einsatz in Baustoffen möglich macht.

Es bedarf einer eindeutigen Strategie und ein besseres Verständnis der Materialeigenschaften von rGK um die Stoffkreisläufe auch bei wiederholtem Einsatz von rGK komplett zu schließen.

12 Literaturverzeichnis

- [1] OECD, *Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences*. OECD, 2019. doi: 10.1787/9789264307452-en.
- [2] Europäische Kommission, Ed., "Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft. Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa".
- [3] K. Voit, J. Hron, and K. Bergmeister, "FÜR EINEN NACHHALTIGEN BETONBAU".
- [4] "Waste statistics." Accessed: May 12, 2025. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics
- [5] European Commission, "Construction and demolition waste." Accessed: May 12, 2025. [Online]. Available: https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/construction-and-demolition-waste_en
- [6] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Ed., "Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2023, Teil 1".
- [7] eurostat, "Material flow accounts and resource productivity." Accessed: May 12, 2025. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Material_flow_accounts_and_resource_productivity
- [8] Europäische Union, *Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien*. 2008. Accessed: May 13, 2025. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/98/2024-02-18/eng>
- [9] European Commission. Joint Research Centre., *Use of recycled aggregates in concrete: opportunities for upscaling in Europe*. LU: Publications Office, 2023. Accessed: May 12, 2025. [Online]. Available: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/144802>
- [10] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU RECYCLAGE, Ed., "Technical Factsheets Construction & Demolition Waste - Recycled Aggregates (example The Netherlands)." Accessed: May 12, 2025. [Online]. Available: <https://webdog.brbs.nl/files/FIR-Factsheet-on-Recycled-Aggregates-Example-The-Netherlands.pdf>
- [11] A. Müller, *Baustoffrecycling: Entstehung - Aufbereitung - Verwertung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. doi: 10.1007/978-3-658-22988-7.
- [12] *COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS The European Green Deal*. 2019. Accessed: May 12, 2025. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52019DC0640>
- [13] Vereinte Nationen, "17 Ziele," Vereinte Nationen - Regionales Informationszentrum für Westeuropa. Accessed: May 12, 2025. [Online]. Available: <https://unric.org/de/17ziele/>
- [14] *RIS - Übereinkommen von Paris - Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 12.05.2025*. Accessed: May 12, 2025. [Online]. Available: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20009674>
- [15] Bundesministerin für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Ed., "KreislaufBAUwirtschaft Projekt-Endbericht 2021." Accessed: May 12, 2025. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0757.pdf>

- [16] Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, "Masterplan Rohstoffe 2030." 2030.
- [17] Bundesministerin für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Ed., "Österreich auf dem Weg zu einer nachhaltigen und zirkulären Gesellschaft."
- [18] Umweltbundesamt, Ed., "Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich - Statusbericht 2023."
- [19] Circle Economy, Ed., "The Circularity Gap Report Austria." Accessed: May 12, 2025. [Online]. Available: <https://www.ara.at/uploads/Dokumente/Circularity-Gap-Report/CGR-Austria-Folder-2019.pdf>
- [20] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, energie, Mobilität, Innovation und Technologien, Ed., "Die österreichische Kreislaufwirtschaft."
- [21] Magistrat der Stadt Wien, Ed., "Smart City Wien Rahmenstrategie 2019-2050." 2019.
- [22] Magistrat der Stadt Wien, Ed., *Smart Klima City Strategie Wien: der Weg zur Klimamusterstadt*. Wien: Magistrat der Stadt Wien, 2022.
- [23] Handwerk und Bau, "Die OIB-Richtlinie 7: Inhalt und Zeitplan." Accessed: May 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.handwerkundbau.at/bauen/die-oib-richtlinie-7-inhalt-und-zeitplan-46865/>
- [24] *ÖNORM B 4710-1: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität - Teil 1: Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206 für Normal- und Schwerbeton*, ÖNORM B 4710-1, 2018.
- [25] *RIS - Deponieverordnung 2008 - Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 13.05.2025*. Accessed: May 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20005653>
- [26] Bundesministerin für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Ed., "144. Verordnung der Bundesministerin für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie: Änderung der Deponieverordnung 2008."
- [27] S. Bischof, P. Lunk, and U. Stüssi, "Vergleichende Ökobilanz," *Tec21*, vol. 136, no. 24, Jun. 2010, doi: 10.5169/SEALS-109622.
- [28] "Ökobilanzen rezyklierter Gesteinskörnung für Beton." 2010. Accessed: May 13, 2025. [Online]. Available: https://www.iip.kit.edu/downloads/Holcim_Forschungsbericht_dt_2011.pdf
- [29] Jeske, U., Buchgeister, J., Schebek, L., and Weil, M., "Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung - eine Ökobilanz," *Nachrichten - Forschungszentrum Karlsr*, vol. 36, p. 219, 2004.
- [30] Grieder, A., "Recycling-Beton in Bauvorhaben der Stadt Zürich, Vortrag im Rahmen von naBe-Webinar: Einsatz von Recycling-Beton und CO2-reduzierten Betonen," Feb. 16, 2023.
- [31] "Ökobilanzen rezyklierter Gesteinskörnung für Beton." 2010. Accessed: May 13, 2025. [Online]. Available: https://www.iip.kit.edu/downloads/Holcim_Forschungsbericht_dt_2011.pdf
- [32] K. Weimann and C. Hoffmann, "Ressourceneffizienz im Betonrecycling - Rahmen und Möglichkeiten in Deutschland und der Schweiz," presented at the R'13 - Fachtagung Recycling (Proceedings), 2013. Accessed: Feb. 12, 2024. [Online]. Available: <https://opus4.kobv.de/opus4-bam/frontdoor/index/index/docId/30061>
- [33] D. Katerusha, F. Schmid, and D. Oetiker, "Einsatz von Recyclingbeton fördern: D versus CH," *Zürcher Umweltpraxis und Raumentwicklung*, Nov. 2020.

- [34] E. Sterk, "Willingness to Pay for Recycled Aggregates in Concrete among German Construction Clients," Philipps-Universität Marburg, School of Business and Economics, Nov. 2023. [Online]. Available: <https://www.econstor.eu/handle/10419/278495>
- [35] J. Geng, Y. Huang, X. Li, and Y. Zhang, "Overcoming Barriers to the Adoption of Recycled Construction Materials: A Comprehensive PEST Analysis and Tailored Strategies," *Sustainability*, vol. 15, no. 19, p. 14635, Oct. 2023, doi: 10.3390/su151914635.
- [36] J. Lederer, A. Gassner, F. Kleemann, and J. Fellner, "Potentials for a circular economy of mineral construction materials and demolition waste in urban areas: a case study from Vienna," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 161, p. 104942, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104942.
- [37] O. Mair and Tinkhof, G. Simader, G. Trnka, and N. Altmann-Mavaddat, "Entwicklung einer praxisorientierten replizierbaren Rückbaustrategie zur Forcierung des verwertungsorientierten Rückbaus," Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/schriftenreihe-2019-31-rbau.pdf
- [38] D. Katerusha, "Barriers to the use of recycled concrete from the perspective of executing companies and possible solution approaches - case study Germany and Switzerland," *Resour. Policy*, vol. 73, p. 102212, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.resourpol.2021.102212.
- [39] B. Wang, L. Yan, Q. Fu, and B. Kasal, "A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 171, p. 105565, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105565.
- [40] K. L. Scrivener, A. K. Crumbie, and P. Laugesen, "The Interfacial Transition Zone (ITZ) Between Cement Paste and Aggregate in Concrete," *Interface Sci.*, vol. 12, no. 4, pp. 411–421, Oct. 2004, doi: 10.1023/B:INTS.0000042339.92990.4c.
- [41] European Commission. Joint Research Centre., *Use of recycled aggregates in concrete: opportunities for upscaling in Europe*. LU: Publications Office, 2023. Accessed: Nov. 10, 2023. [Online]. Available: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/144802>
- [42] D. Matias, J. de Brito, A. Rosa, and D. Pedro, "Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates – Influence of the use of superplasticizers," *Constr. Build. Mater.*, vol. 44, pp. 101–109, Jul. 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.011.
- [43] A. A. Bahraq, J. Jose, M. Shameem, and M. Maslehuddin, "A review on treatment techniques to improve the durability of recycled aggregate concrete: Enhancement mechanisms, performance and cost analysis," *J. Build. Eng.*, vol. 55, p. 104713, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.job.2022.104713.
- [44] "Crushing it with game changing concrete upcycling technology." Accessed: Feb. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.holcim.com/who-we-are/our-stories/advanced-crushing-processing-system-france>
- [45] "Closing the loop: Heidelberg Materials to produce low-carbon cement from demolished concrete in France," Heidelberg Materials. Accessed: Feb. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.heidelbergmaterials.com/en/pr-2023-07-12>
- [46] "C2CA Technology," C2CA Technology. Accessed: Mar. 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.c2ca.tech/technology>
- [47] I. Wichmann, R. Firdous, and D. Stephan, "Upcycling of demolition material from concrete and brick for the production of cold-bound, alkali-activated lightweight aggregates," *Mater. Struct.*, vol. 56, no. 7, p. 135, Sep. 2023, doi: 10.1617/s11527-023-02216-7.

- [48] J. M. Torrenti *et al.*, “The FastCarb project: Taking advantage of the accelerated carbonation of recycled concrete aggregates,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 17, p. e01349, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01349.
- [49] “Holcim nimmt mobile Anlage für CO₂-Speicherung in Betrieb.” Accessed: Feb. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.holcim.ch/de/holcim-nimmt-mobile-anlage-fuer-co2-speicherung-betrieb>
- [50] “Build With CarbonCure,” CarbonCure Technologies Inc. Accessed: Feb. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.carboncure.com/concrete-producers/>
- [51] “Ready Mix, Precast Concrete Products | Solidia Technologies™.” Accessed: Feb. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.solidiatech.com/products/>
- [52] “reCO₂ver Concrete Recycling.” Accessed: Feb. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.sika.com/en/knowledge-hub/reco2ver-concrete-recycling.html>
- [53] “Environmentally sound building material | products goals.” Accessed: Feb. 01, 2024. [Online]. Available: <https://oxara.earth/products>
- [54] “Technology,” Carbon Upcycling. Accessed: Feb. 01, 2024. [Online]. Available: <https://carbonupcycling.com/technology/>
- [55] “Technology,” MCI Carbon. Accessed: Feb. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.mineralcarbonation.com/technology>
- [56] “Carbon8 to deploy its pioneering technology at Vicat Group cement company in France,” Carbon8. Accessed: Feb. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.carbon8.co.uk/news/carbon8-systems-to-deploy-its-pioneering-technology-at-vicat-group-cement-company-in-france>
- [57] “CarbonBuilt Ultra-Low Carbon Concrete for Green Construction.” Accessed: Feb. 01, 2024. [Online]. Available: <https://carbonbuilt.com/>
- [58] “Game-Changing Concrete Technology,” CarbiCrete. Accessed: Feb. 01, 2024. [Online]. Available: <https://carbicrete.com/technology/>
- [59] “Technologie.” Accessed: Feb. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.carbstone.be/de/technologie/>
- [60] “How definitive is the CO₂ storage in Pirrouet® carbonation bricks? | Vandersanden.” Accessed: Feb. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.vandersanden.com/en-uk/how-definitive-co2-storage-pirrouetr-carbonation-bricks>
- [61] CRH plc, “CRH 2022 Sustainability Performance Report,” Mar. 2023. Accessed: Feb. 01, 2024. [Online]. Available: https://www.crh.com/media/4748/crh-2022-sustainability-performance-report_interactive.pdf
- [62] RecyclingPortal, “Neustark eröffnet die erste kommerzielle Anlage für permanente CO₂-Speicherung in der EU.” Accessed: Feb. 01, 2024. [Online]. Available: <https://recyclingportal.eu/Archive/81384>
- [63] S. Nachrichten, “In Golling entstehen aus Bauschutt 36 ökologische Wohnungen,” Salzburger Nachrichten. Accessed: Jan. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.sn.at/salzburg/wirtschaft/in-golling-bauschutt-wohnungen-148450066>
- [64] “Baustart ‘Zephyr Ost’ – Das bislang grösste Bauprojekt mit klimafreundlichem Beton.” Accessed: Jan. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.holcim.ch/de/baustart-zephyr-ost-das-bislang-groesste-bauprojekt-mit-klimafreundlichem-beton>
- [65] “Climate-Tech-Pionier neustark und Holcim mit wegweisender...,” Neustark DE. Accessed: Feb. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.neustark.com/de/news/climate-tech-pionier-neustark-und-holcim-mit-wegweisender-partnerschaft-zur-permanenten-kohlenstoffentfernung-2-2>

- [66] "Recycling-Baustoffverordnung." Accessed: Dec. 22, 2023. [Online]. Available: https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/abfall/recht/vo/recycling.html
- [67] "RIS - Recycling-Baustoffverordnung - Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 26.11.2023." Accessed: Nov. 26, 2023. [Online]. Available: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20009212>
- [68] *ÖNORM B 3131: Gesteinskörnungen für Beton - Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 12620*, ÖNORM B 3131, 2016.
- [69] *ÖNORM EN 12620: Gesteinskörnungen für Beton*, ÖNORM EN 12620, 2014.
- [70] *ÖNORM B 3140: Rezyklierte Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Anwendungen sowie für Beton*, ÖNORM B 3140, 2020.
- [71] *RIS - Recycling-Baustoffverordnung - Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 07.04.2025*. Accessed: May 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20009212>
- [72] *RIS - Abfallwirtschaftsgesetz 2002 - Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 08.01.2024*. Accessed: Jan. 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20002086>
- [73] *RIS - Altlastensanierungsgesetz - Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 13.05.2025*. Accessed: May 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10010583>
- [74] *RIS - Abfallnachweisverordnung 2012 - Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 13.05.2025*. Accessed: May 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20008021>
- [75] *RIS - Abfallverzeichnisverordnung 2020 - Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 13.05.2025*. Accessed: May 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20011285>
- [76] *RIS - Festsetzungsverordnung gefährliche Abfälle - Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 02.01.2020*. Accessed: May 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10011043&FassungVom=2020-01-02>
- [77] Europäische Union, *Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates*. 2011. Accessed: Dec. 11, 2023. [Online]. Available: <http://data.europa.eu/eli/reg/2011/305/oj/deu>
- [78] "EU-27: construction & demolition waste recovery by country," Statista. Accessed: May 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/1316268/recovery-rate-of-construction-and-demolition-waste-eu-by-country/>
- [79] *ÖNORM EN 933-11: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 11: Einteilung der Bestandteile in grober recycelter Gesteinskörnung (konsolidierte Fassung)*, ÖNORM EN 933-11, 2011.

- [80] ÖNORM B 3151: Rückbau von Bauwerken als Standardabbruchmethode, ÖNORM B 3151, 2022.
- [81] ÖNORM EN ISO 16000-32: Innenraumluftverunreinigungen - Teil 32: Untersuchung von Gebäuden auf Schadstoffe (ISO 16000-32:2014), ÖNORM EN ISO 16000-32, 2014.
- [82] ÖNORM EN 1744-1: Prüfverfahren für chemische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Chemische Analyse, ÖNORM EN 1744-1, 2013.
- [83] ÖNORM EN 13242: Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische für Ingenieur- und Straßenbau, ÖNORM EN 13242, 2014.
- [84] DIN EN 12620: Gesteinskörnungen für Beton, DIN EN 12620, 2008.
- [85] DIN 4226-101: Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 - Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen(Gilt in Verbindung mit DIN EN 12620 (2008-07)), DIN 4226-101, 2017.
- [86] DIN 4226-102: Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 - Teil 102: Typprüfung und Werkseigene Produktionskontrolle(Gilt in Verbindung mit DIN 4226-101 (2017-08), DIN EN 12620 (2008-07)), DIN 4226-102, 2017.
- [87] DIN EN 933-1: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung - Siebverfahren; Deutsche Fassung EN 933-1:2012, DIN EN 933-1, 2012.
- [88] DIN EN 1744-1: Prüfverfahren für chemische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Chemische Analyse; Deutsche Fassung EN 1744-1:2009+A1:2012, DIN EN 1744-1, 2013.
- [89] DIN EN 206: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, DIN EN 206, 2021.
- [90] DIN 1045-2: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton, DIN 1045-2, 2023.
- [91] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V. (DAfStb), DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620. 2010.
- [92] "Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen – MVV TB 2024/1," Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Berlin, Deutschland, Jan. 2024. Accessed: May 19, 2025. [Online]. Available: https://www.dibt.de/fileadmin/dibt-website/Dokumente/Referat/P5/Technische_Bestimmungen/MVVTB_2024-1.pdf
- [93] SN EN 12620+A1: Gesteinskörnungen für Beton, SN EN 12620+A1, 2008.
- [94] "Richtlinie zur Verwertung mineralischer Bauabfälle," Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern, Schweiz, 2006. Accessed: May 19, 2025. [Online]. Available: https://archiv.llv.li/files/au/pdf-llv-au-richtlinie_verw_mineral_bauabfaelle.pdf
- [95] SIA 262/1: Betonbau – Ergänzende Festlegungen, SIA 262/1, 2019.
- [96] SN EN 206+A2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, SN EN 206+A2, 2021.
- [97] SN EN 933-11: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 11: Einteilung der Bestandteile in grober recycelter Gesteinskörnung, SN EN 933-11, 2009.
- [98] SN EN 1744-1+A1: Prüfverfahren für chemische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Chemische Analyse, SN EN 1744-1, 2014.
- [99] SIA 2030: Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen, SIA 2030, 2021.

- [100] *Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA).*
- [101] Regierung des Fürstentums Liechtenstein, Ed., "Liechtensteiner Abfallplanung 2012 – 2070, Teil I: Analyse Ist-Zustand".
- [102] Regierung des Fürstentums Liechtenstein, Ed., "Liechtensteiner Abfallplanung 2070, Teil IV: Umweltbericht".
- [103] *NEN 5905: Dutch supplement to NEN-EN 12620 "Aggregates for concrete,"* NEN 8005, 2005.
- [104] *NEN-EN 12620:2002+A1: Aggregates for concrete,* NEN-EN 12620, 2008.
- [105] *NEN-EN 206+A2: Concrete - Specification, performance, production and conformity,* NEN-EN 206+A2, 2021.
- [106] *NEN 8005: Dutch supplement to NEN-EN 206: Concrete - Specification, performance, production and conformity,* NEN 8005, 2022.
- [107] CROW, "CROW-CUR Aanbeveling 106: Beton mit feinen Fraktionen aus Recyclinggranulaten als feinem Zuschlagstoff." 2014. [Online]. Available: <https://www.cur-aanbevelingen.nl/artikelen/cur-aanbeveling-106>
- [108] CROW, "CROW-CUR Aanbeveling 112: Beton mit Betongranulat als grobem Zuschlagstoff." 2014. [Online]. Available: <https://www.cur-aanbevelingen.nl/artikelen/cur-aanbeveling-112>
- [109] CROW, "CROW-CUR Aanbeveling 127: Beton mit Betongranulat als feinem und/oder grobem Zuschlagstoff." 2021. [Online]. Available: <https://www.crow.nl/kennisproducten/crow-cur-aanbeveling-1272021/>
- [110] M. Ottelé, "Positief toekomstbeeld dankzij nieuwe recyclingmethoden beton," May 2022. Accessed: May 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.slimbreker.nl/downloads/2022-05-18%20Cement%203%20-%20Positief%20toekomstbeeld%20dankzij%20nieuwe%20recyclingmethoden%20beton.pdf>
- [111] *JIS A 5021: Recycled aggregate for concrete-Class H,* JIS A 5021, 2024.
- [112] *JIS A 5022: Recycled Aggregate Concrete-Class M,* JIS A 5022, 2024.
- [113] *JIS A 5023: Recycled Aggregate Concrete – Class L,* JIS A 5023, 2024.
- [114] *JASS 5N: Standard Specifications for Concrete Construction,* JASS 5N, 2013.
- [115] H. Koga, H. Katahira, and A. Shimata, "The introduction of recycled-aggregate concrete specifications in Japan and the research into the freezing–thawing resistance of recycled-aggregate concrete," *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 24, no. 4, pp. 1207–1215, Jul. 2022, doi: 10.1007/s10163-022-01412-x.
- [116] *DS 206: Beton – Specifikation, egenskaber, produktion og overensstemmelse – Regler for anvendelse af EN 206 i Danmark,* DS 206, 2024.
- [117] *DS 2426: Beton – Materialer – Regler for anvendelse af EN 206-1 i Danmark,* DS 206, 2009.
- [118] C. Vintimilla and M. Etxeberria, "Limiting the maximum fine and coarse recycled aggregates-Type A used in structural concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 380, May 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131273.
- [119] *NBN B 15-001: Béton – Spécification, performances, production et conformité – Complément national à la NBN EN 206:2013+A2:2021,* NBN B 15-001:2024, 2024.

- [120] *NBN EN 206+A2: – Beton – Spezifikation, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*, NBN EN 206:2013+A2:2021, 2021.
- [121] Circulair Betonakkoord Vlaanderen, “Vlaams Betonakkoord – Ambities en de te ondernemen acties,” Nov. 2022. Accessed: May 13, 2025. [Online]. Available: https://mcusercontent.com/bdb1dc6b809e338317db7aaf7/files/1e7483bb-dc97-9cf9-a215-40cd2f5535c1/144666_VlaamsBetonakkoord_ambities_acties_v2.pdf
- [122] K. Weimann, J. Matyschik, C. Adam, T. Schulz, E. Linß, and A. Müller, “Optimierung des Rückbaus/Abbaus von Gebäuden zur Rückgewinnung und Aufbereitung von Baustoffen unter Schadstoffentfrachtung (insbes. Sulfat) des RC-Materials,” Feb. 2013. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/optimierung-des-rueckbausabbaus-von-gebaeuden-zur>
- [123] A. Bernhardt, F. Kleemann, C. Neubauer, M. Neubauer, and B. Walter, “DATENANALYSE ZUR BEHANDLUNG VON MINERALISCHEN BAU- UND ABBRUCHABFÄLLEN IN ÖSTERREICH,” Umweltbundesamt.
- [124] R. V. Silva, J. De Brito, and R. K. Dhir, “Availability and processing of recycled aggregates within the construction and demolition supply chain: A review,” *J. Clean. Prod.*, vol. 143, pp. 598–614, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.070.
- [125] J.-L. Gálvez-Martos, D. Styles, H. Schoenberger, and B. Zeschmar-Lahl, “Construction and demolition waste best management practice in Europe,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 136, pp. 166–178, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2018.04.016.
- [126] *RIS - Jahresabfallbilanzen (Abfallbilanzverordnung) - Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 08.01.2024*. Accessed: Jan. 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20006160>
- [127] Toshio YONEZAWA, Yukio KAMIYAMA, Kunio YANAGIBASHI, Masaro KOJIMA, Kazuaki ARAKAWA, and Masaru YAMADA, “A study on a Technology for Producing High Quality Recycled Coarse Aggregate”.
- [128] H. Shima, H. Tateyashiki, R. Matsushashi, and Y. Yoshida, “An Advanced Concrete Recycling Technology and its Applicability Assessment through Input-Output Analysis,” *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 3, no. 1, pp. 53–67, 2005, doi: 10.3151/jact.3.53.
- [129] A. Müller and I. Martins, *Recycling of Building Materials: Generation - Processing - Utilization*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022. doi: 10.1007/978-3-658-34609-6.
- [130] “SmartCrusher bv - Concrete recycling - c2c.” Accessed: Jan. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.slimbreker.nl/smartcrusher.html>
- [131] M. Zogg, *Einführung in die mechanische Verfahrenstechnik*, 3., Überarb. Aufl. Stuttgart: Teubner, 1993.
- [132] K. GmbH, “Brechtechnik | Technologie | Kleemann.” Accessed: Jan. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.wirtgen-group.com/de-at/produkte/kleemann/technologien/brechtechnik/>
- [133] “Brechanlagen,” RUBBLE MASTER. Accessed: Jan. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.rubblemaster.com/de/produkte/brechanlagen/>
- [134] “Rockster - Mobile Brecher.” Accessed: Jan. 09, 2024. [Online]. Available: <https://rockster.at/>
- [135] “SBM Mineral Processing GmbH Österreich - Mobile Prallbrecher REMAX.” Accessed: Jan. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.sbm-mp.at/de/produkte/aufbereitungsanlagen-mobil/mobile-prallbrecher.html>

- [136] H. Martens and D. Goldmann, *Recyclingtechnik: Fachbuch für Lehre und Praxis*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016. doi: 10.1007/978-3-658-02786-5.
- [137] “Sternsieb, Sternsiebmaschine, Sternsiebtechnik, MULTISTAR.” Accessed: Jan. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.albg.eu/produkte/sternsieb-multistar.html>
- [138] “Funktionsweise von Sternsieben - Butzer EVR - Entwicklung und Vertrieb von Siebmaschinen.” Accessed: Jan. 12, 2024. [Online]. Available: <https://butzer-evr.de/funktion-sternsieb/>
- [139] “WINDSICHTER ZZS,” WINDSICHTER ZZS. Accessed: Jan. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.tst.de/produkte/windsichter/windsichter-zzs>
- [140] “ADR,” C2CA Technology. Accessed: Jan. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.c2ca.tech/has-1-1>
- [141] “ADR dry separation technology | Suomen Erityisjäte Oy.” Accessed: Jan. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.erityisjate.fi/research-and-future/innovations-and-technologies/adr-dry-separation-technology/>
- [142] “C&D Waste,” ZenRobotics. Accessed: Jan. 22, 2024. [Online]. Available: <https://www.terex.com/zenrobotics/waste-types/construction-demolition-waste>
- [143] “Trommelsiebe,” Busschers. Accessed: Jan. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.busschers.nl/de/recyclingtechnik/produkte/trommelsiebe/>
- [144] “allmineral – allair® – nachhaltige Trockenaufbereitung,” allmineral Aufbereitungstechnik GmbH & Co. KG. Accessed: Jan. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.allmineral.com/produkte/allair/>
- [145] K. Weimann, “Untersuchungen zur Nassaufbereitung von Betonbrechsand unter Verwendung der Setzmaschinenteknik,” 2006.
- [146] K. Weimann, “Untersuchungen zur Nassaufbereitung von Betonbrechsand unter Verwendung der Setzmaschinenteknik,” Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), 2009. Accessed: Dec. 22, 2023. [Online]. Available: <https://opus4.kobv.de/opus4-bam/frontdoor/index/index/docId/107>
- [147] M. Scheibengraf and H. Reisinger, “ABFALLVERMEIDUNG UND -VERWERTUNG: BAURESTMASSEN - Detailstudie zur Entwicklung einer Abfallvermeidungs- und verwertungsstrategie für den Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2006,” Umweltbundesamt.
- [148] Clement, K. Hammer, and P. H. Brunner, “Konzept zur nachhaltigen Nutzung von Baurestmassen basierend auf der thematischen Strategie für Abfallvermeidung und Abfallrecycling der EU-EnBa_Endbericht_Action 6,” Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2010.
- [149] PORR Umwelttechnik, “Behandlungsanlagen.” Accessed: May 13, 2025. [Online]. Available: <https://put.at/leistungen/abfallmanagement/behandlungsanlagen/>
- [150] “Aufbereitung von Müllverbrennungsschlacken,” brantner Entsorgung. Facility Services. Accessed: Jan. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.brantner.com/de/entsorgung/forschung-umwelt/schlackenaufbereitung.html>
- [151] “Recycling,” Terex Washing Systems. Accessed: Jan. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.terex.com/washing/de/applications/recycling/recycling>
- [152] “Sand Washing & Waste Recycling Processing Equipment.” Accessed: Jan. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.cdegroupp.com/products>
- [153] Österreichischer Baustoff Recycling Verband, Ed., “Richtlinie für Recycling-Baustoffe, 10. Auflage Stand 2023.”

- [154] A. Standards, "ÖNORM B 3140: 2020 11 01 - Rezyklierte Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Anwendungen sowie für Beton." Accessed: Feb. 09, 2024. [Online]. Available: https://shop.austrian-standards.at/action/de/public/details/684687/OENORM_B_3140_2020_11_01;jsessionid=1405C84B552AFA745A8E5A381CC85A1C
- [155] Weimann, Karin; Matyschik, Jan; Adam, Christian; Schulz, Juni 2012, Tabea; Linß, Elske; Müller, Anette, and Dr.-Ing. Karin Weimann, Dipl.-Ing. Jan Matyschik, Dr.-Ing. Christian Adam, Dipl.-Ing. Tabea Schulz, Dr.-Ing. Elske Linß, Prof.Dr.-Ing. habil. Anette Müller, "Optimierung des Rückbaus/Abbaus von Gebäuden zur Rückgewinnung und Aufbereitung von Baustoffen unter Schadstoffentfrachtung (insbes. Sulfat) des RC-Materials," Umweltbundesamt, Apr. 2013. Accessed: Dec. 22, 2023. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/optimierung-des-rueckbausabbaus-von-gebaeuden-zur>
- [156] C. J. Engelsens, H. A. Van Der Sloot, and G. Petkovic, "Long-term leaching from recycled concrete aggregates applied as sub-base material in road construction," *Sci. Total Environ.*, vol. 587–588, pp. 94–101, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.052.
- [157] N. Gupta, "Recycled concrete aggregate as road base: Leaching constituents and neutralization by soil Interactions and dilution," *Waste Manag.*, 2018.
- [158] *RIS - Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser - Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 28.05.2024.* Accessed: May 28, 2024. [Online]. Available: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20006738>
- [159] C. J. Engelsens, H. A. Van Der Sloot, G. Wibetoe, H. Justnes, W. Lund, and E. Stoltenberg-Hansson, "Leaching characterisation and geochemical modelling of minor and trace elements released from recycled concrete aggregates," *Cem. Concr. Res.*, vol. 40, no. 12, pp. 1639–1649, Dec. 2010, doi: 10.1016/j.cemconres.2010.08.001.
- [160] M. Cabrera, A. P. Galvín, and F. Agrela, "Leaching issues in recycled aggregate concrete," *New Trends Eco-Effic. Recycl. Concr.*
- [161] Baumit, "Baumit Go2morrow Recycling Beton B20," baumit.at. Accessed: Jan. 23, 2024. [Online]. Available: <https://baumit.at/produkte/garten-beton/trockenbetone/baumit-go2morrow-recycling-beton-b20>
- [162] "Grüner bauen Klima Protect Beton C25/30 lasselsberger cemix - Cemix." Accessed: Jan. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.cemix.at/de/produkte/gruenerbauen/gruener-bauen-klima-protect-beton-C25-30.html>
- [163] "ÖKOBETONE - Wopfinger Transportbeton." Accessed: Jun. 03, 2025. [Online]. Available: <https://wopfinger.com/produkte/oekobetone.html>
- [164] Rohrdorfer Transportbeton, Ed., "Produktfolder Nachhaltige Betone." Accessed: Jan. 23, 2024. [Online]. Available: https://www.rohrdorfer.at/strapi/uploads/Produktfolder_Nachhaltige_Betone_intranet_4068a8fe21.pdf
- [165] "holcim_beton_preisliste." Accessed: Jan. 23, 2024. [Online]. Available: https://www.holcim.at/fileadmin/Bibliothek/3_Loesungen/Beton/holcim_beton_preisliste_010923.pdf
- [166] Asamer, "ecoTB." Accessed: Jan. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.transportbeton.at/eco-tb>
- [167] "Beton Trittech – Ökobeton." Accessed: Jan. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.hasenoehrl.at/leistungen/beton/>

- [168] "ECOPact+ und ECOPact RECARB." Accessed: Jan. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.holcimpartner.ch/de/produkte/beton/ecopactplus>
- [169] C. M.-M. B. NovCon, "Recyclingbeton NovoCon," RC-Beton, Recycling-Beton & Beton - Möckli Beton AG Wir schliessen Kreisläufe. Accessed: Jan. 23, 2024. [Online]. Available: <https://beton-rc.ch/recyclingbeton-novocon>
- [170] "Eberhard_Baustoffe_Preisliste_2024." Accessed: Jan. 23, 2024. [Online]. Available: https://eberhard.ch/fileadmin/PDFs/PDFs_Preislisten/preislisten_2024/Eberhard_Baustoffe_Preisliste_2024_Doppelseiten.pdf
- [171] "Broschuere-K-B-Recycling-Beton-Web.pdf." Accessed: Jan. 23, 2024. [Online]. Available: https://www.kies-und-beton.ch/fileadmin/user_upload/Kies_und_Beton/PDF_Firmenbroschueren/Broschuere-K-B-Recycling-Beton-Web.pdf
- [172] "Recyclingbeton." Accessed: Jan. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.spross.com/recyclingbeton>
- [173] "Der nachhaltige Beton EcoCrete® – Mehr Zukunft mit weniger CO₂," Heidelberg Materials Deutschland. Accessed: Jan. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.heidelbergmaterials.de/de/beton-und-fliessestrich/produkte/nachhaltiger-beton-ecocrete>
- [174] "Preisliste_Beton_2024." Accessed: Mar. 26, 2024. [Online]. Available: https://www.rohrdorfer.eu/wp-content/uploads/2022/01/Preisliste_Beton_Ganser_2024_HighRes.pdf
- [175] "R-Beton | CEMEX Deutschland AG." Accessed: Jan. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.cemex.de/produkte/beton/r-beton>
- [176] "Rebetong," www.skanska.cz. Accessed: Jan. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.skanska.cz/co-delame/specialni-cinnosti/vyroba-dodavka-a-cerpani-betonu/rebetong/>
- [177] Güteverband Transport Beton, Ed., "Betonwegweiser – Der richtige Transportbeton für jede Anwendung. – Betonnorm ÖNORM B 410-1 Know-How, 1. Ausgabe." Jul. 2019.
- [178] Informations Zentrum Beton GmbH, Ed., "Zement-Merkblatt Betontechnik B9: Expositionsclassen für Betonteile im Geltungsbereich des EC2." Jul. 2021.
- [179] TFB AG Technik und Forschung im Betonbau, Ed., "Expositionsclassen-von-Beton-nach-SN-EN-206-und-SIA-262-1."
- [180] "Forschungsprojekt CICO geht in nächste Stufe," Salzburg Wohnbau. Accessed: Feb. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.salzburg-wohnbau.at/forschungsprojekt-cico-geht-in-naechste-stufe/>
- [181] Presse-Service, "Archivmeldung: 48er als Vorreiter: Erstmals Einsatz von Recyclingbeton in öffentlichem Bauwerk der Stadt Wien," Presseservice der Stadt Wien. Accessed: Jan. 24, 2024. [Online]. Available: <https://presse.wien.gv.at/presse/2023/08/02/48er-als-vorreiter-erstmals-einsatz-von-recyclingbeton-in-oeffentlichem-bauwerk-der-stadt-wien>
- [182] "Schwarzach, Bergstraße," Salzburg Wohnbau. Accessed: Jan. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.salzburg-wohnbau.at/projekte/schwarzach-mietwohnungen/>
- [183] R. Wernik and T. Maierhofer, "BAUEN IN DER KREISLAUFWIRTSCHAFT – GEHT DAS?," *Österr. Ing.-Archit.-Z.*, 2022.
- [184] "Recycling-Beton beim U-Bahn-Bau," Handwerk und Bau. Accessed: May 20, 2025. [Online]. Available: <https://www.handwerkundbau.at/bauen/recycling-beton-beim-wiener-u-bahn-bau-54777/>

- [185] "Gebäude aus Recyclingbeton - Beton.org." Accessed: Jan. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.beton.org/news/presse/details/gebaeude-aus-recyclingbeton/>
- [186] M.-B. Group, "Mercedes-Benz präsentiert mit der Factory 56 die Zukunft der Produktion," Mercedes-Benz Group. Accessed: Jan. 30, 2024. [Online]. Available: <https://group.mercedes-benz.com/innovation/digitalisierung/industrie-4-0/eroeffnung-factory-56.html>
- [187] "Recyclingbeton-Pavillon." Accessed: Jan. 24, 2024. [Online]. Available: https://www.detail.de/de_de/recyclingbeton-pavillon
- [188] V. Spätling, "Pavillon aus Recycling-Beton," db deutsche bauzeitung. Accessed: Jan. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.db-bauzeitung.de/news/pavillon-aus-recycling-beton/>
- [189] "Home," Büscher - Zurück für die Zukunft. Accessed: Jan. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.zurueckfuerdiezukunft.de/>
- [190] "Perfektes Recycling: Vollelektrische und emissionsfreie Brech- und Siebanlagen von Keestrack verwandeln Bauschutt in einen nachhaltigen Baustoff.," Keestrack. Accessed: Jan. 24, 2024. [Online]. Available: <https://keestrack.com/de/news-press/perfektes-recycling-vollelektrische-und-emissionsfreie-brech-und-siebanlagen-von>
- [191] "Einsatz von innovativem Recycling-Beton." Accessed: Jan. 24, 2024. [Online]. Available: <https://nuernbergbad.nuernberg.de/volksbad/bautagebuch/details/news/einsatz-von-innovativem-recycling-beton/>
- [192] "Surfwelle Augsburg aus Recyclingbeton mit Carbonbewehrung erhält Auszeichnung." Accessed: Jan. 24, 2024. [Online]. Available: https://www.bayika.de/de/aktuelles/meldungen/2023-09-19_Surfwelle-Augsburg-aus-Recyclingbeton-mit-Carbonbewehrung-erhaelt-Auszeichnung.php
- [193] "The Cradle, Düsseldorf." Accessed: Jan. 24, 2024. [Online]. Available: <https://porr.de/projekte/the-cradle/>
- [194] "Nachhaltigkeit," Brüninghoff Group. Accessed: Jan. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.brueninghoff.de/fokus-zukunft/nachhaltigkeit/>
- [195] "bvse – Recycling-Beton für nachhaltigen Ersatzneubau des Finanzamts Geilenkirchen." Accessed: Jan. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.bvse.de/gut-informiert-mineralik/nachrichten-mineralik/8775-recycling-beton-fuer-nachhaltigen-neubau-des-finanzamts-geilenkirchen.html>
- [196] "Urban Mining in München: Geosystems liefert Spezialzement," Rohrdorfer. Accessed: Jan. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.rohrdorfer.eu/urban-mining-in-muenchen-geosystems-liefert-spezialzement/>
- [197] "Vinzenz-Areal/Wangen: Abbruchmaterial wird zu Rohstoff." Accessed: Jan. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.kommunaldirekt.de/abbruchmaterial-wird-zu-rohstoff/>
- [198] "Spatenstich Weinberg," Scherr+Klimke AG | Generalplanung+ | We make it work. Accessed: Jan. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.scherr-klimke.de/unternehmen/aktuelles/spatenstich-weinberg/>
- [199] "Neubauprojekt Landratsamt Esslingen | STRABAG WORK ON PROGRESS." Accessed: Jan. 30, 2024. [Online]. Available: <https://work-on-progress.strabag.com/de/material-kreislaufwirtschaft/kreislaufgerecht-bauen-landratsamt-in-esslingen>
- [200] Kantonales Hochbauamt Amt für Umwelt, "Einsatz von Recyclingbeton im Hochbau."
- [201] "Pilotprojekt in Baselland: Recyclingbeton im Tiefbau eingesetzt," Baublatt. Accessed: Jan. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.baublatt.ch/baubranche/pilotprojekt-in-baselland-recyclingbeton-im-tiefbau-eingesetzt>

- [202] S. Marolf, "Abfallbericht Thurgau: Recyclingbeton im Ergänzungsbau," Thurgauer Zeitung. Accessed: Jan. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.thurgauerzeitung.ch/ostschweiz/kanton-thurgau/abfall-400-kilo-kehricht-pro-kopf-und-immer-mehr-recycling-beton-im-kanton-thurgau-werden-aus-alten-waenden-neue-id.2544262>
- [203] M. Sutter, "In Zug entsteht ein «Leuchtturmprojekt»," Energie-Agentur der Wirtschaft. Accessed: Jan. 24, 2024. [Online]. Available: <https://enaw.ch/in-zug-entsteht-ein-leuchtturmprojekt/>
- [204] "Neues Firmenareal zu 100% aus Recyclingbeton :: Gebr. Hilti AG." Accessed: Jan. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.hiltibau.li/ueber-uns/news/neues-firmenareal-zu-100-aus-recyclingbeton>
- [205] "Holcim and Seqens to build world's first fully recycled concrete building." Accessed: Jan. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.holcim.com/media/company-news/seqens-first-fully-recycled-concrete-building>
- [206] "Innovative Strategies for High-Grade Material Recovery from Construction and Demolition Waste | IRCOW | Projekt | Fact Sheet | FP7," CORDIS | European Commission. Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/265212>
- [207] "Advanced Technologies for the Production of Cement and Clean Aggregates from Construction and Demolition Waste | FP7 | CORDIS | Europäische Kommission," CORDIS | European Commission. Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/265189/reporting/de>
- [208] "Environmentally-friendly solutions for Concrete with Recycled and natural components | FP7," CORDIS | European Commission. Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/295283/reporting>
- [209] "RECYBETON," RECYBETON. Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.pnrecybeton.fr/en/>
- [210] "WiTraBau: Detail." Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: [https://www.hightechmatbau.de/projekte/detail/?tx_spprojects_projects\[project\]=3&tx_spprojects_projects\[action\]=show&tx_spprojects_projects\[controller\]=Project](https://www.hightechmatbau.de/projekte/detail/?tx_spprojects_projects[project]=3&tx_spprojects_projects[action]=show&tx_spprojects_projects[controller]=Project)
- [211] "Holistic Innovative Solutions for an Efficient Recycling and Recovery of Valuable Raw Materials from Complex Construction and Demolition Waste | HISER | Projekt | Informationsblatt | H2020 | CORDIS | Europäische Kommission," CORDIS | European Commission. Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/642085/de>
- [212] "REuse and REcycling of CDW materials and structures in energy efficient pREfabricated elements for building REfurbishment and construction | RE4 | Projekt | Informationsblatt | H2020 | CORDIS | Europäische Kommission," CORDIS | European Commission. Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/723583/de>
- [213] "Green Integrated Structural Elements for Retrofitting and New Construction of Buildings | GREEN INSTRUCT | Projekt | Results | H2020," CORDIS | European Commission. Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/723825/results>
- [214] "Cost-Effective Recycling of CDW in High Added Value Energy Efficient Prefabricated Concrete Components for Massive Retrofitting of our Built Environment | VEPP | Projekt | Results | H2020," CORDIS | European Commission. Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/723582/results>
- [215] "Future Recycled Inert Concrete Made of Steelworks Residues | H2020," CORDIS | European Commission. Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/791490/reporting>

- [216] “SeRaMCo: Secondary Raw Materials for Concrete Precast Products.” Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: <https://vb.nweurope.eu/projects/project-search/seramco-secondary-raw-materials-for-concrete-precast-products/>
- [217] “FastCarb,” FastCarb. Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: <https://fastcarb.fr/en/home/>
- [218] “Concrete to high quality concrete - BnB | Upcycling Concrete - BnB.” Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: <https://upconcrete.vito.be/en>
- [219] “Tailor-made Recycled Aggregate Concretes | TRAC | Projekt | Arkusz informacyjny | H2020 | CORDIS | Komisja Europejska,” CORDIS | European Commission. Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/777823/pl>
- [220] “Circular Construction In Regenerative Cities (CIRCulT) | CIRCulT | Projekt | Fact Sheet | H2020,” CORDIS | European Commission. Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/821201>
- [221] neustark, “Pilotprojekt „Swisscarb“: Verminderung von CO2 in der Zementherstellung.” Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: <https://ethz.ch/content/dam/ethz/main/industry/industry-relations/News/2021/December/Medienmappe%20JURA%20ETH%20neustark.pdf>
- [222] “BauCycle: Recycling von Baustoffen - Fraunhofer UMSICHT,” Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT. Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/projekte/baucycle-recycling-baustoffe.html>
- [223] “Construction and Demolition Waste-based ‘Green’ Demountable Structural Components | CodeDEMO | Projekt | Fact Sheet | H2020,” CORDIS | European Commission. Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/894100>
- [224] H. P. Petrillo (inaktiv), “THINKTANK HolisCon - Machbarkeitsstudie für ganzheitliches Betonrecycling - Anforderungen, Potenzialanalyse und Handlungsempfehlungen.” Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: https://www.iip.kit.edu/1064_5942.php
- [225] “CRUFI.” Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: <https://projekte.ffg.at/projekt/4321238>
- [226] “CO2 max | Neues Forschungsprojekt für klimafreundliches Bauen gestartet,” Wirtschaftszeit | Hier informiert sich die Wirtschaft. Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.wirtschaftszeit.at/news/co2-max-neues-forschungsprojekt-fuer-klimafreundliches-bauen-gestartet/>
- [227] “Upcycling&CO2storage.” Accessed: May 20, 2025. [Online]. Available: <https://projekte.ffg.at/projekt/4685648>
- [228] “CarboRate.” Accessed: May 20, 2025. [Online]. Available: <https://projekte.ffg.at/projekt/4548162>
- [229] “Upcycling von Fahrbahnplatten mit CO2-Speicherung - BOKU FIS.” Accessed: May 20, 2025. [Online]. Available: <https://forschung.boku.ac.at/de/projects/15574>
- [230] “Resource Efficient Steel - Recycled Aggregate Concrete Composite Floor Systems | RECOMPOSE | Projekt | Fact Sheet | HORIZON,” CORDIS | European Commission. Accessed: May 20, 2025. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/101103110>
- [231] “Waste to Worth: A green solution for waste concrete powder and incinerator bottom ash reinforced by CO2 capturing in concrete | W2WGCO2 | Projekt | Fact Sheet | HORIZON,” CORDIS | European Commission. Accessed: May 20, 2025. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/101066240>

- [232] “Data to Enable Transformation and Optimisation for Concrete Sustainability | DETOCS | Projekt | Fact Sheet | HORIZON,” CORDIS | European Commission. Accessed: May 20, 2025. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/101119929>
- [233] “CO₂-armer Zement aus Altbeton in Frankreich | Heidelberg Materials.” Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.heidelbergmaterials.com/de/pi-2023-07-12>
- [234] “DFG - GEPRIS - Aktivierung von Zementstein als Weg zur Dekarbonisierung von Beton.” Accessed: May 20, 2025. [Online]. Available: <https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/541766792?context=projekt&task=showDetail&id=541766792&>
- [235] “DFG - GEPRIS - Bauwerk zu Bauwerk zu Bauwerk zu Bindemittel (Bn).” Accessed: May 20, 2025. [Online]. Available: <https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/542053617>
- [236] “DFG - GEPRIS - re-CEM: Anwendbarkeit von recycelten Betonfeinanteilen als SCM durch CCU - Untersuchung der Korrelation zwischen chemischer Zusammensetzung, amorpher Gelstruktur und puzzolanischer Reaktivität.” Accessed: May 20, 2025. [Online]. Available: <https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/542140618>
- [237] “Revolutionary solution to unlock concrete-to-concrete circularity | C2CA | Projekt | Fact Sheet | HORIZON,” CORDIS | European Commission. Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/101217884>
- [238] “CEMCON (Cement from concrete) – A circular solution for recycled concrete fines into supplementary cementitious material | CEMCON | Projekt | Fact Sheet | HORIZON,” CORDIS | European Commission. Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/101207625>
- [239] “Towards Zero Waste in Industrial Networks | FP7,” CORDIS | European Commission. Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/226752/reporting>
- [240] “Sustainability and performance assessment and benchmarking of buildings - SuPerBuildings | FP7,” CORDIS | European Commission. Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/244087/reporting>
- [241] “New microbial carbonate precipitation technology for the production of high strength, economical and Ecological Cement | FP7,” CORDIS | European Commission. Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/282922/reporting>
- [242] “CO₂ capture from cement production | CEMCAP | Projekt | Fact Sheet | H2020,” CORDIS | European Commission. Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/641185>
- [243] “Buildings as Material Banks: Integrating Materials Passports with Reversible Building Design to Optimise Circular Industrial Value Chains | BAMB | Projekt | Fact Sheet | H2020,” CORDIS | European Commission. Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/642384>
- [244] M. Buchert, D. Bleher, and W. Bulach, “Kartierung des anthropogenen Lagers III (KartAL III).”
- [245] “Defining new waste traceability standards for the green Demolition and Construction industry | TRACK4REUSE | Projekt | Fact Sheet | H2020,” CORDIS | European Commission. Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/101010321>
- [246] “Innovative Circular Economy Based solutions demonstrating the Efficient recovery of valuable material Resources from the Generation of representative End-of-Life building materials | ICEBERG | Projekt | Fact Sheet | H2020,” CORDIS | European Commission. Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/869336>

- [247] "DemoUpCARMA & DeoUpStorage," DemoUpCARMA and Storage. Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: <https://demoupcarma.ethz.ch/en/home/>
- [248] D. GmbH, "SmartRecycling-UP," Robotics Innovation Center - DFKI GmbH. Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: <https://robotik.dfki-bremen.de/de/forschung/projekte/smartrecycling-up>
- [249] "Grant Search: Low carbon magnesium based binders." Accessed: May 20, 2025. [Online]. Available: <https://data.snf.ch/grants/grant/209222>
- [250] "UpCycling mineral and timber-based waste from Construction & manufacturing process industries through eco-design, advanced logistics, quality control and digital solutions | CIRCULess | Projekt | Fact Sheet | HORIZON," CORDIS | European Commission. Accessed: May 20, 2025. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/101138330>
- [251] "DFG - GEPRIS - Aktive Karbonatisierung poröser mineralischer Bindemittelsysteme – A-COMBS." Accessed: May 20, 2025. [Online]. Available: <https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/542141112>
- [252] "Bau einer Upcycling-Anlage für Baurestmassen unter Einsatz eines Farbsortierers mit NIR-Technik | Umweltinnovationsprogramm." Accessed: May 20, 2025. [Online]. Available: <https://www.umweltinnovationsprogramm.de/projekte/bau-einer-upcycling-anlage-fuer-baurestmassen-unter-einsatz-eines-farbsortierers-mit-nir>
- [253] "Veredelung von Brechsand als Ersatz für Natursand (z. B. für den Einsatz zur Herstellung von Beton, Asphalt etc.)," DE202024002079U1, Nov. 26, 2024
- [254] S. Abubakri, G. R. Lomboy, and J. J. Pizzillo, "Method for Recycling Concrete Materials to Produce Reclaimed Concrete Aggregate Material for Use in Concrete-Based Materials and Structures," US2024391830A1, Nov. 28, 2024
- [255] G. Mamo, "Improved Recycled Concrete Aggregates and Methods for Producing the Same," WO2024194222A1, Sep. 26, 2024
- [256] F. Bourgeois, C. Gurdjos, M. Cyr, and L. Estel, "Method for Recycling Concrete Waste Resulting from Construction and/or Demolition," WO2024256758A1, Dec. 19, 2024
- [257] S. Abubakri, G. R. Lomboy, and I. M. Mantawy, "Method for Recycling Cement-Containing Materials to Produce Reclaimed Fines for Use in Cement-Based Materials and Structures," US2024190767A1, Jun. 13, 2024
- [258] S. Kim *et al.*, "Recycled Concrete Aggregates Carbonation Treatment," US2023242444A1, Aug. 03, 2023
- [259] N. Pato, M. Zajac, J. Skocek, and E. Wagner, "Separation of Hardened Concrete Paste from Aggregate," US2024262743A1, Aug. 08, 2024
- [260] Y. Ikeo *et al.*, "Manufacturing Method of Modified Recycled Aggregate and Modified Recycled Aggregate," JP2023182465A, Dec. 26, 2023
- [261] Y. Ikeo *et al.*, "Manufacturing Method of Recycled Concrete Fine Powder," JP2023182463A, Dec. 26, 2023
- [262] A. R. Papania-Davis, R. J. A. Nagatani, and S. Jin, "Carbonation of Recycled Concrete," US2024034675A1, Feb. 01, 2024
- [263] C. S. Song, "Recycling System for Recycled Aggregate Crushed and Selected in Intermediate Treatment Process of Construction Waste," KR102468125B1, Nov. 18, 2022
- [264] T. Schade, M. Zajac, and J. Skocek, "Alkali Activated Binder from Waste Concrete," EP4324801A1, Feb. 21, 2024

- [265] Y. S. Choi and S. H. Yoon, "Recycled Aggregates Regenerating Additive Coating Apparatus for Asphalt Concrete And Recycled Aggregates Manufacturing Method Using the Same," KR102445384B1, Sep. 20, 2022
- [266] Z. S. Al-Helal, M. K. Rahman, C. E. Acero, M. Ibrahim, and L. M. Alhems, "Recycled Concrete Aggregates and Heavy Oil Fuel Ash for Green Controlled Low Strength Material," US2022340490A1, Oct. 27, 2022
- [267] O. P. Dubey *et al.*, "Recycling of Aggregate Concrete Materials," AU2021104544A4, Apr. 28, 2022
- [268] M. H. Chun, "Impact Crusher for manufacturing concrete recycled aggregate," KR102282149B1, Jul. 28, 2021
- [269] M. H. Chun, "Recycled aggregate manufacturing system for concrete and method of manufacturing recycled aggregate for concrete using the same," KR102309810B1, Oct. 07, 2021
- [270] H.-J. Fischer, "Method and Plant for Concrete Preparation," WO2021254902A1, Dec. 23, 2021
- [271] S. J. Lee, "Concrete Composition with Recycled Aggregate," KR102188071B1, Dec. 07, 2020
- [272] J. Skocek, M. Zajac, H. M. Ben, S. Federhen, and M. Majchrowicz, "Improved Process and Device for Carbonating Concrete Waste and/or Sequestering Co₂," EP3744700B1, Jul. 20, 2022
- [273] M. Frangenberg, "Zuschlagstoff für Beton und Verwendung von Beton-Recyclat als Zuschlagstoff für Beton," DE102018120331B3, Feb. 28, 2019
- [274] LEE KEUN YOUNG, OH MAENG KYO, KIM KWANG WOOK, KIM IK SOO, LEE EIL HEE, and SEO BUM KYOUNG, "Method of manufacturing environmental friendly recycled aggregates," KR102127491B1, Jun. 26, 2020
- [275] "Betonmischung," DE202018105762U1, Nov. 05, 2018
- [276] J. Skocek, M. Zajac, H. M. Ben, and G. Bolte, "Method for Simultaneous Exhaust Gas Cleaning and Manufacturing of Supplementary Cementitious Material," EP3724147B1, May 04, 2022
- [277] J. Skocek, M. Zajac, H. M. Ben, and G. Bolte, "Use of Carbonated Recycled Concrete Fines as Supplementary Cementitious Material," EP3498681A1, Jun. 19, 2019
- [278] G. Achenbach, "Method for Producing Aggregate and Calcium Carbonate from Concrete Composite Materials," EP2895436B9, Nov. 08, 2017
- [279] D. G. Achenbach, "Method for manufacturing additive and calcium carbonate from concrete aggregate and device for performing the method," EP2708520A1, Mar. 19, 2014
- [280] J. Buesing, K. Buesing, and J. Lucero, "Ready-mix concrete using recycled concrete aggregate," US8226765B1, Jul. 24, 2012
- [281] G. Guosheng and Y. Yufen, "Method for recycling waste concrete," CN101560073A, Oct. 21, 2009
- [282] G. Beuchle, P. Stemmermann, U. Schweike, and K. Garbev, "Single-Phase Hydraulic Binder, Methods for the Production Thereof and Building Material Produced Therewith," EP2183193B1, Dec. 07, 2016
- [283] H. Eberhard, "Hydraulically binding mixture and process of manufacture," EP2192095A1, Jun. 02, 2010
- [284] L. Sunde, "Concrete," WO0158822A1, Aug. 16, 2001

- [285] K. D. Forkel, R. D. P. Heine, H.-P. D. C. Klingner, T. D. I. Possehl, F. G. P. D. Wihsmann, and R. J. D. I. Woerheide, "High grade secondary raw material production for pre-crushed fired brick or roof tiles," DE19548645A1, Jun. 19, 1997