

Abschlussbericht

zum wissenschaftlichen Begleitprojekt

Regionale Sekundärrohstoffzentren in Baden-Württemberg (SeRoZen BW)

Gefördert durch:

Ministerium für Landesentwicklung und Wohnung Baden-Württemberg zur Förderung von Modell- und Transferprojekten bzw. Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Rahmen der 1. Förderrunde des Strategiedialogs „Bezahlbares Wohnen und innovatives Bauen“



Projektlaufzeit: 13.03.2024 - 15.06.2025

Förderkennzeichen: SDB0100/01

Autoren: Rebekka Volk, Lena Fuhg, Justus Steins, Sebastian Rauscher, Frank Schultmann

Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP)

Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, insbesondere Produktionswirtschaft und Logistik

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Kurzzusammenfassung

Angesichts stagnierender Fortschritte beim Schließen von Verwertungskreisläufen für Bau- und Abbruchabfälle adressierte das Forschungsvorhaben „Regionale Sekundärrohstoffzentren in Baden-Württemberg“ die systemischen Herausforderungen und Potenziale einer regionalen zirkulären Wertschöpfung im Bausektor. Grundlage bildet ein dreistufiges Konzept für Sekundärrohstoffzentren (SRZ) in Baden-Württemberg, das unterschiedliche Stoffstromkomplexitäten und regionale Anforderungen berücksichtigt, um ökonomische, ökologische und technologische Synergien zu erschließen.

In vier Arbeitspaketen (AP) wurden umfassende Analysen durchgeführt: AP1 entwirft die Vision stoffstrom- und technologiespezifischer SRZ-Stufen. AP2 quantifiziert die ökologischen Auswirkungen verschiedener technischer Verwertungsoptionen mittels Lebenszyklusanalyse. AP3 identifiziert relevante Technologiepfade der Gegenwart und Zukunft und analysiert das techno-ökonomische Potenzial der SRZ-Stufen. AP4 entwickelt ein optimiertes Standort- und Netzwerkmodell für Baden-Württemberg im Hinblick auf minimale Kosten und Treibhausgasemissionen.

Die Ergebnisse zeigen, dass regional ausdifferenzierte Sekundärrohstoffzentren (SRZ-Stufen 1, 2 oder 3) technisch und ökologisch geeignet sind, den Anteil hochwertiger Recyclingbaustoffe (R-Baustoffe) signifikant zu erhöhen, Treibhausgasemissionen zu senken und zugleich positive Deckungsbeiträge zu erwirtschaften. Wirtschaftlich tragfähige Investitionen sind insbesondere bei großen SRZ1- und SRZ2-Anlagen realistisch, wohingegen SRZ3-Module stark von politischen Rahmenbedingungen und technologischer Reife abhängen. Die Standort- und Netzwerkoptimierung offenbart einen Zielkonflikt zwischen wirtschaftlicher Effizienz und ökologischer Wirkung, der zukünftig durch multi-kriterielle Steuerungsansätze ausbalanciert werden sollte. Die zukunftsfähige Transformation des Bauwesens erfordert dabei allerdings mehrdimensionale Maßnahmen: ökonomisch tragfähige Investitionen in SRZ-Infrastruktur, politische Steuerungsinstrumente, technologieoffene Innovationsförderung und eine institutionalisierte Wiederverwendungsarchitektur.

Inhaltsverzeichnis

1	Projektübersicht	2
1.1.	Projektziel	2
1.1	Projektumsetzung	4
2	Arbeitspaket 1 - Definition und Vision von Regionalen Sekundärrohstoffzentren	4
2.1	Sekundärrohstoffzentren der Stufe 1	4
2.2	Sekundärrohstoffzentren der Stufe 2	5
2.3	Sekundärrohstoffzentren der Stufe 3	6
2.4	Temporalität von SRZ-Anlagen (mobile, temporäre/ semi-mobile, stationäre Anlagen).....	8
3	Arbeitspaket 2 - Ökologische Auswirkungen.....	11
3.1	Hintergrund und Ziele	11
3.2	Datenerhebung und -aufbereitung.....	11
3.3	Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus der Ökobilanzierung	13
4	Arbeitspaket 3 - Technologie- und Investitionsbedarf..... Fehler! Textmarke nicht definiert.	
4.1	Technologierecherche	17
4.1.1	Stand der Recyclingtechnik.....	17
4.1.2	Neue Technologien.....	23
4.2	Techno-ökonomische Analyse für einen Pilot-Standort und Baden-Württemberg	29
4.2.1	Annahmen der Wirtschaftlichkeitsberechnung.....	29
4.2.2	Hinweise zur Kapitalbeschaffung.....	30
4.2.3	Technische Grundlagen	30
4.2.4	Wirtschaftliche Kennzahlen von SRZ 1 und 2	32
4.2.5	Wirtschaftliche Kennzahlen von SRZ 3	33
4.2.6	Übertragbarkeit auf Baden-Württemberg	34
5	Arbeitspaket 4 - Standort- und Netzwerkanalyse	34
5.1.1	Variablen und Modell	34
5.1.2	Inputdaten und Modelllösung.....	36
5.1.3	Ergebnisse und Interpretation.....	37
6	Zusammenfassung, Handlungsempfehlungen und Fazit	40
7	Quellen	44
	Anhang A	52
	Anhang B	63

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Übersicht der Arbeitspakete.....	4
Abbildung 2 - Eigenschaften von Sekundärrohstoffzentren der Stufe 1.....	5
Abbildung 3 - Eigenschaften von Sekundärrohstoffzentren der Stufe 2.....	6
Abbildung 4 - Eigenschaften von Sekundärrohstoffzentren der Stufe 3.....	7
Abbildung 7 - Zusammensetzung des Eingangsmaterials bei den befragten Betrieben (Anzahl Nennungen, Angabe in Prozent an Eingangsmaterial je Material)	18
Abbildung 8 – Herstellung von RC-GK in den an der Umfrage teilnehmenden Unternehmen.....	19
Abbildung 9 - Einsatzbereiche hergestellter Materialien der befragten Unternehmen.....	19
Abbildung 10 - Eingesetzte Brechertypen bei den befragten Unternehmen	20
Abbildung 11 - Eingesetzte Anlagen zur Sortierung bei den befragten Unternehmen (Mehrfachnennung möglich).....	21
Abbildung 12 – Kostenminimales SRZ-Netzwerk in Baden-Württemberg mit 2 kleinen und 12 großen SRZ 1, 1 kleinen und 14 sehr großen SRZ 2 (die u.a. SRZ 1-Funktionalitäten umfassen) sowie an fast jedem Standort eine Carbonatisierung und Entsulfatisierung (SRZ3).....	37
Abbildung 13 – Kostenminimales SRZ-Netzwerk in Baden-Württemberg inkl. notwendiger Transporte für Beton.....	38
Abbildung 14 – Vergleich der Optimierungsergebnisse hinsichtlich Kosten- und CO ₂ -Minimierung im SRZ-Netzwerk in Baden-Württemberg inkl. notwendiger Transporte für Beton.....	39
Abbildung 15 - Außenfenster, -türen, -tore	53
Abbildung 16 - Innentüren	54
Abbildung 17 - Treppen.....	54
Abbildung 18 - Bodenbeläge	55
Abbildung 19 – Dacheindeckungen und Wände	56
Abbildung 20 - Wärmeerzeuger/ Heizkörper und Thermostatventile	56
Abbildung 21 - Sanitäreinrichtungen	57
Abbildung 22 – Natur- und Pflastersteine.....	58
Abbildung 23 - Stahlbetonteile.....	59
Abbildung 24 - Holzbauteile	61

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Vor- und Nachteile verschiedener Anlagentypen auf Basis von Bilitewski (2013) und Müller (2018)	8
Tabelle 2 - Übersicht über die ökobilanzierten Verwertungspfade und Datenquellen	12
Tabelle 3 - Übersicht der modellierten Verwertungspfade und der erwarteten jährlichen Treibhausgas-Einsparpotentiale in Baden-Württemberg	16
Tabelle 4 - Kurzübersicht der identifizierten innovativen Aufbereitungs-/Recyclingtechnologien und -potentiale	27
Tabelle 5: Wirtschaftlichkeitskennzahlen für SRZ 1 und SRZ2	32
Tabelle 6: Wirtschaftlichkeitskennzahlen für SRZ 3	33
Tabelle 7 - Mengen, Entscheidungsvariablen und Parameter für die Netzwerkmodellierung	35
<i>Tabelle 8 Identifizierte Technologien bzw. Ansätze</i>	<i>63</i>

1 Projektübersicht

1.1. *Projektziel*

Der Übergang von einer linearen Wirtschaftsweise hin zu einer zirkulären Wertschöpfung erfordert systemische Ansätze, um Materialkreisläufe zu schließen und Abfallmengen zu minimieren. Bau- und Abbruchabfälle stellen sowohl auf europäischer Ebene, in Deutschland als auch in Baden-Württemberg (BW) einen signifikanten Abfallstrom dar (Eurostat, 2022; Statistisches Bundesamt, 2025; Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2024). Trotz einer in der EU-Abfallrahmenrichtlinie verankerten Verwertungsquote von 70 % (European Commission, 2017) bleiben wesentliche Potenziale ungenutzt: Feinanteile, gemischte oder kontaminierte Stofffraktionen werden überwiegend downgecyclt, deponiert oder als Verfüllmaterial in nicht-technischen Bauwerken eingesetzt (Müller, 2018). Damit gehen nicht nur wertvolle sekundäre Rohstoffe (SR) verloren, sondern auch Chancen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen, Primärrohstoffverbrauch und Deponieraumnutzung.

Die Marktdurchdringung hochwertiger SR insbesondere für die Anwendung im Hochbau scheitert bislang an strukturellen Hemmnissen wie einer schwachen technischen Etablierung und Nachfrage (Aggregates Europe - UEPG, 2024) aufgrund begrenzter wirtschaftlicher Anreize, insbesondere für die Verarbeitung feiner, gemischter oder schadstoffbelasteter Fraktionen sowie einer unzureichenden regionalen Technologieinfrastruktur für die spezifische Aufbereitung.

Die Konzeption einer passenden Recyclinginfrastruktur auf regionaler und lokaler Ebene ist für die Bewältigung dieser Herausforderungen von entscheidender Bedeutung. Bau- und Abbruchabfälle variieren regional je nach Baupraktiken, Deponiegebühren, Ressourcenverfügbarkeit und Bau-/Materialkosten. Auf die gewünschte Materialausgangsqualität zugeschnittene Anlagentypen könnten eine kosteneffiziente Systementwicklung ermöglichen, indem gezielte Investitionen für die Integration von Recyclinginnovationen mit den in Zukunft erwarteten Materialmengen und Transportwegen in Einklang gebracht und so ökologische und wirtschaftliche Ineffizienzen reduziert werden können.

Vor diesem Hintergrund fokussiert sich das hier vorgestellte Forschungsvorhaben auf die Konzeptionierung regionaler Sekundärrohstoffzentren für Baden-Württemberg. Ziel ist es, ein mehrstufiges Infrastrukturmodell zu entwickeln, das wirtschaftlich tragfähig, ökologisch wirksam und technologisch adaptiv ist. Der Ansatz unterscheidet drei SRZ-Stufen und verknüpft diese mit standortangepassten Kapazitäten und modularen Prozessketten. Damit können Investitionen passgenau auf Stoffstromvolumina, Materialkomplexität und Transportdistanzen abgestimmt werden und zugleich hochwertige SR für Anwendungen im Hochbau bereitgestellt werden.

Die Projektziele lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- **Schließung lokaler Stoffkreisläufe** → Erhöhung der verfügbaren Menge an Sekundärrohstoffen für eine hochwertige stoffliche Verwertung (insbesondere im Hochbau) und zur Schonung von Deponieraum.
- **Reduktion transportbedingter Emissionen** → Verbesserung der Klimabilanz von Sekundärrohstoffen durch systemische Bewertung und Netzwerkoptimierung für kürzere Transportwege durch strategisch positionierte SRZ.
- **Verringerung des Kostennachteils von Sekundärrohstoffen** → Definition eines wirtschaftlich tragfähigen, modularen und skalierbaren Drei-Stufen-Modells mit Technologie- und Innovationschub.

Der vorliegende Abschlussbericht gliedert sich in vier thematische Arbeitspakete (Abbildung 1), deren Vorgehensweise und Ergebnisse jeweils in einem eigenen Kapitel dargestellt werden. Kapitel 2 erläutert zunächst das Arbeitspaket 1 und entwickelt eine fundierte Definition sowie eine zukunftsorientierte Vision regionaler Sekundärrohstoffzentren. Dabei wird der Leitfrage nachgegangen, wie solche Zentren künftig in Baden-Württemberg ausgestaltet sein sollten. Kapitel 3 widmet sich im Rahmen des Arbeitspakets 2 der Analyse der ökologischen Auswirkungen der SRZ und beantwortet, welche Umweltwirkungen aktuell sowie in optimierten Szenarien mit der Behandlung der relevanten Stoffströme verbunden sind. Im Anschluss beleuchtet Kapitel 4 das Arbeitspaket 3 mit dem erforderlichen Technologie- und Investitionsbedarf, indem es sowohl die für eine hochwertige Kreislaufführung notwendigen - gegebenenfalls gekoppelten - Technologien als auch die daraus resultierenden Investitionserfordernisse quantifiziert. Kapitel 5 präsentiert schließlich die Ergebnisse des Arbeitspakets 4 zur Standort- und Netzwerkanalyse. Es identifiziert geeignete beziehungsweise pilotfähige Standorte in Baden-Württemberg und skizziert ein optimiertes Recyclingnetzwerk inklusive der erforderlichen Transporte. Abschließend werden Handlungsempfehlungen formuliert, welche bei der Implementierung eines landesweiten SRZ-Netzwerks von Bedeutung sein können (Kap. 6).

<p>AP 1 Definition und Vision</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Wie sollten <i>regionale Sekundärrohstoffzentren</i> (in Zukunft) in Baden-Württemberg aussehen?
<p>AP 2 Ökologische Auswirkungen</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Welche ökologischen Auswirkungen sind derzeit und zukünftig/optimiert mit der Behandlung der Stoffströme verbunden?
<p>AP 3 Technologie- und Investitionsbedarf</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Welche neuen bzw. gekoppelten Technologien sind erforderlich? • Welcher Investitionsbedarf (für neue Technologien) zeichnet sich ab?

<p>AP 4 Standort- und Netzwerkanalyse</p>	<ul style="list-style-type: none">• Welche Standorte eignen sich besonders? Welche Standorte sind als Piloten geeignet?• Wie sähe ein optimiertes Recyclingnetzwerk inkl. der erforderlichen Transporte aus?
--	---

Abbildung 1 - Übersicht der Arbeitspakete

1.1 Projektumsetzung

Das Forschungsvorhaben wurde im vorgesehenen Zeitrahmen („in time“) erfolgreich abgeschlossen. Die im Arbeitsplan definierten Meilensteine konnten fristgerecht und in der vorgesehenen Qualität erreicht werden. Zur Kommunikation der Projektergebnisse und zur Sichtbarmachung des Vorhabens wurde eine projektbegleitende Außendarstellung etabliert. Hierzu zählten die Bereitstellung einer Projektwebseite sowie die Präsentation von Zwischenständen und Ergebnissen auf einschlägigen Fachveranstaltungen (12. Fachsymposium Zirkuläres Bauen 2025), sowie Sitzungen relevanter Unterarbeitskreise. Diese Formate ermöglichten sowohl den Austausch mit Fachpublikum als auch die gezielte Ansprache von Entscheidungsträgern in Politik und Verwaltung. Die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse werden in Form von Fachpublikationen und Konferenzbeiträgen aufbereitet.

2 Arbeitspaket 1 - Definition und Vision von Regionalen Sekundärrohstoffzentren

Im Rahmen des Projekts wurde ein dreistufiges Konzept zur hochwertigen Verwertung von Bau- und Abbruchabfällen ausgearbeitet. Das Konzept vereint betriebswirtschaftliche Skaleneffekte mit standortspezifischer Flexibilität und zielt darauf ab, mineralische Bau- und Abbruchabfälle stufenweise in hochwertige Sekundärrohstoffe zu überführen. Ziel ist es, lokale Kreisläufe zu schließen, Transportemissionen zu minimieren und zugleich wirtschaftlich tragfähige Anlagenklassen zu definieren. Das Vorgehen orientiert sich an der EU-Abfallrahmenrichtlinie sowie an jüngsten Forschungsergebnissen zur Kreislaufwirtschaft im Bausektor.

2.1 Sekundärrohstoffzentren der Stufe 1

SRZ der Stufe 1 lassen sich wie folgt definieren:

Sekundärrohstoffzentren der Stufe 1 sind bestehende Recyclingbetriebe, die Mitglied einer durch das Land anerkannten Güteüberwachung-Gemeinschaft sind und die das Baustoffrecycling besonders effizient oder für einen bestimmten Zweck, beispielsweise für die Bereitstellung von rezykliertem Material für den Tiefbau und verstärkt bzw. ausschließlich für den Hochbau, betreiben oder ausweiten und dafür zusätzliche Flächen bereithalten.

Der Schwerpunkt dieser ersten Stufe liegt auf der Nutzung bestehender Infrastruktur für eine lokale, hochqualitative Verarbeitung von Bau- und Abbruchmaterialien mit Erweiterung um innovative Ansätze zur Aufbereitung feiner Materialien, Bauschutt und Baugrubenaushub. Dies umfasst die Ergänzung bestehender Brech- und Siebanlagen, u.a. um einfache Nassaufbereitung zur lokalen güteüberwachten Aufbereitung und Verwertung "einfacher" Materialien zu Recycling (RC)-Produkten. SRZ1 verarbeiten primär mineralische Fraktionen wie Beton, Ziegel oder Boden-Stein-Gemische (siehe Abbildung 2). Die Produkte (RC-Splitt, -Körnungen und -Sande) erfüllen gängige Normen (z. B. EN 12620 und TL G SoB-Stb) und substituieren Primärrohstoffe im Tief- und Hochbau. Mobile Module erlauben temporäre Einsätze auf Rückbauflächen und reduzieren so Transportdistanzen. Insbesondere der Einsatz von Technologien zur Aufbereitung von sortenreinen, hochwertigen Gesteinskörnungen und Brechsanden für den Hochbau sollen eine nachhaltige Ressourcennutzung fördern. Komplexere (z. B. Bauabfälle auf Gipsbasis) oder schadstoffbelastete Materialien (Stoffe mit den Abfallschlüsseln 170106*, 170204*, 170503*, 170507*, 170603*, 170605*, 170801* oder 170903* gemäß Abfallverzeichnis-Verordnung) sollten jedoch an ein Zentrum der Stufe 2 bzw. 3 geleitet werden.

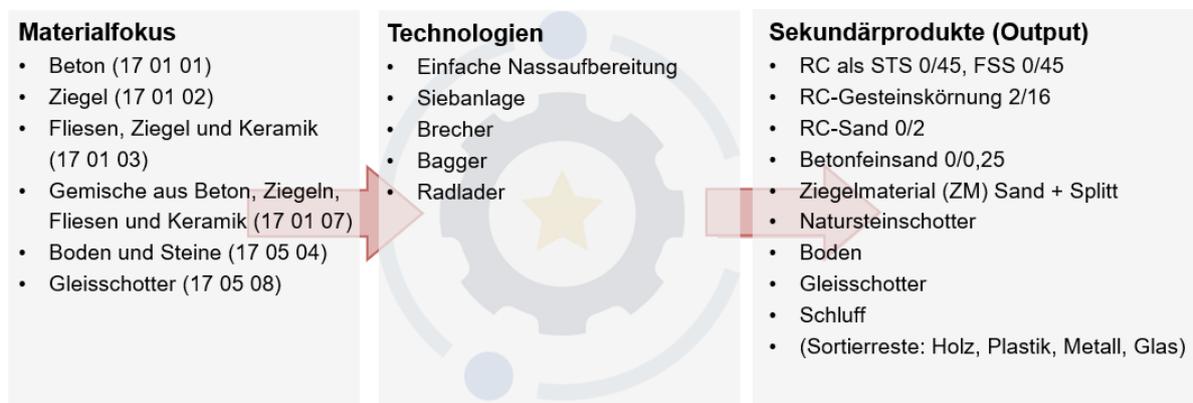


Abbildung 2 - Eigenschaften von Sekundärrohstoffzentren der Stufe 1

2.2 Sekundärrohstoffzentren der Stufe 2

SRZ der Stufe 2 lassen sich wie folgt definieren:

Sekundärrohstoffzentren der Stufe 2 sind hoch automatisierte Aufbereitungszentren, die Bauschutt zentralisiert, hoch effizient und in bestmöglicher Qualität verwerten und zu hochwertigen Sekundärbaustoffen für den Hochbau aufbereiten.

Diese Stufe ergänzt die Kapazitäten und Funktionalitäten zukünftiger und bestehender SRZ der Stufe 1. Zur Steigerung der Recyclingquote für leicht kontaminierte oder heterogene Stoffströme (z. B. gemischte Bau-/Abbruchabfälle, Gips- und Porenbetonreste) können fortgeschrittene Sortier- und

Behandlungstechniken wie sensorbasierte Sortiersysteme (Nahinfrarot (NIR), Röntgen, Hyperspektral) mit mehrstufigen Trocken-/Nassprozessen und Sortierstationen kombiniert werden.

Darüber hinaus können daher in dieser Stufe auch komplexere Materialien wie Porenbeton und gips-haltige Bauabfälle verarbeitet werden, die aktuell in geringeren Mengen anfallen, für die aber in Zukunft teilweise deutlich höhere Abfallmengen erwartet werden (Steins et al., 2021). Für Porenbeton ist bereits ein Verfahren zum closed-loop Recycling (sowohl als Füllstoff/Sandersatz als auch als Zementersatz) im Technikums- und Produktionsmaßstab möglich und wurde bspw. im Projekt REPOST (BMBF) gezeigt. Das Recycling von gipshaltigen Materialien wird in Zukunft an Bedeutung zunehmen, da durch die Abschaltung der deutschen Kohlekraftwerke in naher Zukunft perspektivisch weniger Gips aus Rauchgasentschwefelungsanlagen (REA-Gips) zur Verfügung stehen wird (Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e.V., 2022). Neben den Produkten der SRZ-Stufe 1 entstehen geschredderter Gips und spezialisierte Porenbetonkörnungen, wodurch zusätzliche Märkte durch die Etablierung dieser Recyclingpfade in den komplexen SRZ2-Anlagen erschlossen werden können.



Abbildung 3 - Eigenschaften von Sekundärrohstoffzentren der Stufe 2

2.3 Sekundärrohstoffzentren der Stufe 3

SRZ der Stufe 3 lassen sich wie folgt definieren:

Sekundärrohstoffzentren der Stufe 3 stellen speziell in urbanen Räumen zusätzliche Flächen für die abbruchnahe Aufbereitung von Bauschutt, Bodenaushub und Bauprodukte sowie die Lagerung der aufbereiteten Materialien oder alternativ ausschließlich für die Aufbereitung und (temporäre) Lagerung von Bauprodukten zur Verfügung. Dabei soll die Lagerhaltung reduziert werden durch die Etablierung von digitalisierten Plattformen für Angebot und Nachfrage der Baustoffe/Bauprodukte.

Ergänzend zu den Stufen 1 und 2 erweitern SRZ der Stufe 3 das Konzept um modulare Einheiten mit hohem Investitionsbedarf mit Fokus auf Schadstoffausschleusung und chemischen, thermischen und mechanischen Trenn- und Aufbereitungsverfahren für vergleichsweise seltene, stark kontaminierte oder technologisch anspruchsvolle Materialien und für die Aufbereitung bzw. Wiederverwendung von Bauprodukten. Für anspruchsvolle Materialien wie Altholz, Fassadensysteme, Dämm- und Verbundstoffe wie faserbasierte Materialien/Komposite sowie Baustellenmischabfälle sollen künftig innovative Verfahren zur Schadstoffausschleusung und Aufbereitung eingesetzt werden, um eine nachhaltigere Verwertung dieser Materialien abseits der derzeitigen energetischen Verwertung oder Deponierung zu gewährleisten. Beispiele sind Carbonatisierung, Entsulfatisierung oder der PolyStyreneLoop-Prozess. Diese modularen Technologiezentren werden vorzugsweise an bestehenden SRZ-Standorten oder nahe industrieller Produktionscluster installiert, um Synergien bei bestehender Infrastruktur und F&E-Kooperationen zu nutzen. Durch die Behandlung bislang deponiepflichtiger Abfälle schließen sie zentrale Verwertungslücken der Bauwirtschaft.

Auch die Ermöglichung einer breiten Wiederverwendung von Bauprodukten durch die Bereitstellung von Aufbereitungs- und Lagerkapazitäten sowie Vermarktungsoptionen (wie bspw. von lokalen Bauteilbörsen, ebay, N1 oder CONCLAR) spielen auf dieser Stufe eine wichtige Rolle.

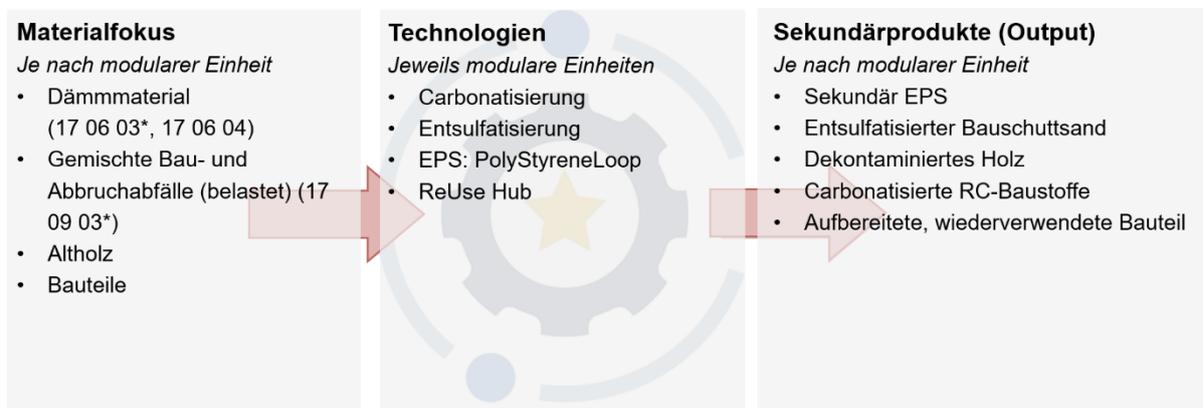


Abbildung 4 - Eigenschaften von Sekundärrohstoffzentren der Stufe 3

Eine ganzheitliche und gezielte Weiterentwicklung regionaler SRZ kann maßgeblich zur Förderung lokal geschlossener Kreisläufe für Bau- und Abbruchabfälle und damit zur Nachhaltigkeit in der Braubranche beitragen. Durch den zielgerichteten Einsatz innovativer Technologien und Verfahren für unterschiedlich komplexe Verwertungsprozesse in einzelnen Zentren ist es möglich, Stoffströme in Baden-Württemberg entsprechend den jeweiligen lokalen Anforderungen, d.h. dem Aufkommen und auch der Nachfrage, gezielt einer ökologisch und ökonomisch effizienten sowie hochwertigen Aufbereitung zuzuführen.

Für eine konkrete Umsetzung in Pilotanlagen sollten jedoch nicht nur Nachhaltigkeitsaspekte entlang der Triple-Bottom-Line berücksichtigt werden, sondern ebenfalls weitere technische, abfallrechtliche, legislative, regionalplanerische und organisatorische Anforderungen, insbesondere für die SRZ der Stufe 3, definiert werden. SRZ mit hoher Komplexität (insbesondere der Stufe 3) müssen nicht notwendigerweise alle erforderlichen Technologien/Prozesse an einem Standort versammeln, sofern eine lokale Nähe und/oder lokale Kooperation mit andern Technologie-/Verwertungspartnern ökologisch und ökonomisch sinnvoll und dauerhaft eingerichtet ist.

Das entwickelte SRZ-Stufenmodell bietet einen robusten Rahmen, um Bau- und Abbruchabfälle und gebrauchte Bauprodukte schrittweise in hochwertige Sekundärrohstoffe und wiedergenutzte Bauprodukte zu überführen. Durch modulare Technik, datenbasierte Qualitätssicherung und standortnahe Umsetzung könnte sowohl die ökologische als auch die wirtschaftliche Performance der Bau- und Abbruchbranche verbessert werden.

2.4 Temporalität von SRZ-Anlagen (mobile, temporäre/semi-mobile, stationäre Anlagen)

Vor dem Hintergrund des (Weiter-)Ausbaus von SRZs in unterschiedlichen Ausbaustufen sind bei der Optimierung des Verwertungsnetzes für Sekundärrohstoffe in Baden-Württemberg neben den zu verarbeitenden Stoffströmen auch die Mobilität und Temporalität möglicher Anlagentypen zu berücksichtigen. Angesichts der hohen Aufbereitungsquoten durch mobile Anlagen (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2023) und fehlender Abfallprognosen über das Jahr 2030 hinaus (Volk et al., 2019), sollten unterschiedliche Gesichtspunkte bei der Abwägung der gewünschten Temporalität der SRZ-Anlage berücksichtigt werden. Dazu können u.a. Investitionen, Betriebskosten, Effizienz/ Auslastungspotentiale, ökologische Auswirkungen z. B. durch Transportwege, Genehmigungen, Art und Umfang der erwarteten Stoffströme (z. B. belastetes Material), geplante Anlagenkapazität, Einzugsgebiet (Bevölkerungsdichte, flächenbezogenes Aufkommen, Bau-/Abbruchtätigkeit), Platzbedarf (Anlagen + Lagerung) zählen.

Ein Überblick über Vor- und Nachteile potentieller Anlagentypen (mobil, stationär) ist in Tabelle 1 dargestellt. Die zeitlich begrenzte Einrichtung von SRZ einer bestimmten Stufe kann nach Abwägung der o.g. Aspekte insbesondere bei mittel- bis langfristigen Großprojekten mit Abbruch und Ersatzneubau nachhaltig sein.

Tabelle 1 - Vor- und Nachteile verschiedener Anlagentypen auf Basis von Bilitewski (2013) und Müller (2018)

Anlagenart	Vorteile	Nachteile	Anwendungsbereich
Stationär	<ul style="list-style-type: none"> - langfristige Lösung - kosteneffizient bei hoher Auslastung 	<ul style="list-style-type: none"> - hohe Investitionen - aufwendige Genehmigungsverfahren 	<ul style="list-style-type: none"> - hohe (überregionale) Abfallmengen

	<ul style="list-style-type: none"> - niedrige Betriebskosten - hohe Effizienz - gute Produktqualitäten - kontrollierte Annahme - Minderung von Emissionen 	<ul style="list-style-type: none"> - großes Einzugsgebiet und gute Verkehrsanbindung notwendig 	<ul style="list-style-type: none"> - spezialisierte Anlagen (z. B. belastetes Material)
Mobil	<ul style="list-style-type: none"> - flexibel - kostengünstig - niedrige Investitionen - moderne Technologien - geringer Aufwand für Platzvorbereitung - kein Genehmigungsverfahren nach § 1 Abs. 1 der 4. BImSchV wenn sie weniger als 12 Monate am Entstehungsort des Abfalls betrieben werden ¹ - niedrige Transportwege, -emissionen und -kosten für die Materialien 	<ul style="list-style-type: none"> - hohe Betriebskosten bei häufigem Standortwechsel - beschränkte Produktpalette - schwierige Abfall- und Produktionskontrolle - hoher Koordinierungsaufwand - Emissionshandhabung - beschränkte Durchsatzleistung 	<ul style="list-style-type: none"> - ländliche Gebiete - sporadische Bautätigkeit - Großbaustellen

Bei mehrjährigen Großprojekten kann es daher sinnvoll sein, eine hybride Anlagenart in Betracht zu ziehen. **Temporäre stationäre SRZ** könnten eine Lösung für Großbaustellen bieten, die sich über mehrere Jahre erstrecken und große Mengen an „schwierigen“ (z. B. Verbundstoffe) oder sogar schadstoffbelasteten Abfällen erzeugen. Die Errichtung solcher Anlagen vor Ort könnte die Transportkosten und -emissionen deutlich reduzieren, da die großen Abfallmengen nicht über weite Strecken transportiert werden müssten, insbesondere wenn es lokale Nachfrage bzw. Verwendungsmöglichkeiten gibt. Ihre Planung und Realisierung würde eine vergleichende ökonomische und ökologische Analyse, der zu erwartenden Abfallmengen und -arten, der Dauer der Bauprojekte, sowie der zu erwartenden Transporte und Aufbereitungsqualitäten und der erwarteten Nachfrage der entstehenden Produkte erfordern. Der Zeitplan für Bau und Rückbau der temporären SRZ sowie die Umweltverträglichkeit müssten geprüft werden, insbesondere wenn keine Wiederverwendung an anderen Standorten geplant ist. Bei der Entscheidungsfindung müssten ähnliche Faktoren berücksichtigt werden, wie bei der Planung von stationären Anlagen (vgl. Bilitewski, 2013), u.a.

- **Grundstücksmerkmale:** Ausreichende Größe (für Anlage + Lagerflächen), Form und Bodenbeschaffenheit (u.a. für Versiegelung/ Befestigung)
- **Lage:** Entfernung zu Wohngebieten (u.a. gemäß örtlicher Vorgaben zu Emissionen und Schall), Vorzugswindrichtung
- **Verkehrsanbindung:** An öffentliche Straßen, Wasserstraßen und Schienennetze
- **Anschlüsse:** Verfügbarkeit von Strom, Trink- und Brauchwasser, Abwasserentsorgung, Druckluft, Abgasreinigung
- **Behördliche Auflagen:** Genehmigungspflicht der Anlage (ab 12 Monate Standort), Genehmigung falls Aufbereitung von Fremdanteilen gewünscht

Zudem kann die Planung und Nutzung mit einem größeren Koordinierungsaufwand für den fortlaufenden Einsatz sowie Sicherstellung einer optimalen Auslastung verbunden sein. Nachteile aus Umweltgesichtspunkten in der Nutzung temporärer stationärer SRZ können sich im Fall einer fehlenden

¹ Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2020)

Rückbaubarkeit oder Wiederverwendung technischer Komponenten sowie je nach Dauer und Aufwand des Auf- und Rückbaus ergeben. Alternativ wäre auch die „Aufrüstung“ mobiler Anlagen bzw. die Kopplung mit stationären SRZ der Stufe 2 oder Stufe 3 denkbar, sodass die größten Stoffströme lokal in einer temporären Anlage aufbereitet werden können, während dort nicht aufbereitbare Abfälle in SRZ der Stufe 2 und/oder Stufe 3 transportiert werden. Die Bündelung „schwierigerer/komplexerer“ Abfälle in SRZ der Stufe 2 oder 3 würde die Auslastung der dort installierten Technologien erhöhen, wäre aber mit Transporten verbunden die sonst allerdings im Falle einer status-quo Behandlung, d.h. bei thermischer Verwertung oder Deponierung ebenfalls (vermutlich in vergleichbarem Umfang) anfallen würden.

3 Arbeitspaket 2 - Ökologische Auswirkungen

3.1 *Hintergrund und Ziele*

Das zentrale Ziel des Arbeitspakets 2 (AP2) besteht darin, eine Einschätzung der ökologischen Auswirkungen der derzeit in Baden-Württemberg eingesetzten Verfahren zur Behandlung von Stoffströmen aus dem Bausektor vorzunehmen. Im Mittelpunkt der Untersuchung steht die Verknüpfung von Mengen- und Technologiedaten mit geeigneten, fundierten Ökobilanzwerten. Ziel ist es, auf dieser Grundlage das Treibhauspotenzial (GWP) als zentralen Umweltindikator zu berechnen, ausgedrückt in CO₂-Äquivalenten (CO₂ eq). Konkret wurden für die Stoffströme Beton, Ziegel, Keramik, Bodenaushub, Porenbeton und gipshaltiges Material jeweils vielversprechende Recyclingverfahren bilanziert. Für die Stoffströme gemischter Bauschutt, Altholz, EPS, Mineralwolle, Baumischabfall und Bauprodukte konnten lediglich Recycling- bzw. Verwertungsoptionen recherchiert werden (siehe AP 3 sowie Anhang), jedoch aufgrund unzureichender Daten in Literatur und Ökobilanzdatenbank keine eigene Kalkulation von ökologischen Auswirkungen durchgeführt werden.

3.2 *Datenerhebung und -aufbereitung*

Durch Literaturrecherchen zu aktuellen Verarbeitungstechnologien (siehe AP3) konnten verschiedene Recyclingverfahren und ihre jeweiligen Material- und Energieaufwände identifiziert werden. Neben den Aufwänden aus den Recyclingverfahren fließen auch Transportaufwände unter der Annahme von 50 km Transportdistanz in einem 40-Tonner LKW mit Euro VI Abgasnorm zu und vom Recyclinghof in die Bilanzierung ein. Hergestellten Recyclingprodukten wird eine Gutschrift in Höhe der vermiedenen Primärproduktion zugeschrieben (Avoided-Burden-Ansatz). Die ökologische Bewertung wurde in der Modellierungssoftware openLCA mithilfe der Datenbank Ecoinvent 3.10 durchgeführt. Dadurch lassen sich die Umweltauswirkungen der unterschiedlichen Recycling-Verfahren kalkulieren und miteinander vergleichen. Betrachtet wurden alle Umweltwirkungskategorien gemäß Anhang C der DIN EN 15804+A2.

Input	Verwertungspfad 1	Verwertungspfad 2	Verwertungspfad 3	Verwertungspfad 4	Verwertungspfad 5
Betonbruch	Stoffliche Verwertung in technischen Bauwerken ohne bautechnische Anforderungen	Recycling im Straßenbau (Di Maria et al., 2018)	Recycling im Beton (Di Maria et al., 2018)	Recycling im Beton (Grob- und Feinfraktionen) (Damgaard et al., 2022; Butera et al., 2015; Zhang et al., 2019)	Reuse von Betonbauteilen
Ziegelbruch	Stoffliche Verwertung in technischen Bauwerken ohne bautechnische Anforderungen	Recycling im Straßenbau (Fort und Cerny, 2020; Caro et al., 2024)	Recycling im Beton (Grobkörnung 4/22) (Fort und Cerny, 2020; Caro et al., 2024)	Recycling in Zementkalkputz (Fort und Cerny, 2020; Caro et al., 2024)	Reuse von Ziegeln
Keramik	Stoffliche Verwertung in technischen Bauwerken ohne bautechnische Anforderungen	Recycling im Straßenbau (Caro et al., 2024; Cristobal Garcia et al., 2024)	Recycling im Beton (Grobkörnung 4/22) (Caro et al., 2024; Cristobal Garcia et al., 2024)	Recycling in Zementkalkputz (Caro et al., 2024; Cristobal Garcia et al., 2024)	Reuse von Keramikbauteilen
Gem. Bauschutt	Stoffliche Verwertung in technischen Bauwerken ohne bautechnische Anforderungen	Trennung in Abfallfraktionen			
Bodenaushub	Verfüllung, Stoffliche Verwertung in technischen Bauwerken ohne bautechnische Anforderungen	Gewinnung von Gesteinskörnung für die Betonproduktion (Nassaufbereitung) (ifeu, 2019)	Recycling Filterkuchen in Lehmziegelproduktion (Cristobal Garcia et al., 2024)		
Porenbeton	Deponierung	Recycling in Leichtbeton (Volk et al., 2023)	Recycling in Porenbeton (Volk et al., 2023)	Recycling in Belit-Zementklinker (Volk et al., 2023)	Reuse von Porenbetonbauteilen
Gipshaltiges Material	Deponierung	Recycling in Gipskartonplatten (Pantini et al., 2019; Pedreño-Rojas et al., 2019)			Reuse von Gipsplatten
Altholz	Energetische Verwertung	Kaskadennutzung, MDF-Recovery			Reuse von Altholz
EPS	Energetische Verwertung	PS-Loop			Reuse von Dämmplatten
Mineralwolle	Deponierung	Thermo-chemisches Schmelz-Quench, Geopolymer			Reuse von Dämmplatten
Baumischabfall	Deponierung	Trennung in Abfallfraktionen			
Bauprodukte	Deponierung	Wiederverwendung			

Tabelle 2 - Übersicht über die ökobilanzierten Verwertungspfade und Datenquellen

3.3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus der Ökobilanzierung

Folgende Ergebnisse haben sich aus den durchgeführten Ökobilanzierungen für die Stoffströme Beton, Ziegel, Keramik, Bodenaushub, Porenbeton, und gipshaltiges Material ergeben. Eine Gesamtübersicht der erwarteten jährlichen Treibhausgas-Einsparpotentiale in Baden-Württemberg findet sich in Tabelle 3.

- *Stoffstrom Beton:* Die Ökobilanzergebnisse zeigen, dass das Recycling von Grob- und Feinfraktionen im Beton (Einsparung von Zuschlägen und eines kleinen Anteils des Zements) im Vergleich zur stofflichen Verwertung in technischen Bauwerken ohne bautechnische Anforderungen und zum konventionellen Recycling (Straßenbau und Recycling in Beton) in nahezu allen Umweltkategorien deutlich bessere Ergebnisse aufweist. Besonders starke Verbesserungen zeigen sich beim der Umweltwirkungskategorie Klimawandel. Aber auch die anderen Recyclingoptionen sind im Vergleich mit der Stofflichen Verwertung in technischen Bauwerken ohne bautechnische Anforderungen in fast allen Wirkungskategorien (gemäß Anhang C der DIN EN 15804+A2) ebenfalls vorteilhaft (mit Ausnahme Feinstaubemissionen).
- *Stoffstrom Ziegel:* Das Recycling von gebrochenem Ziegel in Zementkalkputz weist im Vergleich zu den anderen Optionen (Stoffliche Verwertung in technischen Bauwerken ohne bautechnische Anforderungen, Recycling im Straßenbau oder in Beton) in nahezu allen Umweltwirkungskategorien die geringsten Umweltwirkungen auf. Besonders deutlich fällt dies in der Wirkungskategorie Klimawandel aus. In der Praxis stellt die Pflanzsubstratherstellung aus Ziegel einen relevanten Verwertungspfad dar, der aufgrund unzureichender Datenlage jedoch nicht bilanziert werden konnte. Nach DIN 1045-2:2023-08 ist die Verwendung von rezyklierte Gesteinskörnung mit einer Korngröße >2 mm zulässig. Aufgrund der vorliegenden Datenlage konnte lediglich die Körnung 4/22 bilanziert werden.
- *Stoffstrom Keramik:* Die Ergebnisse entsprechen aufgrund der gleichen betrachteten Recyclingprozesse denen beim Ziegel-Recycling.
- *Stoffstrom Bodenaushub:* Eine Nassklassierung des Bodenaushubs zeigt die Tendenz, noch weiter verbesserte Umweltwirkungen erreichen zu können. Aus Bodenaushub kann durch Aufbereitung (Nassklassierung) Gesteinskörnung gewonnen werden, die auch in der Betonproduktion genutzt werden kann. Dabei entsteht als Nebenprodukt ein Filterkuchen aus Schluff mit einer Korngröße <0,063 mm. Das Recycling des Filterkuchens als Rohstoffersatz in der

Lehmziegelproduktion weist in den meisten Umweltwirkungskategorien die geringsten Umweltwirkungen auf. Einzelne Indikatoren zeigen jedoch leicht erhöhte Werte im Vergleich zur Verfüllung

- *Stoffstrom Porenbeton:* Das Recycling von Altporenbeton bietet erhebliche Klimavorteile, insbesondere wenn er wieder in der Porenbetonherstellung eingesetzt wird. Auch die Verwendung in Leichtmörtel, Leichtbetonblöcken oder Schalungssteinen führt zu signifikanten Emissionsminderungen. Noch höhere Einsparpotenziale sind beim Recycling zu Belit-Zementklinker möglich. Dort lassen sich insbesondere bei Nutzung erneuerbarer Energiequellen erhebliche Einsparungen bei Treibhausgasemissionen erreichen.
- *Stoffstrom gipshaltiges Material:* Gipsrecycling in der Produktion von Gipskartonplatten weist im Vergleich zur Deponierung deutliche ökologische Vorteile auf, insbesondere in Bezug auf den Klimawandel.

Auf Basis dieser Bewertungsergebnisse können durch das Heranziehen der jährlichen Aufkommen von Bau- und Abbruchabfällen in Baden-Württemberg auf Grundlage der Daten aus dem StarBau-Projekt (Volk et al., 2019) des jeweiligen Stoffstroms Einsparpotentiale in Baden-Württemberg kalkuliert werden. So ergibt sich beim Betonrecycling ein Einsparpotential von jährlich 141.000 t CO₂ eq, indem statt Stoffliche Verwertung in technischen Bauwerken ohne bautechnische Anforderungen (gesamte Emissionen von 24.000 t CO₂ eq) das Recycling von Grob- und Feinfraktionen genutzt wird (kalkulatorische Emissionen von -117.000 t CO₂ eq). Beim Ziegel-Recycling beläuft sich das Einsparpotential in Baden-Württemberg auf lediglich 11.000 t CO₂ eq pro Jahr, da das Recycling in Zementkalkputz in der Praxis aufgrund begrenzter Produktionsmengen nur einen kleinen Teil des Ziegelaufkommens verarbeiten kann. Hier sind weitere Optionen wie das Recycling als Pflanzsubstrat oder die Wiederverwendung (Reuse) von Ziegeln notwendig. Diese konnten jedoch aufgrund der lückenhaften Datenlage nicht mittels einer Ökobilanz bewertet werden und als Grundlage für die Abschätzung eines landesweiten Einsparpotentials genutzt werden. Ähnliches gilt für das Keramik-Recycling. Das Recycling von Bodenaushub bietet ebenfalls ein Einsparpotential 11.000 t CO₂ eq im Vergleich zur Stoffliche Verwertung in technischen Bauwerken ohne bautechnische Anforderungen. Durch aufwendigere Recyclingprozesse wie die Nassklassierung könnte aber eine weitere Verbesserung der Umweltwirkungen möglich sein. Das Porenbetonrecycling weist mit 101.000 t CO₂ eq aufgrund der innovativen Recyclingansätze ein relativ hohes Einsparpotential im Vergleich zur derzeitigen Deponierung auf. Das Einsparpotential beim Gips-Recycling beläuft sich auf 12.800 t CO₂ eq verglichen mit der aktuellen Deponierung.

Auch wenn in der vorliegenden Studie so genau wie möglich gearbeitet wurde, unterliegen die berechneten Zahlen Unsicherheiten und sind daher vor allem ein Anhaltspunkt für die zu erwartende

Größenordnung der Umweltwirkungen. Des Weiteren fehlt die Bewertung einzelner Verwertungsoptionen aufgrund einer lückenhaften oder mangelhaften Datenlage. Dies ist dringender Forschungsbedarf, da sonst richtungsweisende Entscheidungen ggf. falsch getroffen werden könnten, wenn bspw. die Wiederverwendung von Ziegeln nur aus mangelnder Datenlage und Bewertung für konkrete Handlungen und Investitionsentscheidungen nicht näher in Betracht gezogen wird.

Tabelle 3 - Übersicht der modellierten Verwertungspfade und der erwarteten jährlichen Treibhausgas-Einsparpotentiale in Baden-Württemberg

Input	Verwertungspfad 1	Verwertungspfad 2	Verwertungspfad 3	Verwertungspfad 4	Verwertungspfad 5	gesamtes Einsparpotential
Betonbruch	Stoffliche Verwertung in technischen Bauwerken ohne bautechnische Anforderungen: 24.000 t CO ₂ eq	Recycling im Straßenbau: 16.000 t CO ₂ eq	Recycling im Beton (Grobkörnung 4/22): 11.000 t CO ₂ eq	Recycling im Beton (Grob- und Feinfraktionen): -117.000 t CO ₂ eq	Reuse von Betonbauteilen, unzureichende Datenlage	141.000 t CO₂ eq
Ziegelbruch	Stoffliche Verwertung in technischen Bauwerken ohne bautechnische Anforderungen: 12.000 t CO ₂ eq	Recycling im Straßenbau: 17.000 t CO ₂ eq	Recycling im Beton (Grobkörnung 4/22): 17.000 t CO ₂ eq	Recycling in Zementkalkputz: -10.000 t CO ₂ eq	Reuse von Ziegeln, unzureichende Datenlage	11.000 t CO₂ eq
Keramik	Stoffliche Verwertung in technischen Bauwerken ohne bautechnische Anforderungen: 300 t CO ₂ eq	Recycling im Straßenbau: 400 t CO ₂ eq	Recycling im Beton (Grobkörnung 4/22): 400 t CO ₂ eq	Recycling in Zementkalkputz: -10.000 t CO ₂ eq	Reuse von Keramikbauteilen, unzureichende Datenlage	10.150 t CO₂ eq
Bodenaushub	Verfüllung, Stoffliche Verwertung in technischen Bauwerken ohne bautechnische Anforderungen: 21.000 t CO ₂ eq	Gewinnung von Gesteinskörnung für die Betonproduktion (Nassaufbereitung)	Recycling Filterkuchen in Lehmziegelproduktion: 10.000 t CO ₂ eq			11.000 t CO₂ eq
Porenbeton	Deponierung: 1.000 t CO ₂ eq	Recycling in Leichtbeton: -50.000 t CO ₂ eq	Recycling in Porenbeton: -64.000 t CO ₂ eq	Recycling in Belit-Zementklinker: -100.000 t CO ₂ eq	Reuse von Porenbetonbauteilen, unzureichende Datenlage	101.000 t CO₂ eq
Gipshaltiges Material	Deponierung: 4.600 t CO ₂ eq	Recycling in Gipskartonplatte: -8.200 t CO ₂ eq			Reuse von Gipsplatten, unzureichende Datenlage	12.800 t CO₂ eq

4 Arbeitspaket 3 - Technologie- und Investitionsbedarf

Ziel des dritten Arbeitspaketes war die systematische Identifikation derzeitiger und innovativer/neuartiger Technologien für eine hochqualitative (bzw. closed-loop/ kreislaufgerechte) Verwertung der Stoffströme in der Zukunft. Zusätzlich wurden die potenziell notwendigen Investitionen, die möglichen Jahreserlöse und die zu erwartenden Betriebskosten je SRZ-Stufe unter verschiedenen Annahmen (u.a. Technologien) abgeschätzt. Die Ergebnisse sind im Folgenden dargestellt:

4.1 *Technologierecherche*

Das Unterarbeitspaket verfolgte zwei komplementäre Ziele:

1. **Bestandsaufnahme** der in baden-württembergischen Recyclingbetrieben bereits implementierten Aufbereitungs- und Upcyclingtechnologien (Umfrage)
2. **Horizontscanning** sich abzeichnender innovativer Verwertungsverfahren für Bau- und Abbruchabfälle auf Grundlage einer systematischen Literaturrecherche (2012 - 2024)

4.1.1 *Stand der Recyclingtechnik*

Durchführung der Umfrage

Im Rahmen der Recherche wurde eine Bestandsaufnahme der in baden-württembergischen Recyclingbetrieben bereits implementierten Aufbereitungs- und Upcyclingtechnologien im Rahmen einer Online-Umfrage durchgeführt. Die Umfrage richtete sich an 127 auf der Website des Qualitätssicherungssystems Recycling-Baustoffe e. V. (QRB) gelisteten Betriebe und damit an etwa ein Drittel der in Baden-Württemberg registrierten Betreiber von Recyclinganlagen. Der Einladungslink wurde am 22. Januar 2025 per E-Mail versandt, mit der Bitte um standortbezogene Weiterleitung an die verantwortlichen Stoffstrommanager.

Der Fragebogen wurde mit SoSci Survey implementiert, iterativ anhand einer Literaturrecherche und eines Fachinterviews validiert und umfasste 28 Fragen in sechs thematischen Blöcken, wobei ein Mixed-Method-Design mit quantitativen geschlossenen Items und qualitativen Freitexten angewendet wurde. Insgesamt gingen 44 Datensätze ein, von denen 33 den quantitativen Kernteil vollständig ausfüllten und damit für eine Auswertung nutzbar waren. Dies entspricht einer Rücklaufquote von rund 25 Prozent.

Auswertung

Betriebliche Struktur. Drei Viertel der Betriebe beschäftigen nach eigenen Angaben aus der Umfrage weniger als sieben Mitarbeitende im Recyclingprozess; keiner überschreitet 30 Beschäftigte. Knapp die

Hälfte der Betriebe verarbeitet unter 25.000 t/a, während nur zwei Standorte mehr als 300.000 t/a erreichen. Die mittlere Anlagenauslastung liegt bei 48 %; Großbetriebe (> 75.000 t/a) melden rund 73 % Auslastung, Kleinbetriebe melden rund 35 %.

Eingangsmaterial. Betonbruch wird von allen Betrieben angenommen und macht durchschnittlich 41 % des Inputs aus, allerdings mit einer großen Spannweite zwischen 10-95 %. Ziegelbruch, gemischter Bauschutt und Straßenaufbruch nehmen ebenfalls mindestens drei Viertel der Betriebe an. Bodenaushub, Gleisschotter, Gips- und gemischte Baustellenabfälle werden deutlich seltener verarbeitet (Abbildung 7). Die von den befragten Unternehmen selbst geschätzten Recyclingquoten sind für Betonbruch ($\approx 97\%$), Straßenaufbruch ($\approx 92\%$) und Ziegelbruch ($> 90\%$) hoch, sinken jedoch bei gemischtem Bauschutt auf etwa 85 %.

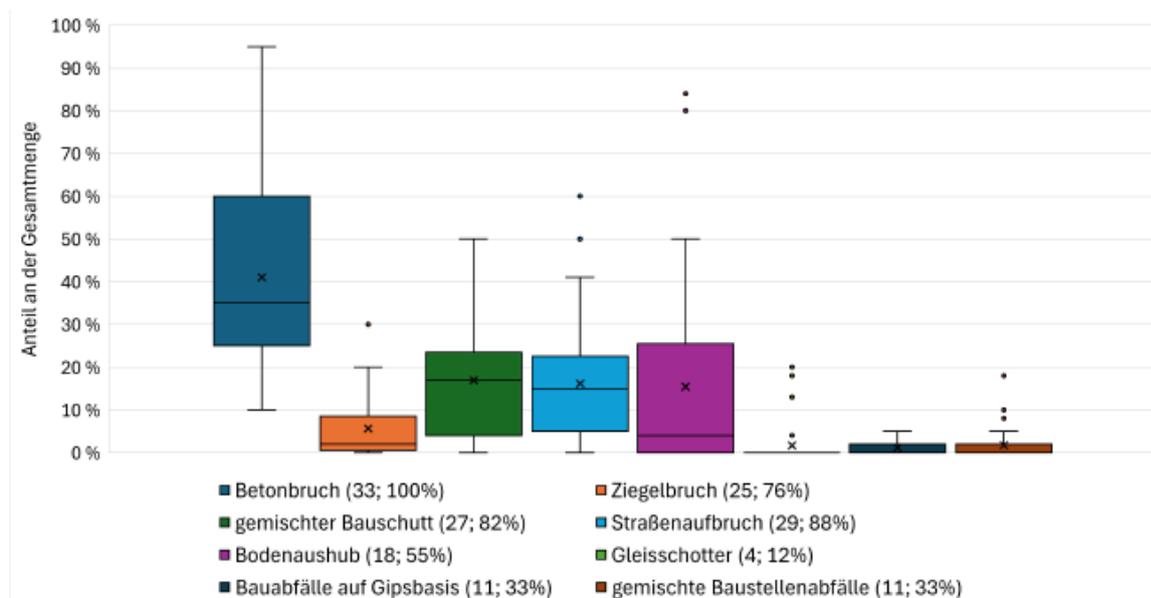


Abbildung 5 - Zusammensetzung des Eingangsmaterials bei den befragten Betrieben (Anzahl Nennungen, Angabe in Prozent an Eingangsmaterial je Material)

Produktion. Fast sämtliche an der Umfrage teilnehmende Unternehmen (31 von 33) stellen RC-Baustoffe der Materialklasse RC-1² her. Bei der Hälfte dieser Betriebe entfallen sogar über 90 % ihrer Gesamtproduktion auf den Anwendungsbereich im Straßenbau. Im gewichteten Mittel beansprucht RC-1 damit rund 69 % der gesamten hergestellten RC-Menge der befragten Unternehmen. Lediglich drei Betriebe stellen RC-2- oder RC-3-Erzeugnisse³ her, was sich mit dem in der Literatur beschriebenen, kaum existenten Markt für diese Qualitäten deckt. Rund 40 % der Betriebe produzieren zusätzlich rezyklierte Gesteinskörnungen (RC-GK) für R-Beton. Dies geschieht fast ausschließlich bei Unternehmen mit Durchsätzen >75.000 t/a und erreicht im Einzelbetrieb nur 3-30 % der Gesamtmenge,

² Gemäß Ersatzbaustoffverordnung

³ Siehe 2

aggregiert sind dies jedoch bei den befragten Unternehmen 170.000-248.000 t/a. Damit bestätigt die Umfrage, dass der Einstieg in die Produktion hochwertiger RC-Gesteinskörnungen eng an hohe Durchsatzmengen und entsprechend komplexe Anlagentechnik gekoppelt ist.

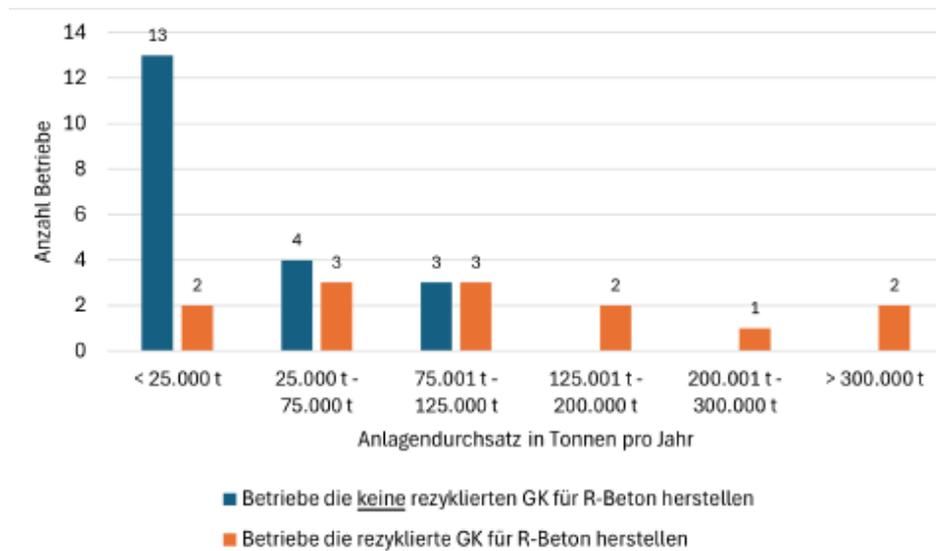


Abbildung 6 – Herstellung von RC-GK in den an der Umfrage teilnehmenden Unternehmen

Neben diesen Hauptströmen nennen einzelne Betriebe auch RC-Mix 0/45, klassifiziertes Bodenmaterial BM-0 bis BM-F3 oder RC-Sand 0/4, die sie produzieren. Diese bleiben allerdings quantitativ unbedeutend und werden vor allem dort erzeugt, wo spezifische regionale Absatzmöglichkeiten bestehen. Vier Unternehmen verarbeiten einen Großteil ihres Inputs für die stoffliche Verwertung in technischen Bauwerken ohne bautechnische Anforderungen, während ein weiterer Betrieb RC-Körnungen für Asphaltmischanlagen gewinnt.

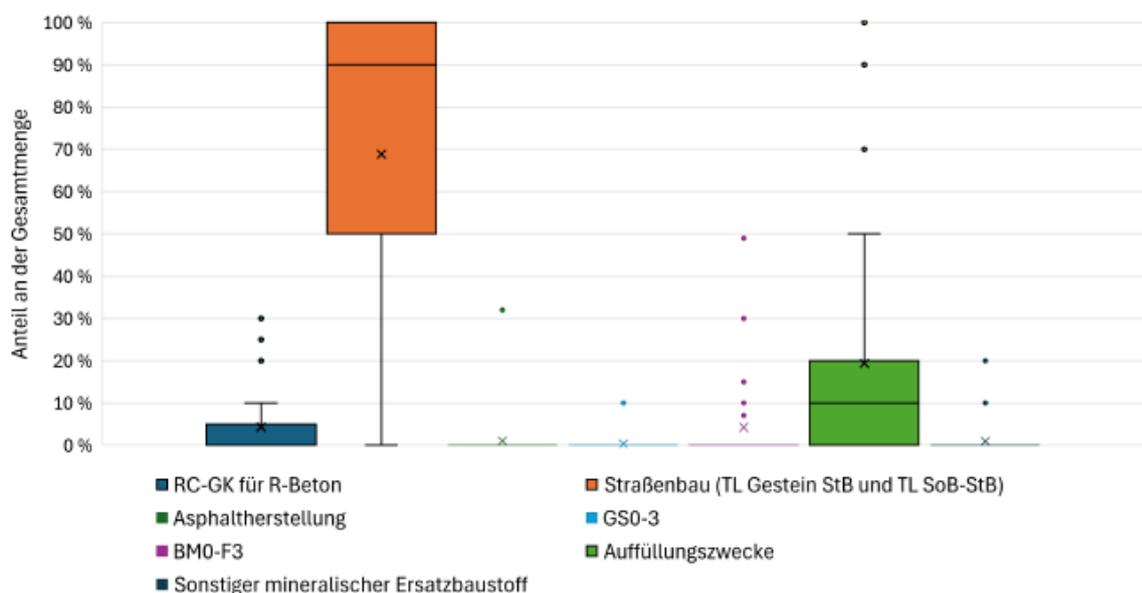


Abbildung 7 - Einsatzbereiche hergestellter Materialien der befragten Unternehmen

Methodisch ist dabei zu beachten, dass die Mengenangaben zur RC-Produktion aus dem gemeldeten Anlagendurchsatz der befragten Unternehmen abgeleitet wurden. Da Abtrennverluste und Sortierreste nicht separat quantifiziert wurden, liegt der tatsächliche Output an RC-Materialien zwangsläufig unter den hier berechneten Werten, was die Ergebnisinterpretation relativiert.

Prozesstechnik. Rund drei Viertel der befragten Betriebe führen eine Vorabsiebung durch, in praktisch allen Fällen mittels Rosten: Von 23 genannten Installationen entfallen acht auf feste und vierzehn auf bewegte Varianten. Innerhalb der bewegten Varianten dominieren Schwing- und Stangenroste, während Rollen- oder Sternsiebe nur sporadisch vorkommen. Trommelsiebe ergänzen das Rostsystem lediglich in drei Betrieben und fungieren dort als Sekundäraggregate, um feinkörnige Störstoffe zu entfernen.

Die anschließende Zerkleinerung stützt sich fast durchweg auf Prallbrecher: 27 der 33 Unternehmen nutzen diesen Brechertyp meist als alleinige Zerkleinerungsstufe. Wo der Durchsatz höher ist oder der Input heterogener ausfällt, wird der Prallbrecher häufig hinter einen Backenbrecher geschaltet. Sechs Betriebe nutzen diese Zwei-Stufen-Kaskade, zwei weitere ergänzen sogar eine dritte Brecherstufe (Kegel- oder Fräsbrecher). Rein einstufige Backenbrecherlinien finden sich dagegen fast nur in rein mobilen Betrieben mit vergleichsweise sortenreinem Betonbruch.

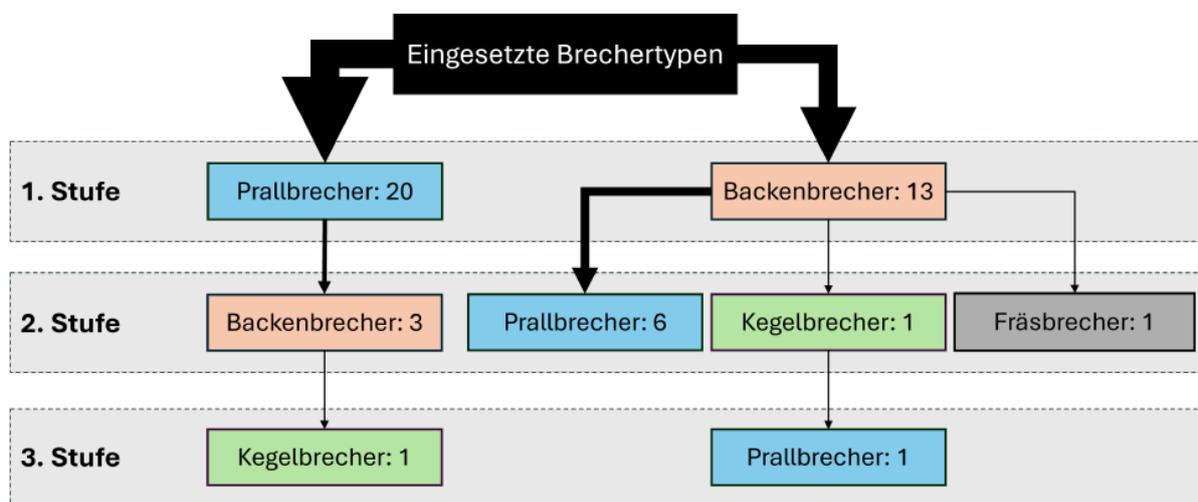


Abbildung 8 - Eingesetzte Brechertypen bei den befragten Unternehmen

Für die Zwischen- und Produktsiebung setzen vier Fünftel der Betriebe mindestens einen eigenen Siebtyp ein. Siebkasten-Schwinger sind mit 19 Installationen das Rückgrat dieser Phase; 17 davon arbeiten im Linear-, Kreis- oder Ellipsenmodus. Roste bleiben hier die Ausnahme (zwölf Nennungen), ebenso Trommelsiebe (drei Nennungen), während Diskscheider und Spannwellensiebe in der Stichprobe gar nicht vertreten sind.

Eingesetzte Anlagen zur Sortierung	Häufigkeit
Trockene Sortierung	24
Händische Sortierung	18
Windsichter	9
Aufstromsichter	4
Querstromsichter	3
Schrägbandscheider	1
Nasse Sortierung	4
Schwimm-Sink-Sortierung	4
Schrägabscheider	1
Leichtstoffabscheider	2
Aufstromsortierung	3
Schnecken-Aufstromsortierung	1
Sortierverfahren für Eisen und NE-Metalle	24
Überbandmagnetscheider	23
Trommelmagnetscheider	5

Abbildung 9 - Eingesetzte Anlagen zur Sortierung bei den befragten Unternehmen (Mehrfachnennung möglich)

Die Sortierstufe zeigt - abhängig vom Anlagendurchsatz - die größte Variabilität. Trockene Verfahren werden in 24 Betrieben eingesetzt, häufig als Kombination aus Überbandmagnetscheider (23 Nennungen) zur Eisenabtrennung und händischer Klaubsortierung (18 Nennungen). Neun Betriebe ergänzen Windsichter. Deren Untertypen Auf-, Quer- oder Zick-Zack-Sichter erscheinen vor allem dort, wo Leichtstoffe wie Holz oder Kunststoff systematisch ausgeschleust werden müssen. Nasse Dichteseparation (Schwimm-Sink- oder Aufstrom-Verfahren) bleibt vier großvolumigen Standorten vorbehalten; alle verarbeiten jährlich mehr als 125.000 t und kombinieren diese Technik stets mit mindestens drei weiteren Sortierverfahren.

Ein deutlicher Skaleneffekt wird sichtbar, sobald der Standort einen Durchsatz von 75.000 t/a überschreitet: Mehr als die Hälfte dieser Betriebe betreibt zwei- bis dreistufige Brechsysteme und durchschnittlich drei Sortierverfahren. Kleinere Anlagen begnügen sich demgegenüber meist mit einer Baskette aus Rost, Prallbrecher, Schwingsieb und Überbandmagnet.

Zukunftstechnologien. Freitextantworten der befragten Unternehmen mit Nennungen zu Smart Crusher, Advanced Dry Recovery (ADR)/ Heating Air and Classification System (HAS), NIR-Sortierung und Karbonatisierung zeigen grundsätzliches Interesse, aber ökonomische Vorbehalte. Man rechnet mit Investitions- und Betriebskostensteigerungen und zweifelt an der Sortierqualität oder Prozessrobustheit, solange kein Marktaufschlag für hochwertige Rezyklate gezahlt wird.

Die Antworten der befragten Unternehmen spiegeln überwiegend kleinere Akteure mit vergleichsweise einfacher Technik wider; damit korrespondiert der Schwerpunkt auf RC-Baustoffe der Klasse RC-1 für den Straßenbau. Die geringe Verbreitung anspruchsvollerer RC- Gesteinskörnungen deutet auf technische und wirtschaftliche Markteintrittsbarrieren hin. Gleichzeitig zeigen die detaillierten

Anlagenabfragen, dass höhere Durchsatzmengen tendenziell mit komplexeren, mehrstufigen Linien und breiter gefächerten Sortierverfahren einhergehen - ein Hinweis auf Skaleneffekte und Professionalisierung im High-Value-Segment. Methodisch bleibt zu beachten, dass die Umfrage nicht zwischen stationären und mobilen Anlagen im Durchsatzteil differenzierte; mögliche Mengendopplungen oder Lücken in der Auslastungsangabe sind daher nicht auszuschließen. Auch die beschränkte Rücklaufquote limitiert die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die gesamte Branche. Zusätzlich erfasst die Untersuchung nur QRB-Mitglieder, beruht auf Selbstauskunft und weist mit 33 Fällen eine begrenzte Repräsentativität auf; Selbstauswahl, Schätzungen und die nur indirekte Trennung stationärer vs. mobiler Durchsätze erzeugen weitere Unsicherheiten.

Die Umfrage bestätigt ein heterogenes, mehrheitlich klein- und mittelständisch geprägtes Branchenbild. Erst bei hohen Jahresdurchsätzen erweitern größere Betriebe die verbreiteten Basis-Technologien um windsichtergestützte Leichtstoffabtrennung oder um nasse Dichteseperation - Prozessmodule, die den Übergang von mengen- zu qualitätsorientiertem Recycling ermöglichen, jedoch bislang keine flächendeckende Diffusion erfahren haben. Dennoch signalisieren die befragten Unternehmen Offenheit für sensorbasierte Sortierung oder CO₂-basierte Nachbehandlung, sofern politische Rahmenbedingungen (z. B. CO₂-Bepreisung, Deponieabgaben) und verlässliche Absatzmärkte den Mehraufwand honorieren.

Auch die Literatur bestätigt, dass sich die derzeitigen Recyclingbemühungen in der EU aufgrund ihres hohen Input-Anteils und ihrer Kosteneffizienz bei der großtechnischen Aufbereitung auf mineralische Fraktionen konzentrieren (Cristóbal García et al., 2024). Die Anlagen zur sind je nach regionalen Gegebenheiten, darunter technologische, rechtliche und wirtschaftliche Faktoren, unterschiedlich ausgelegt (Galán et al., 2019). In der Regel werden große Mengen mineralischer Bau- und Abbruchabfälle in Recyclinganlagen oder mobilen Aufbereitungsanlagen vor allem durch mechanisches Zerkleinern und Sieben verarbeitet (Gálvez-Martos et al., 2018; Müller & Martins, 2022). Diese mechanischen robusten und kostengünstigen Anlagentechniken eignen sich am besten für große Mengen relativ homogener mineralischer Fraktionen ohne starke Verunreinigungen. Durch einfaches Sortieren (manuell und/oder magnetisch) werden Metalle und leichte Bestandteile entfernt. Metalle wie Stahl und Aluminium werden in entsprechenden Recyclinganlagen zurückgewonnen und recycelt (Cristóbal García et al., 2024). Mineralische Abfälle wie Beton, Mauerwerk oder gemischter Bauschutt werden in der Regel weiter zerkleinert, sortiert und gesiebt. Dabei entstehen in der Regel mehrere Fraktionen, die anschließend als Korngemische ohne bautechnische Anforderungen, im Straßenbau oder als rezyklierte Gesteinskörnung in R-Betonen verwendet werden.

Abbruchabfälle können, je nach Art des Gebäudes und der verwendeten Abbruchmethode, eine Vielzahl von Materialien enthalten. Ihr Volumen, ihre Heterogenität und ihr potenziell gefährlicher Inhalt stellen erhebliche ökologische und wirtschaftliche Herausforderungen für das Recycling dar, was dazu führt, dass das Potenzial von Sekundärrohstoffen oft ungenutzt bleibt. Bislang werden nur wenige Abfallströme gezielt gesammelt und/oder aufbereitet. Heterogene, gemischte oder kontaminierte Fraktionen bleiben weitgehend ungenutzt (Ferriz-Papi et al., 2024), wie sie etwa durch unsortierte Rückbauprozesse, schadstoffbelastete oder verklebte Verbundstoffe sowie durch Anhaftungen wie Mörtel und Putze entstehen. Diese Inhomogenitäten stellen erhebliche Herausforderungen für konventionelle Recyclingtechnologien dar, die oftmals nicht in der Lage sind, sortenreine und, wo anwendbar, normgerechte Stoffströme aus Mischfraktionen zu erzeugen. Infolgedessen bestehen weiterhin hohe Deponie- oder Verbrennungsquoten für bestimmte Materialien, die theoretisch als wertvolle Ressourcen dienen könnten (Galán et al., 2019). Dementsprechend ist die praktische und gleichzeitig nachhaltige Bewirtschaftung von Bau- und Abbruchabfällen sowohl in der wissenschaftlichen Literatur als auch in der politischen Strategie zu einer relevanten Frage geworden (Damgaard et al., 2022).

4.1.2 Neue Technologien

Um wertvolle Sekundärrohstoffe auch aus bisher ungenutzten/ deponierten Fraktionen zu gewinnen, müssen traditionelle mechanische Verfahren weiterentwickelt oder durch neuere Technologien ergänzt, wenn nicht sogar vollständig ersetzt werden (Potrykus et al., 2021). Selbst bei relativ homogenen Fraktionen wie Betonbruch kann eine weitergehende Behandlung wertvoll sein, etwa zur Abtrennung von Gips- oder Mörtelresten. Die Ermittlung zusätzlicher geeigneter Vorbehandlungs- und Recyclingtechnologien ist unerlässlich, um Wege zur Optimierung der Recyclingeffizienz, zur Steigerung der Qualität der Gesteinskörnung und zur Verringerung der Abhängigkeit von natürlichen Zuschlagstoffen zu finden (Cristóbal García et al., 2024).

Im Rahmen des Arbeitspakets 3 wurde daher eine umfassende Literaturrecherche zu innovativen und zukünftigen Recyclingtechnologien durchgeführt. Ziel war es; innovative Ansätze und Verfahren zu identifizieren, welche eine hochwertigere Verwertung einzelner Stoffströme im Rahmen der SRZs ermöglichen könnten. Aufbauend auf einschlägigen Fachpublikationen, Projektberichten und Datenbanken (z. B. Scopus, ScienceDirect, CORDIS, EnArgus, Förderkatalog des Bundes) wurde eine Recherche zu Publikationen im Veröffentlichungszeitraum zwischen 2012 bis 2024 durchgeführt. Dabei kamen gezielt Suchbegriffe zu zentralen Materialfraktionen (z. B. „concrete“, „brick“, „EPS“, „mineral wool“) und Verfahren („sorting“, „recycling“, „treatment“) zum Einsatz. In einem nachgelagerten Screening des Abstracts wurden ca. 85 Quellen als technisch aussagekräftig eingestuft. Relevante Studien mussten konkrete Technologien, Prozessbewertungen und/oder empirische Daten zur aktuellen Forschung

umfassen, um weiterhin in der vorliegenden Literaturlauswertung berücksichtigt zu werden. Die qualitative Analyse erfolgte in Bezug auf Materialtyp, technischem Prinzip (mechanisch, thermisch, chemisch, biologisch, sensorbasiert), Leistungsparametern und Technologie-Reifegrad (TRL). Eine Gesamtübersicht über die identifizierten Technologien bzw. Ansätze ist in Anhang B dargestellt. Die Technologierecherche zeigt, dass die Aufbereitung von Bau- und Abbruchabfällen inzwischen über ein breites Spektrum an Ansätzen verfügt, deren Reife- und Einsatzgrade jedoch stark differieren.

Für Betonrecycling wurden in EU-Projekten (z. B. C2CA und HISER) das Advanced Dry Recovery (ADR)-System (später in Kombination mit dem Heating Air and classification System (HAS)) entwickelt (Lotfi et al., 2015, Gebremariam et al., 2020). Bei diesem Verfahren werden Betonabfälle durch autogenes Mahlen zerkleinert, wodurch der Zementleim freigesetzt wird. Anschließend trennt ein ADR-Klassierer grobe, saubere Zuschlagstoffe von feinem Pulver und leichten Verunreinigungen. Die zementleimreiche Feinanteile können weiterbehandelt (HAS) und als zementbindender Zusatzstoff wiederverwendet werden. Dieser integrierte Prozess wurde im Pilotmaßstab (TRL ~7–8) in einer mobilen Anlage mit Brecher, ADR-Klassierer und Sensoren zur Qualitätskontrolle demonstriert. Durch die Rückgewinnung von zementhaltigen Feinanteilen, die sonst als Abfall anfallen würden, wird durch das fortschrittliche Recycling der Bedarf an neuem Zement und Sand vermieden, was zu erheblichen CO₂- und Energieeinsparungen führen kann (Zhang et al., 2019). Allerdings erfordern solche Systeme eine größere operative Komplexität und Investitionen und sind noch nicht in großem Maßstab industriell verfügbar (Barrau et al. 2024).

Des Weiteren kann für die Betonfraktion die CO₂-Härtung (Carbonatisierung), bei der rezyklierte Gesteinskörnungen unter atmosphärischem Druck karbonatisiert werden, zu einer dichteren Porenstruktur, reduzierter Wasseraufnahme und einer gleichzeitigen CO₂-Bindung führen (Liu et al., 2021; Sivamani et al., 2021; Zhan et al., 2018). Aufbauend auf thermo-mechanischen (Al-Bayati et al., 2016; Kalinowska-Wichrowska et al., 2020; Braymand et al., 2017) und chemischen Verfahren (Nikmehr et al., 2024; Sivamani et al., 2021) versuchen sequentielle bzw. kombinierte Verfahren z.B. neuere thermo-chemische Auslaugungsverfahren durch ein Erhitzen auf 300 bis 400°C mit milden Säuren oder Laugen den anhaftenden Zementstein weitgehend zu entfernen (Feng et al., 2024; Yunusa et al., 2022; Kazmi et al., 2019). Diese Technologien befinden sich noch in der Entwicklung (TRL 4-7) und sind bislang nur im Pilotmaßstab belegt; belastbare Daten zu Energiebedarf, CO₂-Logistik sowie Kreislaufführung der Reagenzien stehen noch aus. Zudem sind die Angaben mit Unsicherheit behaftet, da nur Daten zu Labor- bzw. Demoskalen vorliegen und die Übertragbarkeit in industrielle Maßstäbe noch getestet werden muss. Biologische Verfahren, etwa die mikrobiell induzierte Karbonatisierung der Betonfeinstoffe (Gong et al., 2022; Wang et al. 2021; Sivamani et al., 2021), sowie die elektrodynamische

Fragmentierung, die durch Hochspannungsimpulse (Dittrich et al., 2015; Gehring et al., 2015) gezielt Materialgrenzen aufbricht, zeigen im Labormaßstab hohe Trenneffizienz. Allerdings fehlen Nachweise für industrielle Durchsätze, belastbare Wirtschaftlichkeitsanalysen und Aussagen zum spezifischen Stromverbrauch. Entsprechend liegen diese Ansätze erst im niedrig bis mittleren TRL-Bereich und erfordern eine umfassende Weiterentwicklung, bevor praxisrelevante Aussagen getroffen werden können.

Ziegelhaltiges Mauerwerk bietet prinzipiell die Möglichkeit, mittels thermischen Aufblähens von gemahlenem Mauerwerksbruch zu leichten Zuschlagstoffen (Schnell et al., 2024 (REALight-Projekt), oder Feinmahlung und Kalzinierung/Alkaliaktivierung (Zhang et al.; 2023) zu reaktiven Bindemitteln aufgewertet zu werden. Es lassen sich zulässige Leichtzuschläge beziehungsweise latent-hydraulische Zusatzstoffe erzeugen, jedoch ist die Energiebilanz der Sinterung ebenso kritisch wie die Verfügbarkeit kostengünstiger Aktivatoren. Folglich bleibt abzuwarten, ob sich diese Verfahren gegen preisgünstigen Blähton oder traditionelle Zementklinker durchsetzen lassen.

Die Verwertung von EPS-Dämmstoffen kann im Wesentlichen über drei Verfahren erfolgen. Bei der mechanischen oder thermischen Verdichtung wird das Material zu Blöcken oder Pellets gepresst, wodurch sich das Volumen kostengünstig und energiearm reduziert (Bicer et al. 2021; Teipel et al., 2022). Allerdings geht die Schaumstruktur verloren, HBCD bleibt enthalten, und es kommt zu Downcycling. Die lösungsmittelbasierte Rückgewinnung, wie sie in der PSLoop- bzw. CreaSolv®-Technologie eingesetzt wird, löst Polystyrol selektiv, entfernt HBCD vollständig und liefert Polymergranulat in Neuausgangsmaterialqualität (Schlummer et al. 2017). Sie ermöglicht damit einen geschlossenen Stoffkreislauf, ist jedoch aufgrund hoher Investitions- und Betriebskosten sowie der erforderlichen Lösungsmittelrückgewinnung wirtschaftlich anspruchsvoll. Pyrolytische Verfahren zersetzen EPS unter Sauerstoffausschluss zu Styrol-Öl und anderen Wertstoffen. Zeolith-Katalysatoren steigern die Styrolausbeute, und auch HBCD-haltiges EPS kann verwertet werden (Bergs et al. 2020). Dennoch erfordert die Technologie eine energieintensive Prozessführung, eine Vorverdichtung des Materials und eine effektive Behandlung des entstehenden Bromwasserstoffgases. Zudem besteht Optimierungsbedarf hinsichtlich Katalysatorstabilität, Energierückgewinnung und Bromemissionskontrolle (Schleier et al. 2022).

Mineralwolle wird heute zum Teil über werkinterne Mahleinrichtungen in den Produktionsprozess zurückgeführt, was Teilprozesse mit TRL 8-9 dokumentieren (Sattler, 2024). Eine echte Kreislaufführung von Altmaterial, inklusive vollständigem Einschmelzen und Wiederausziehen von Fasern, ist dagegen bislang nur auf Labor- und Pilotskala untersucht (Yap et al., 2021; Rywotycki et al., 2024). In einer Studie von Yliniemi et al. (2016) wurde Mineralwolle (Stein- und Glaswolle) als alleinige Ausgangsstoffe für alkalisch aktivierte Materialien ohne Zusatz von Co-Bindemitteln untersucht. Die Fasern wurden

zunächst mit einer Vibrationsscheibenmühle pulverisiert, um ihre Faserstruktur zu beseitigen, und anschließend mit einer Natriumaluminatlösung alkalisch aktiviert. Die Ergebnisse belegen ein grundsätzliches Potenzial von Mineralwolleabfällen als reaktiver Vorläufer für die Herstellung von alkalisch aktivierten Bindemitteln. Die Schmelz-Quench-Route erzeugt zwar hochreaktive, zementersetzende Gläser, verlangt aber Temperaturen von über 1400 °C und verursacht erhebliche Investitionen sowie Energiekosten, die nur bei hohen CO₂-Preisen oder Deponieabgaben realistisch kompensiert werden könnten (Doschek-Held et al., 2024; Sattler, 2024).

Für gipsbasierte Baustoffe zeigt die Recherche, dass sensorgestützte Sortierung, etwa zur Detektion von kontaminiertem Gips-Stuck, und thermische Reaktivierung (Kalzinierung) den Stoffkreislauf zunehmend schließen könnten (Yap et al., 2021). Demonstratoren wie der REALight-Prozess koppeln mechanisches Mahlen, Drehrohrofen-Sinterung und SO₂-Scrubbing, um gleichzeitig RC-Gips hoher Reinheit und leichte Granulate zu produzieren (Schnell et al., 2024). Gleichwohl liegen für eine flächendeckende Einführung in industriellem Maßstab noch keine Wirtschaftlichkeitsdaten auf Standortebene vor.

Holzfraktionen könnten von neuen und zunehmend von kombinierten Ansätzen profitieren. Sensorbasierte Sortierung (HSI- (Hyperspektrale Bildgebung) und NIR (Nah-Infrarot)-Erkennung, Rapid-FLIM) trennt unbehandelte (A1/A2) von beschichteten oder imprägnierten Hölzern (A3/A4) mit hoher Präzision und ermöglicht sortenreine Holzchips für MDF/HDF (Leiter et al., 2023). Verfahren wie *MDF-Recovery*[®] oder das Wood2Wood-Framework kombinieren milde Hydrolyse und mechanische Zerkleinerung, um einen geschlossenen MDF-Kreislauf zu erreichen (Kües et al., 2021; Kekes et al., 2024). Dampfexplosion (150–190 °C, 10–20 min) entfernt bis zu 80 % Harnstoff-Formaldehyd-Harze, erhält die Faserintegrität und erlaubt ≥20 % Ersatz in MDF-Linien, erfordert jedoch Abgasbehandlung. Niedertemperatur-Pyrolyse depolymerisiert Klebstoffe unter Sauerstoffausschluss bei Erhalt der Fasern, während biologische Dekontamination (5–14 Tage) Schwermetalle und PAK mit geringem Energieeinsatz abbaut, jedoch lange Prozesszeiten aufweist. Erste Pilotanlagen müssen Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen beherrschen und die Langzeitstabilität der recycelten Fasern nachweisen (Besserer et al., 2021).

Stoffstrom	Ansätze
Mineralik	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanische, chemische, thermische & biologische (Kombi-) Verfahren zur Rezyklat-Qualitätssteigerung <ul style="list-style-type: none"> ○ Ziel: Verbesserung der Sekundärrohstoff-Eigenschaften (Druckfestigkeit, Wasserabsorption), CO₂-Bindung, Feinfraktionsaufbereitung. ○ TRL 2-9: offene Fragen zu Inputvariabilität, Prozessintegration, Wirtschaftlichkeit
EPS-Dämmung	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanische Verdichtung, Lösemittelrückgewinnung, Pyrolyse zur Monomerrückgewinnung <ul style="list-style-type: none"> ○ Ziel: Wiederverwendbarkeit, Entfernung der Schadstoffe (v. a. HBCD) ○ TRL 5-9: offene Fragen zu Kosten, Energieverbrauch, Marktintegration recycelter Polymere
Altholz	<ul style="list-style-type: none"> • Sortierung (KI-gestützt), mechanische/chemische Fasertrennung, biologische Dekontamination <ul style="list-style-type: none"> ○ Ziel: Erkennung und Rückgewinnung sauberer Holzfasern trotz Bindemitteln und Kontamination ○ TRL 3-6: offene Fragen zu Harztrennung, Echtzeitsortierung, Prozesskomplexität bei Altholz

Mineralwolle	<ul style="list-style-type: none"> • Thermochemische Behandlung, Alkaliaktivierung <ul style="list-style-type: none"> ○ Ziel: Nutzung als Zementersatz, Mineralwolle-Geopolymer für neue keramische/ betonartige Produkte ○ TRL 3-5: offene Fragen zu Aktivierung, Langzeitverhalten
Gips	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanisch-thermisch, chemisch-reinigend, thermische Dekontamination <ul style="list-style-type: none"> ○ Ziel: Rückgewinnung hochwertiger Gipsflocken/ Pulver ○ TRL 4-7: offene Fragen zu Reinheitsanforderungen, Energieintensität bei Aufbereitung

Tabelle 4 - Kurzübersicht der identifizierten innovativen Aufbereitungs-/Recyclingtechnologien und -potentiale

Innovative Recyclingtechnologien bieten Potenzial zur Herstellung hochwertiger Sekundärrohstoffe aus Bau- und Abbruchabfällen (Tabelle 2), erfordern jedoch standortspezifische Anpassungen und stabile/konstante und mengenmäßig relevante Inputströme. Die wirtschaftliche Umsetzung wird in vielen Fällen durch geringe TRL und unklare bzw. hohe Investitionen und Betriebskosten limitiert. Angesichts der hohen Materialheterogenität von Altmaterial aus Bau- und Abbruchabfällen ist eine Kombination mehrerer Verfahren zweckmäßig. So kann eine mechanisch-sensorische Grobtrennung durch Nachbehandlungen - etwa CO₂-Härtung oder Mörtelentfernung - ergänzt werden, um die Materialqualität für hochwertige Anwendungen zu steigern.

Stoffstrom	Aktueller Recyclingpfad	Forschungs- & Innovationspotenzial <i>Mittelfristig Langfristig</i>
Mineralik	Brechen/Sichten → RC-Gestein v. a. Straßenbau	Thermische Mörtelentfernung und Feinteilauflbereitung, CO ₂ -Härtung, Hybrid-Ansätze (chemisch/thermisch/biologisch)
EPS-Dämmung	Verdichten → thermische Verwertung	CreaSolv®/PSLoop-Lösemittelroute, katalytische Pyrolyse
Altholz	A1/A2 → Spanplatten; A3/A4 → Energie	HSI-/KI-Sortierung, MDF-Rückgewinnung in Closed-loop-Faser
Mineralwolle	Deponierung	Thermo-chemisches Schmelz-Quench → Zementzusatzmittel, Wool2Loop-Geopolymer
Gips	Verwertung, Deponierung	REALight-Thermomechanisches Verfahren, Säure-Laugung → RC-Gips

Aus ökologischer Sicht könnten nahezu alle betrachteten Technologien prinzipiell den Bedarf an Primärrohstoffen und die Deponiebelastung reduzieren. Allerdings steigen Energie- und Chemikalienverbräuche zum Teil erheblich, sobald Prozesswärme, Lösemittel oder Druck-CO₂ eingesetzt werden. Der tatsächliche Netto-CO₂-Vorteil hängt daher entscheidend von systemischen Gutschriften, etwa der Substitution von Zementklinker oder primärem Polymer, sowie vom regionalen Strommix ab. Ökonomisch betrachtet könnten einige Ansätze erst unter verschärften regulatorischen Rahmenbedingungen (Deponieverbote, CO₂-Bepreisung, POP-Konformität (persistente organische Schadstoffe)) rentabel werden.

Angesichts der heterogenen Inputqualität erscheint eine modulare Prozessarchitektur in SRZ zweckmäßig: Zunächst erzeugt eine mechanisch-sensorische Grobtrennung möglichst sortenreine Hauptfraktionen. Anschließend heben spezifische Nachbehandlungen (beispielsweise CO₂-Härtung, Mörtelentfernung oder lösungsmittelbasierte Polymerreinigung) die Materialqualität auf ein Niveau, das den Einsatz in hochwertigen Anwendungen erlaubt.

Um die Technologiepfade skalen- und standorttauglich zu validieren, fehlen weitere Demonstrationsprojekte und dabei simultan Ökobilanzen und techno-ökonomische Analysen durchführen. Parallel ist eine methodische Harmonisierung dieser Bewertungsinstrumente anzustreben. Bislang divergieren Systemgrenzen, Substitutionsfaktoren und Sensitivitätsannahmen zwischen den vorliegenden Studien oft stark, sodass eine Vergleichbarkeit nur eingeschränkt gegeben ist. Ergänzend können regulatorische Instrumente wie Mindestquoten für hochwertige Rezyklate, Deponieabgaben, POP-konforme Behandlungspflichten oder CO₂-Schattenpreise den Markthochlauf der neuen Technologien begünstigen. Schließlich kann die Einführung von digitalen Materialpässen und damit einhergehend ein besserer selektiver Rückbau die Inputreinheit steigern und Aufbereitungskosten senken.

Zusammenfassend verdeutlichen die Ergebnisse der Literaturrecherche, dass derzeit an einem diversifizierten Werkzeugkasten an Technologien geforscht wird, um unterschiedlichste Stoffströme sukzessive in reine, geschlossene Kreisläufe zu überführen. Neue Technologien ermöglichen - bei wirtschaftlich tragfähiger Skalierung - einen signifikanten Beitrag zur Reduktion von Primärrohstoffverbrauch und Deponierung. Kurzfristig lassen sich durch verbesserte (Vor-) Sortierung und gezielten mechanischen Mörtelabtrag deutliche Qualitätssteigerungen erzielen. Mittelfristig eröffnen mechanisch-thermische und sequenzielle Prozesse (z.B. Kombination von chemisch und mechanischen Verfahren) die Chance, Sekundärrohstoffe herzustellen, deren Leistungs- und Umweltprofile mit denen primärer Roh-/Baustoffe konkurrieren. Der Einsatz von fortschrittlichen Sortiertechnologien ermöglicht eine wesentlich präzisere Stoffstromseparation als herkömmliche manuelle oder rein granulometrische Verfahren und stellt damit eine wichtige Grundlage für alle nachgeschalteten materialspezifischen bzw. Closed-loop Verwertungsrouten dar. Damit die Potenziale realisiert werden, bedarf es jedoch eines koordinierten Vorgehens von Technikentwicklung, Wirtschaftsförderung und Rahmensetzung sowie Vorbildfunktion durch die Politik. Dazu sind weitere Demonstrationsvorhaben initiiert durch gezielte Anreize für eine breitere Datenbasis gemeinsam mit standardisierten Bewertungsmethoden notwendig.

Für SRZ bedeutet dies eine strategische Neuausrichtung hin zu modular aufgebauten, technologieoffenen Anlagen, die verschiedene Trenn- und Aufbereitungsverfahren flexibel kombinieren können. Langfristig können sie so zu zentralen Infrastrukturen einer zirkulären Bauwirtschaft werden, sofern ökonomische Rahmenbedingungen und regulatorische Standards dies unterstützen. Daher werden im Folgenden Investitionen und Betriebskosten für unterschiedliche Technologien und SRZ-Stufen näher betrachtet. Ökologische Verbesserungspotentiale wurden in AP2 beleuchtet.

4.2 *Techno-ökonomische Analyse für einen Pilot-Standort und Baden-Württemberg*

Im Arbeitspaket 3 wurde zudem eine techno-ökonomische Bewertung unterschiedlicher Varianten von SRZ vorgenommen. Die Analyse basiert auf einem theoretischen Pilot-Standort in Baden-Württemberg mit vorhandener, genehmigter und erschlossener Fläche, welche befestigt oder im Idealfall versiegelt ist und eine Größe von mindestens 40.000 m² hat. Es werden sowohl Investitionen als auch Betriebskosten berücksichtigt. Letztere beinhalten Aufwendungen für Energie (Strom und Diesel), Personal, Instandhaltung und Reparaturen, Entsorgung nicht verwertbarer Fraktionen sowie Güteüberwachung der hergestellten RC-Baustoffe. Auf der Erlösseite werden sowohl Annahmgebühren für Abfälle als auch Verkaufserlöse für aufbereitete Sekundärrohstoffe berücksichtigt. Die Preise orientieren sich an den regionalen Marktbedingungen im Großraum Stuttgart und dienen als Grundlage für eine Übertragung auf das gesamte Bundesland Baden-Württemberg.

4.2.1 *Annahmen der Wirtschaftlichkeitsberechnung*

Die Ergebnisse der techno-ökonomischen Analyse basieren auf mehreren grundlegenden Annahmen, die zur Vereinheitlichung und Vergleichbarkeit der verschiedenen SRZ-Varianten getroffen wurden. Diese Annahmen dienen als Referenzrahmen für die Investitions-, Erlös- und Kostenkalkulationen und ermöglichen eine modellhafte Bewertung unter idealtypischen Bedingungen. Folgende Annahmen wurden getroffen:

1. **Vorhandene Infrastruktur**

Für die techno-ökonomischen Betrachtungen wird angenommen, dass am jeweiligen Standort eine vollständig erschlossene und versiegelte bzw. zumindest befestigte Fläche vorhanden ist. Diese verfügt über die notwendige Infrastruktur wie Stromanschluss, Frisch- und/oder Brauchwasserversorgung sowie - falls erforderlich - eine geeignete Wasseraufbereitung. Weiterhin wird unterstellt, dass sämtliche immissionsschutz- und baurechtlichen Genehmigungen bereits vorliegen. Die hierfür anfallenden Kosten bewegen sich nach Erfahrungswerten im hohen sechsstelligen bis niedrigen siebenstelligen Bereich. Einen wesentlichen Einfluss haben dabei die Erschließung (ca. 0,5–1,0 Mio. €) und die Befestigung/Versiegelung der Betriebsfläche (ca. 40 bis 80 €/m²). Die Gebühren der immissionsschutzrechtlichen Genehmigung variieren in Abhängigkeit von der Anlagengröße und liegen typischerweise im mittleren bis oberen fünfstelligen Bereich. Die Kosten für die Erschließung, Versiegelung und immissionsschutzrechtliche Genehmigungsverfahren können sich regional stark unterscheiden und liegen im Bereich zwischen 1 und 5 Millionen €. Diese Kosten haben einen wesentlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der SRZ Standorte, es ist allerdings davon auszugehen, dass an etablierten Standorten

bereits eine entsprechende Infrastruktur vorhanden ist. Die Nutzung bestehender Aufbereitungsplätze sollte sowohl aus wirtschaftlicher als auch aus ökologischer Sicht priorisiert werden, daher werden Erschließungs-, Versiegelungs- und Genehmigungskosten in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt.

2. Konstante Abfallströme

Die Analysen setzen gleichbleibende Inputmengen und -qualitäten über die Betriebsdauer hinweg voraus. Saisonalität, Schwankungen im Baubereich oder Veränderungen im Rückbauverhalten werden nicht berücksichtigt. Die Betrachtung der Inputmengen orientieren sich an der gewählten Aufbereitungskapazität. Aus der Kostenrechnung resultieren Mindestmengen der Abfallschlüssel 170101 und 170107 für die einzelnen Varianten:

- SRZ 1 klein: 30.000 t/a
- SRZ 1 groß: 40.000 t/a
- SRZ 2 groß: 80.000 t/a

3. Vollständige Abnahme der Recyclingbaustoffe

Es wird davon ausgegangen, dass der Absatzmarkt für die produzierten RC-Materialien vorhanden ist und sämtliche aufbereiteten Stoffe ohne Einschränkungen verkauft werden können. Marktverzerrungen oder Nachfrageeinbrüche wurden nicht in die Kalkulation einbezogen. Es werden die Marktpreise im Großraum Stuttgart angesetzt und exemplarisch für ganz Baden-Württemberg angewendet. Die Preise unterliegen in der Praxis starken regionalen Schwankungen. Die Preissituation ist maßgeblich vom regionalen Angebot an Primärgestein und den Entsorgungsmöglichkeiten für mineralische Abfälle abhängig.

4.2.2 Hinweise zur Kapitalbeschaffung

Ein wesentliches Risiko bei der Realisierung von Sekundärrohstoffzentren liegt in der Kapitalbeschaffung für die Anfangsinvestitionen. Besonders bei Varianten mit hohen Investitionssummen - etwa bei komplexen Sortiertechniken - kann die Finanzierung insbesondere für kleinere Betriebe eine erhebliche Herausforderung darstellen. Neben klassischen Finanzierungsmodellen (z. B. Bankdarlehen) könnten zukünftig daher auch öffentliche Förderprogramme, Beteiligungsmodelle oder Leasingkonzepte eine Rolle spielen. Die in der Analyse dargestellten Ergebnisse gehen von einer erfolgreichen Finanzierung aus, berücksichtigen jedoch keine konkreten Finanzierungskosten, Zinssätze oder Förderquoten.

4.2.3 Technische Grundlagen

Untersucht wurden zunächst die Varianten SRZ 1 und SRZ 2, jeweils in kleiner und großer Ausführung. SRZ 1 basiert auf einer konventionellen mechanischen Aufbereitung mit einfachem Flotationsabscheider, während SRZ 2 eine komplexe Sortieranlage mit Nass- und Trockenaufbereitung sowie händischer

Sortierung beinhaltet. Der wesentliche Unterschied besteht in der Möglichkeit, in SRZ 2 heterogenes Bauschuttmaterial qualitativ hochwertig aufzubereiten anstatt es wie derzeit zu verfüllen/deponieren. Die Kostenrechnung basiert auf einer gewählten Verarbeitungsleistung von 50.000 t/a für kleine und 100.000 t/a für große SRZ-Anlagen, wobei die Abfallfraktionen 17 01 01 (Beton) und 17 01 07 (gemischte Bau- und Abbruchabfälle) hinsichtlich ihrer Masse separat betrachtet wurden.

Die gewählten und berechneten Aufbereitungstechniken für SRZ 1 umfassen eine Prallbrecher (Beispiel: Kleemann), eine Siebanlage (Beispiel: SBM) sowie eine Kombination aus Flotation mit und ohne Aufstrom (Beispiel: WIMA). Das komplexere Aufbereitungssystem, welches für SRZ 2 ausgewählt wurde, besteht aus einer Bündelung von Nassaufbereitung (Wäsche und Flotation, Beispiel: WIMA), Trockenaufbereitung (Splitter, Sternsieb, Beispiel: Günther) und einem Sortierstand für händische Separation mit zwei bis sechs Arbeitsplätzen. In beiden SRZ-Varianten werden außerdem Kosten für notwendige Baumaschinen (Bagger und Radlader) zum Ver- und Umladen der Schüttgüter eingerechnet.

Neben den beiden beschriebenen grundlegenden SRZ-1 bzw. SRZ-2-Varianten wurden auch drei unterschiedliche SRZ 3 Module in einer Kostenrechnung betrachtet. Aufgrund von aktueller Relevanz, Datenverfügbarkeit und Anwendbarkeit auf die betrachteten Abfallschlüssel 170101 und 170107 wurden folgende Technologien betrachtet:

1. **Carbonatisierung**

Die Carbonatisierung stellt eine CO₂-speichernde Nachbehandlung mineralischer Fraktionen dar. Dabei werden zementhaltige Fraktionen aus der Aufbereitung gezielt mit CO₂ versetzt, um reaktive Bestandteile - insbesondere Calcium- und Magnesiumverbindungen - zu carbonatisieren. Ein praktisches Beispiel liefert die Firma Neustark, die CO₂ aus industriellen Quellen dauerhaft in mineralischen Recyclingbaustoffen bindet. Neben dem Beitrag zur Dekarbonisierung des Bauwesens entsteht dabei ein vermarktbarer Sekundärrohstoff mit verbesserter technischer Qualität. Die gewählte Anlagenausführung bietet eine Kapazität von 100.000 t/a und die Kostenrechnung wurde unter der Annahme einer vollständigen Auslastung aufgestellt.

2. **Entsulfatisierung**

Bei der Entsulfatisierung handelt es sich um ein nasschemisches Verfahren zur Entfernung von Sulfaten aus gipshaltigen Abbruchmaterialien (z. B. Gipsputze und Porenbeton), die bisher häufig die Verwendbarkeit von RC-Materialien einschränken und daher verfüllt oder deponiert werden. Ein Beispiel ist das Verfahren des Fraunhofer-Instituts (Projekt ENSUBA, Liesch et al., 2018), bei dem sulfatbelastete Feinfraktionen aufbereitet und so für eine Wiederverwertung qualifiziert werden können. Ziel ist die Substitution von Primärmaterialien bei gleichzeitiger Entlastung der Deponien. Die Anlagenkapazität wurde konservativ mit 5000 t/a angesetzt.

3. Pyrolysebasiertes EPS-Recycling

Für die Rückgewinnung von expandiertem Polystyrol (EPS), das häufig als Dämmmaterial in Bestandsbauten vorkommt, wird ein pyrolysebasiertes Verfahren betrachtet. Hierbei wird EPS thermisch zersetzt, um die polymeren Bestandteile in verwertbare Kohlenwasserstoffe umzuwandeln. Solche Verfahren ermöglichen es, mit HBCD-belasteten EPS-Resten umzugehen, die aufgrund gesetzlicher Verbote bislang als gefährlicher Abfall eingestuft und teuer entsorgt werden müssen. Die Pyrolyse eröffnet hier einen potenziell wirtschaftlichen und umweltgerechten Rückgewinnungspfad. Die gewählte Anlagenkapazität beträgt 30.000 t/a.

4.2.4 Wirtschaftliche Kennzahlen von SRZ 1 und 2

Die techno-ökonomische Bewertung umfasst eine erwartete Investition, geschätzte Jahreserlöse und Betriebskosten sowie die daraus berechnete Amortisationszeit unter den oben genannten Annahmen (Abschnitte 4.2.1 bis 4.2.3). Die zentralen Ergebnisse sind in Tabelle 5 zusammengefasst:

Tabelle 5: Wirtschaftlichkeitskennzahlen für SRZ 1 und SRZ 2

Variante	Investition [€]	Jahreserlöse [€/a]	Betriebskosten* [€/a]	Amortisationszeit [a]	Wirtschaftliche Bewertung
SRZ 1 klein ^{abcd}	2.000.000	1.707.340	836.440	2,30	wirtschaftlich
SRZ 1 groß ^{abcd}	2.800.000	3.414.680	1.071.440	1,19	sehr wirtschaftlich
SRZ 2 klein ^{abcd}	6.100.000	1.932.740	2.086.440	-39,69	nicht wirtschaftlich
SRZ 2 groß ^{abcd}	7.000.000	3.865.480	2.547.880	5,31	wirtschaftlich

a) Kleemann GmbH (2025)
 b) Heinrich Feeß GmbH & Co. KG (2025)
 c) Gründerlexikon (2025)
 d) Statista (2025)
 *) Die Betriebskosten setzen sich zusammen aus Abschreibung und Verzinsung, Instandhaltung und Reparatur, Strom- und Dieselskosten, Personalkosten und Güteüberwachung.

Die Analyse zeigt, dass insbesondere die konventionellen Varianten (SRZ 1) wirtschaftlich tragfähig sein können. Die große Variante von SRZ 1 amortisiert sich bereits nach rund 1,2 Jahren und bietet damit ein besonders attraktives Investitionsprofil. Auch SRZ 2 groß kann grundsätzlich wirtschaftlich sein, jedoch mit einer deutlich längeren Amortisationszeit.

Die Variante SRZ 2 klein hingegen erweist sich als nicht wirtschaftlich. Die hohen Investitionskosten für die aufwendige Sortiertechnik lassen sich bei der geringen Kapazität nicht durch entsprechende Erlöse kompensieren, was sich in einer negativen Amortisationszeit widerspiegelt.

4.2.5 Wirtschaftliche Kennzahlen von SRZ 3

Bei der techno-ökonomischen Bewertung der drei betrachteten SRZ 3 Module wurde, von einer bestehenden SRZ 1 oder 2 Struktur ausgehend, mithilfe von erwarteter Investition, geschätzten Jahreserlösen und Betriebskosten die Amortisationszeit berechnet. Aufgrund der Annahme, dass SRZ 3 Module ausschließlich an bestehende Sekundärrohstoffzentren angegliedert werden, wurde auf die kostenseitige Berücksichtigung von separaten Baumaschinen zum Ver- und Umladen der Schüttgüter verzichtet. Die zentralen Ergebnisse sind in Tabelle 6 zusammengefasst:

Tabelle 6: Wirtschaftlichkeitskennzahlen für SRZ 3

Variante	Investition [€]	Jahreserlöse [€/a]	Betriebskosten [€/a]	Amortisationszeit [a]	Wirtschaftliche Bewertung
Carbonatisierung ^{ade}	800.000	14.000	148.620	-5,94	nicht wirtschaftlich
Carbonatisierung mit 2 €/t Mehreinnahme ^{ade}	800.000	214.000	148.620	12,24	wirtschaftlich
Entsulfatisierung ^{bde}	500.000	225.000	103.263	5,17	wirtschaftlich
EPS-Recycling ^{cde}	8.904.000	3.090.000	4.600.920	-5,89	nicht wirtschaftlich
a) Neustark AG (2023) b) Leiblein GmbH (2025) c) Netsch, N., et al (2022) d) Gründerlexikon (2025) e) Statista (2025)					

Wie aus der Tabelle ersichtlich ist, kann eine Carbonatisierungsanlage allein durch den Erlös, der aktuell durch den Verkauf von CO₂-Zertifikaten erzielt wird, nicht wirtschaftlich betrieben werden. Wird allerdings unterstellt, dass der Recyclingbetrieb mit einer carbonatisierte Gesteinskörnung einen zusätzlichen Materialerlös von 2 €/t erzielen kann, steigen die Jahreserlöse auf 214.000 €. Dies resultiert in einer Amortisationszeit von 12,24 Jahren, wodurch die Variante unter den oben genannten Annahmen und derzeitigen Rahmenbedingungen als (bedingt) wirtschaftlich eingestuft werden kann.

Durch die Entsulfatisierung von Bauschuttsand können bei einer Aufbereitungskapazität von 3000 t/a Deponiekosten in einer Höhe von ca. 200.000 €/a vermieden werden. Zusätzlich ist davon auszugehen, dass der behandelte Sand vermarktet werden kann, was in Einnahmen von 25.000 €/a resultiert. In Verbindung mit der vergleichbar geringen Investition und den Betriebskosten ergibt sich eine Amortisationszeit von 5,17 Jahren, was das Verfahren äußerst wirtschaftlich macht.

Die pyrolysebasierte Rückgewinnung von EPS zeigt trotz hoher erwarteter Erlöse (3.090.000 €/a) eine negative Amortisationszeit von -5,89 Jahren. Dies ist nach aktuellem Kenntnisstand auf eine sehr hohe Investition (8.904.000 €) und hohe Betriebskosten (4.600.920 €/a) zurückzuführen. In der aktuellen Ausgestaltung ist das Verfahren somit nicht wirtschaftlich.

4.2.6 Übertragbarkeit auf Baden-Württemberg

Da für die techno-ökonomische Bewertung praxisbasierte Kennzahlen und realistische Annahmen getroffen wurden, können die Ergebnisse als Grundlage für eine strategische flächendeckende Bewertung in Baden-Württemberg dienen. Regionale Unterschiede in Bezug auf den Transport werden im Rahmen des AP 4 berücksichtigt. Mögliche regionale Kostenunterschiede, Marktsituationen hinsichtlich Input (Bau- und Abbruchabfälle) und Output (Absatz produzierter Baustoffe) sowie auch Verfügbarkeiten und Beschaffenheiten von Flächen, Genehmigungen etc. müssten bei einer Realisierung im Einzelfall geprüft werden.

5 Arbeitspaket 4 - Standort- und Netzwerkanalyse

Im Arbeitspaket 4 wurde bestimmt, welche Standorte in Baden-Württemberg sich besonders für ein SRZ eignen und wie ein optimiertes Recyclingnetzwerk aussehen würde. Als optimiertes Recyclingnetzwerk wird hier ein Netzwerk mit minimalen Kosten für Materialtransport und Betrieb der SRZ verstanden. Im weiteren Verlauf wird außerdem ein CO₂-optimiertes Netzwerk berechnet und dargestellt. Zum Ermitteln eines optimalen Netzwerks wurde ein mathematisches Modell erstellt und bis zur Optimalität gelöst.

5.1.1 Variablen und Modell

Das für den Anwendungsfall der Suche nach optimalen SRZ-Standorten und -Kapazitäten in Baden-Württemberg neu entwickelte Modell entspricht einem kapazitierten Recyclingnetz mit direkter Belieferung ohne Interaktionen zwischen den Recyclinganlagen. Die Mengen (kalligraphische Großbuchstaben), Entscheidungsvariablen (Kleinbuchstaben) und Parameter (Großbuchstaben) des Modells sind in Tabelle 7 mitsamt allen Indizes für Standorte, Kapazitäten und Materialien aufgeführt. Das Modell minimiert die Gesamtkosten und ist in den Gleichungen (1) bis (8) formuliert. Es handelt sich um ein gemischt-ganzzahliges und damit NP-schweres Problem, das nicht in deterministisch polynomieller Rechenzeit gelöst werden kann.

Mengen

\mathcal{S}	Menge der Aufkommensorte (Kreise in BW)
\mathcal{R}	Menge der möglichen Orte von SRZ1-3 (Kreise in BW)
\mathcal{M}	Menge der berücksichtigten Materialien
\mathcal{K}	Menge der möglichen Kapazitätsstufen

\mathcal{V}	
Menge der möglichen Varianten für SRZ3	
Entscheidungsvariablen	
x_{srm}	Menge des Materials $m \in \mathcal{M}$, das vom Aufkommensort $s \in \mathcal{S}$ zum SRZ an Ort $r \in \mathcal{R}$ transportiert wird
y_{rk}^{SRZ1}	Indikatorvariable für den Status eines SRZ1 am Ort $r \in \mathcal{R}$ mit Kapazitätslevel $k \in \mathcal{K}$ (SRZ1 vorhanden oder nicht)
y_{rk}^{SRZ2}	Indikatorvariable für den Status eines SRZ2 am Ort $r \in \mathcal{R}$ mit Kapazitätslevel $k \in \mathcal{K}$ (SRZ2 vorhanden oder nicht)
y_{rv}^{SRZ3}	Indikatorvariable für den Status eines SRZ3 am Ort $r \in \mathcal{R}$ als Modul $v \in \mathcal{V}$ (SRZ3-Variante vorhanden oder nicht)
Parameter	
$C_{sr}^{transport}$	Transportkosten für Materialtransport zwischen Aufkommensort $s \in \mathcal{S}$ und SRZ an Ort $r \in \mathcal{R}$
C_k^{SRZ1}	Investment (auf ein Jahr gerechnet) und operative Kosten für ein SRZ1 mit Kapazitätslevel $k \in \mathcal{K}$
C_k^{SRZ2}	Investment (auf ein Jahr gerechnet) und operative Kosten für ein SRZ2 mit Kapazitätslevel $k \in \mathcal{K}$
C_v^{SRZ3}	Investment (auf ein Jahr gerechnet) und operative Kosten für eine SRZ3-Variante $v \in \mathcal{V}$
K_{km}^{SRZ1}	Inputkapazität eines SRZ1 mit Kapazitätslevel $k \in \mathcal{K}$ für Material $m \in \mathcal{M}$
K_{km}^{SRZ2}	Inputkapazität eines SRZ2 mit Kapazitätslevel $k \in \mathcal{K}$ für Material $m \in \mathcal{M}$
K_{vm}^{SRZ3}	Inputkapazität einer SRZ3-Variante $v \in \mathcal{V}$ für Material $m \in \mathcal{M}$
S_{sm}	Aufkommensmenge des Materials $m \in \mathcal{M}$ an Aufkommensort $s \in \mathcal{S}$

Tabelle 7 - Mengen, Entscheidungsvariablen und Parameter für die Netzwerkmodellierung

$$\min \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{m \in \mathcal{M}} x_{srm} \cdot C_{sr}^{transport} + \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{k \in \mathcal{K}} y_{rk}^{SRZ1} \cdot C_k^{SRZ1} + \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{k \in \mathcal{K}} y_{rk}^{SRZ2} \cdot C_k^{SRZ2} + \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{v \in \mathcal{V}} y_{rv}^{SRZ3} \cdot C_v^{SRZ3} \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{r \in \mathcal{R}} x_{srm} = S_{sm} \quad \forall s \in \mathcal{S}, \forall m \in \mathcal{M} \quad (2)$$

$$\sum_{s \in \mathcal{S}} x_{srm} \leq \sum_{k \in \mathcal{K}} y_{rk}^{SRZ1} \cdot K_{km}^{SRZ1} + \sum_{k \in \mathcal{K}} y_{rk}^{SRZ2} \cdot K_{km}^{SRZ2} + \sum_{v \in \mathcal{V}} y_{rv}^{SRZ3} \cdot K_{vm}^{SRZ3} \quad \forall r \in \mathcal{R}, \forall m \in \mathcal{M} \quad (3)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} y_{rk}^{SRZ1} \leq 1 \quad \forall r \in \mathcal{R} \quad (4)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} y_{rk}^{SRZ2} \leq \sum_{k \in \mathcal{K}} y_{rk}^{SRZ1} \quad \forall r \in \mathcal{R} \quad (5)$$

$$y_{rv}^{SRZ3} \leq \sum_{k \in \mathcal{K}} y_{rk}^{SRZ1} \quad \forall r \in \mathcal{R}, \forall v \in \mathcal{V} \quad (6)$$

$$x_{srm} \geq 0 \quad \forall s \in \mathcal{S}, \forall r \in \mathcal{R}, \forall m \in \mathcal{M} \quad (7)$$

$$y_{rk}^{SRZ1}, y_{rk}^{SRZ2}, y_{rv}^{SRZ3} \in \{0,1\} \quad \forall r \in \mathcal{R} \quad (8)$$

Die Zielfunktion (1) minimiert die Transportkosten sowie Kosten der möglichen SRZ1, SRZ2 und SRZ3, wobei alle untersuchten Materialien berücksichtigt werden. Das Modell weist sieben Nebenbedingungen auf (2)-(8), unter denen die Kosten optimiert werden. Gleichung (2) stellt sicher, dass das gesamte Bau- und Abbruchabfallaufkommen in jedem Kreis und von jedem berücksichtigten Material zu einem SRZ transportiert wird. Es dürfen keine unbehandelten Mengen übrigbleiben. Transporte können zudem nur zu errichteten SRZ stattfinden und die Kapazitäten der SRZ dürfen nicht überschritten werden (3). Gleichung (4) legt fest, dass eine konkrete Kapazität je SRZ-Stufe und Standort gewählt werden muss. Außerdem bildet das SRZ 1 eine Grundlage, die zu einem SRZ 2 oder SRZ 3 erweitert werden kann, was in der Modellierung über Gleichung (5) für SRZ 2 und Gleichung (6) für SRZ 3 abgebildet ist. Zuletzt definieren Gleichung (7) die Nichtnegativität der Entscheidungsvariablen für den Transport und Gleichung (8) die Binarität der Indikatorvariablen für den Status der SRZ.

5.1.2 Inputdaten und Modelllösung

Dieses Modell wurde mit folgenden Inputdaten gelöst. Als räumliche Unterteilung wurden die 44 Kreise und kreisfreien Städte in Baden-Württemberg gewählt. Das entspricht der administrativen Ebene NUTS 3 in der NUTS-Klassifizierung. Zur Vereinfachung dient der geographische Mittelpunkt eines jeden Kreises als Repräsentant für das gesamte Aufkommen des Kreises. Zudem dient der geographische Mittelpunkt als Ausgangspunkte für die Berechnung der Transportentfernungen und als möglicher Standort für ein SRZ. Distanzen werden als Luftlinie zwischen zwei Orten berechnet, multipliziert mit einem üblichen Faktor für Straßentransport in Deutschland von 1,326 (eigene Berechnung basierend auf Persyn et al. 2022). Die Transportkosten sind Persyn et al. (2022) entnommen und mit der Kostensteigerung für Transporte der letzten Jahre auf die aktuellen Kosten angepasst. Die Aufkommensmengen unterschiedlicher Materialien für 2024 sind Volk et al. (2019) entnommen. Kapazitäten und Kosten für die SRZ entstammen den Berechnungen aus AP3. Daher gelten auch für die in AP4 generierten Ergebnisse die bei AP3 genannten Einschränkungen, insbesondere die fehlende Berücksichtigung der Investitionen bzw. Kosten für den Erwerb geeigneter Flächen, die Versiegelung (bspw. Asphaltierung) und die Abwasseraufbereitung. Daten zu Treibhausgasemissionen (CO₂-Äquivalente) für den später folgenden Vergleich der kostenminimalen mit der CO₂-minimalen Lösung sind der Ökobilanz-Datenbank Ecoinvent 3.10 entnommen.

Aufgrund der groben regionalen Aufteilung der Modellierung mit lediglich 44 Kreisen und kreisfreien Städten in Baden-Württemberg wurde zudem eine weitere Kapazität von 200.000 t/a pro Produkt aufgenommen, um dem Modell in sehr aufkommensstarken Regionen die Errichtung eines SRZ mit höherer Kapazität zu ermöglichen und einer theoretischen Unlösbarkeit des Modells entgegenzuwirken. Die Kosten für diese Kapazität sind aus den Kosten für ein SRZ mit 100.000 t/a Kapazität über einen

angenommenen Skalierungsexponenten von 0,6 (Peters et al. 2003) errechnet. Das mathematische Modell wird in der Programmiersprache Python mittel docplex library implementiert durch den IBM ILOG CPLEX Optimizer bis zur Optimalität gelöst.

5.1.3 Ergebnisse und Interpretation

Abbildung 10 zeigt die Lösung der Kostenminimierung für die optimale Verwertung der in 2024 ankommenden Bau- und Abbruchabfälle als Karte von Baden-Württemberg mit Symbolen für die unterschiedlichen SRZ. Die räumliche Auflösung des Modells ist jedoch begrenzt auf die o.g. 44 Kreise und kreisfreien Städte. Die dargestellten Standorte sind daher nicht als exakt festzulegende Positionen für ein SRZ zu verstehen, sondern als Hinweise darauf, dass in dem jeweiligen geographischen Bereich grundsätzlich ein sinnvoller Standort für ein SRZ der gewählten Stufe und Kapazität liegen könnte.

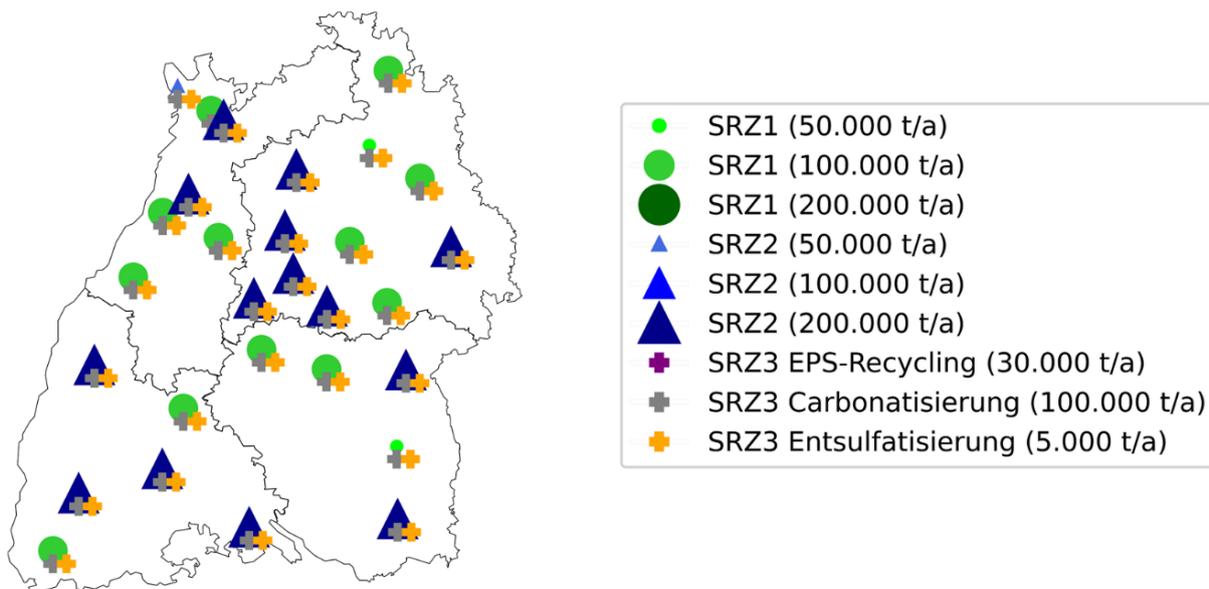


Abbildung 10 – Kostenminimales SRZ-Netzwerk in Baden-Württemberg mit 2 kleinen und 12 großen SRZ 1, 1 kleinen und 14 sehr großen SRZ 2 (die u.a. SRZ 1-Funktionalitäten umfassen) sowie an fast jedem Standort eine Carbonatisierung und Entsulfatisierung (SRZ3)

Für die Interpretation ist wesentlich, dass ein SRZ 2 alle Funktionen eines SRZ 1 abdecken kann, weshalb Standorte von SRZ 1 (grüne Kreise) und SRZ 2 (blaue Dreiecke) gemeinsam zu analysieren sind. In der Abbildung lassen sich folgende Aspekte erkennen: Die SRZ 1 sind in der Regel große Zentren (100.000 t/a). Sie verteilen sich über das gesamte Landesgebiet von Baden-Württemberg. SRZ 2 zeichnen sich in der Optimierung typischerweise durch sehr große Dimensionierungen (200.000 t/a) aus, was einerseits auf die im Vergleich zu SRZ 1 in der Berechnung angesetzten, nochmals stärkeren Skaleneffekte zurückzuführen ist, aber andererseits auch zeigt, dass größere Kapazitäten als 100.000 t/a im jeweiligen Kreis benötigt werden. Auch sind SRZ 2 landesweit verteilt, konzentrieren sich jedoch

besonders auf den Raum Stuttgart sowie entlang des Rheins. In diesen Regionen fallen derzeit die höchsten Abfallaufkommen an, was die Standortwahl maßgeblich beeinflusst. Im Modell sind SRZ 3-Module nur als Erweiterung zu einem SRZ 1 oder SRZ 2 möglich, weshalb auch kein Standort mit ausschließlich SRZ 3 existiert. Die SRZ 3-Module Carbonatisierung und Entsulfatisierung kommen flächendeckend bei jedem SRZ 1/SRZ 2 zum Einsatz. Aufgrund der hohen Kosten wird jedoch kein EPS-Recycling durchgeführt.

In Abbildung 11 werden exemplarisch am Beispiel des Stoffstroms Beton die notwendigen Transporte im kostenoptimalen Netzwerk dargestellt. Die Transporte anderer betrachteter Stoffströme sehen relativ ähnlich aus. In Regionen ohne SRZ fallen naturgemäß signifikante Transportmengen an, da die Abfälle zu SRZ-Standorten benachbarter Regionen verbracht werden müssen. Darüber hinaus ergeben sich im Rahmen der Optimierung vereinzelt kleinere Transportmengen (vgl. dünne Pfeile). Diese haben jedoch nur einen geringen Einfluss auf die Gesamtkosten. Abfallaufkommen aus dem unmittelbaren Umkreis eines SRZ wird direkt vor Ort verarbeitet, weshalb in diesem Fall keine Transporte notwendig sind bzw. im Modell dafür keine separaten Kosten berechnet werden.

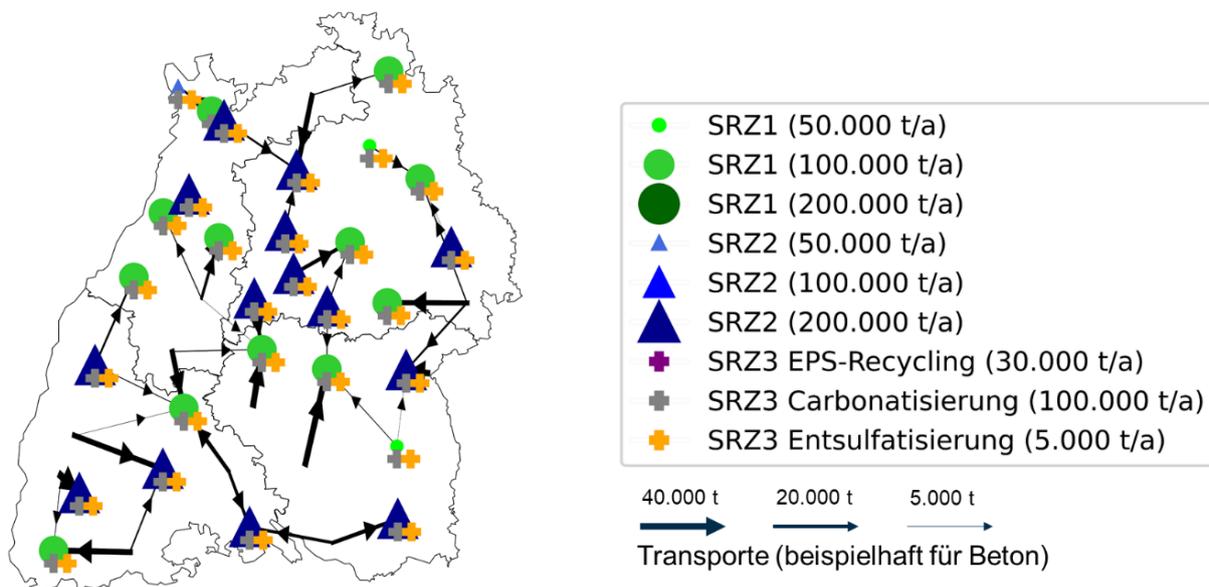


Abbildung 11 – Kostenminimales SRZ-Netzwerk in Baden-Württemberg inkl. notwendiger Transporte für Beton

Ein Vergleich der Optimierungsergebnisse für das Jahr 2024 mit denen auf Basis der für 2030 prognostizierten Aufkommen zeigt nur geringe Unterschiede im Netzwerk. Grundlegende Veränderungen in der Standortstruktur ergeben sich nicht. Der prognostizierte moderate Anstieg der Abfallmengen führt jedoch zur Eröffnung von vier zusätzlichen SRZ 1.

Ein Vergleich der Optimierungsergebnisse hinsichtlich Kosten- und CO₂-Minimierung (Abbildung 12) zeigt hingegen deutliche Unterschiede. Bei einer CO₂-Minimierung werden SRZ 2 an allen möglichen

Standorten im Modell errichtet, um Transporte fast vollständig zu vermeiden. Dies steht im Kontrast zur kostenminimalen Lösung, bei der Transporte in der optimalen Lösung in Kauf genommen werden, um Kosten für die Eröffnung und den Betrieb weiterer SRZ zu reduzieren. Eine plausible Erklärung liegt im jeweils unterschiedlichen Einfluss der Aufwände auf Kosten bzw. Treibhausgasemissionen. Während Bau und Betrieb der SRZ im Kostenmodell stärker ins Gewicht fallen, verursachen Transporte im CO₂-Modell vergleichsweise hohe Emissionen. Entsprechend reduziert die CO₂-minimale Variante die transportbedingten Emissionen um über 11.000 Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr, während Bau und Betrieb der zusätzlichen SRZ lediglich rund 1.000 Tonnen CO₂-Äquivalente jährlich verursacht. Damit ist die kostenminimale Lösung in Summe um etwa 10.000 Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr emissionsintensiver. Gleichzeitig verursacht die CO₂-minimale Lösung rund 50 Mio. € pro Jahr höhere Kosten als die kostenminimale Variante. Diese signifikanten Unterschiede verdeutlichen den Zielkonflikt zwischen Kosten und CO₂ bei der Optimierung der Verwertung von Bau- und Abbruchabfällen in Baden-Württemberg. Ein komplexeres, multikriterielles Optimierungsmodell sowie eine Gewichtung zwischen beiden Optimierungszielen wäre erforderlich um einen ausgewogenen Kompromiss zwischen ökologischen und ökonomischen Zielen zu erreichen.

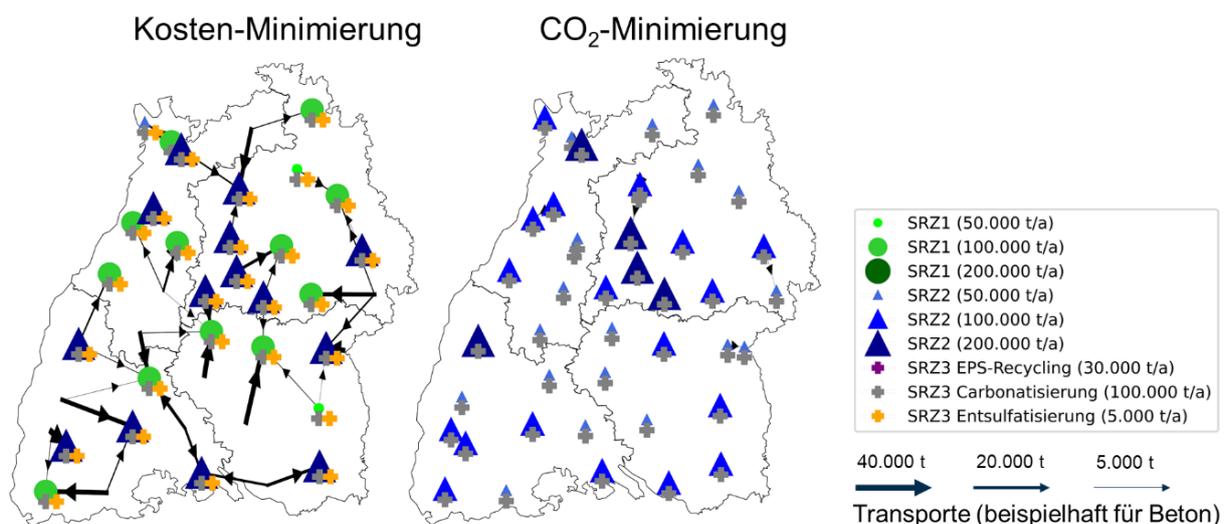


Abbildung 12 – Vergleich der Optimierungsergebnisse hinsichtlich Kosten- und CO₂-Minimierung im SRZ-Netzwerk in Baden-Württemberg inkl. notwendiger Transporte für Beton

Die Ergebnisse aus AP4 lassen sich demnach wie folgt zusammenfassen. Der Aufbau eines landesweiten SRZ-Netzwerks kann wirtschaftlich sinnvoll sein. Da bereits SRZ-ähnliche Anlagen bzw. Zentren mit teilweise vorhandener Technologie und Infrastruktur vorhabenden sind, ist die Abschätzung des notwendigen zusätzlichen Investments derzeit aufgrund einer mangelnden Datengrundlage nicht möglich. Hierzu sind Einzelbewertungen und -entscheidungen je Standort erforderlich, die einerseits die vorhandene Technologie und Infrastruktur berücksichtigen und andererseits weitere

investitionsrelevante Aspekte bzw. lokale Rahmenbedingungen beleuchten, die hier nicht abgebildet werden konnten oder zu denen Annahmen getroffen wurden (vgl. Abschnitte 4.2.1 bis 4.2.3).

Die jährlichen Kosten des optimierten Recyclingnetzwerks liegen unter den genannten Voraussetzungen bei rund 100 Mio. €, während Erlöse in Höhe von etwa 130 Mio. € möglich sein könnten. Dabei sei erneut erwähnt, dass einige Kosten noch nicht in die Modellierung einfließen konnten, insbesondere Kosten für den Erwerb bzw. die Bereitstellung der Flächen, die Versiegelung (bspw. Asphaltierung) der Flächen und die Abwasseraufbereitung. Diese Aspekte könnten die Gesamtkosten je nach Ausgangslage auch über das Niveau der Erlöse ansteigen lassen und eine entsprechende finanzielle Förderung durch Kommunen, Kreise oder das Land Baden-Württemberg notwendig machen. Für SRZ 1 liegt die Präferenz bei Anlagen mit hohen Kapazitäten (häufig 100.000 t/a pro Produkt), während für SRZ 2 häufig sogar sehr hohe Kapazitäten von 200.000 t/a pro Produkt bevorzugt werden.

Die Carbonatisierung ist unter Berücksichtigung eines CO₂-Schattenpreises ebenfalls wirtschaftlich vorteilhaft. In den entsprechenden Materialströmen in Baden-Württemberg könnten dadurch jährlich rund 29.000 Tonnen CO₂ dauerhaft gebunden werden, allerdings wäre dafür die Bereitstellung des CO₂ entsprechend möglichst kostengünstig und lokal zu organisieren. Die Entsulfatisierung stellt sich unter den aktuellen Annahmen ebenfalls als wirtschaftlich tragfähig dar, wobei die derzeit zugrunde gelegte Kapazität mit 5.000 t/a pro SRZ vergleichsweise gering ist. Das EPS-Recycling hingegen ist nach derzeitigem Stand in Baden-Württemberg wirtschaftlich nicht darstellbar.

Mit Blick auf den Zeithorizont bis 2030 ist angesichts der erwarteten Mengensteigerungen der Bau- und Abbruchabfälle in Baden-Württemberg von einem weiteren Ausbau des SRZ-Netzwerks auszugehen. Zwischen ökonomischer und ökologischer Optimierung besteht ein grundsätzlicher Zielkonflikt, der durch geeignete (ökonomische) Rahmenbedingungen abgemildert werden könnte: Während zentralisierte, groß dimensionierte SRZ in der Regel die wirtschaftlich effizienteste Lösung darstellen, führen dezentrale Strukturen mit minimierten Transportwegen zu geringeren CO₂-Emissionen.

6 Zusammenfassung, Handlungsempfehlungen und Fazit

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens zeigen, dass durch eine differenzierte regionale Ausgestaltung der Recyclinginfrastruktur in Baden-Württemberg stoffliche, technologische und wirtschaftliche Heterogenitäten adressiert werden, Umweltauswirkungen reduziert sowie Deponiekapazitäten geschont werden können. Ökobilanziell lassen sich insbesondere bei mineralischen Stoffströmen erhebliche Emissionsreduktionen erzielen - vorausgesetzt, dass hochwertige Recyclingrouten und selektive Aufbereitungstechnologien angewendet werden. Die techno-ökonomische Bewertung belegt die

wirtschaftliche Tragfähigkeit großer SRZ 1- und SRZ 2-Anlagen. Dagegen sind insbesondere die innovativen SRZ 3-Infrastrukturen aktuell nur bedingt wirtschaftlich darstellbar und erfordern gezielte politische Förderung. Der Zielkonflikt zwischen Kostenminimierung und Minimierung der Treibhausgasemissionen, wie er sich im Netzwerkmodell deutlich zeigt, verdeutlicht den Bedarf an integrierten Bewertungsansätzen zur verbesserten Entscheidungsunterstützung. Nur durch die Kopplung ökonomischer, ökologischer und regulatorischer Bewertungs- und Steuerungsinstrumente kann ein resilienter Ausbau der Recyclinginfrastruktur gelingen. Das entwickelte Modell stellt hierfür eine belastbare Entscheidungsgrundlage dar.

Um die Transformation des Bauwesens hin zu mehr Ressourcenschonung und Klimaschutz wirksam zu unterstützen, kann eine Reihe gezielter politischer Maßnahmen hilfreich sein. Damit das entwickelte Netz aus lokalen SRZ 1, zentralen High-Tech-SRZ 2 und spezialisierten SRZ 3-Modulen seine ökologische Hebelwirkung entfalten kann, könnten insbesondere folgende Maßnahmen in Betracht gezogen werden:

- **Politische Verankerung der SRZ und des Stufenmodells:**
 - Aufnahme des SRZ-Konzepts z. B. im Abfallwirtschaftsplan BW 2030
 - Bereitstellung eines Landesfonds für Pilot-SRZ 2/3 inkl. Carbonatisierungs- und Entsulfatisierungsmodule
- **Genehmigungspfade beschleunigen:**
 - Einrichtung von schnellen und einheitlichen Umweltverträglichkeitsprüfungsverfahren für SRZ-Anlagen, um Planungszeiträume zu verringern (insbesondere an Standorten mit ähnlichen Anlagen)
 - Bedarfsgerechte Bereitstellung von (kommunalen) Flächen für Sekundärrohstoffzentren im Flächennutzungsplan
- **Dezentrale Logistik:**
 - Ausschreibung und Förderung halbmobiler SRZ 1 bei Großbauprojekten, um Transportemissionen zu minimieren
- **CO₂-Bepreisung konsolidieren:**
 - Ausweitung des CO₂-Schattenpreises auf alle öffentlichen Bauaufträge ab 2026
 - Kopplung künftiger Landeszuschüsse an nachgewiesene CO₂-Minderung durch Carbonatisierung
- **Deponiegebühren staffeln:**
 - Erhöhung der Deponiegebühren für grundsätzlich deponierfähige mineralische Abfälle ohne vorheriges SRZ-Screening

- **Forschung, Demonstration und Qualifikation:**
 - Gezielte Förderung von vielversprechenden Technologien über TRL 6 hinaus und Etablierung dieser Technologien (TRL7-9)
 - Bereitstellung von Open Data zum Gebäude- und Infrastrukturbestand sowie zu den erwarteten Veränderungen, zur genaueren Abschätzung von Abfallaufkommen und Bedarf/Nachfrage
- **Institutionalisierte Wiederverwendungsarchitektur:**
 - Aufbau einer Open Data-Infrastruktur zur Echtzeit-Erfassung von Bau- und Abbruchabfällen, Transportdistanzen und CO₂-Bilanz mit Schnittstellen zu Bauämtern und SRZ-Betreibern
 - Obligatorische Registrierung rückzubauender Bauteile/Bauprodukte auf digitalen Marktplätzen (zu einem bestimmten Zeitpunkt bzw. für einen gewissen Vermarktungszeitraum) vor Abrissgenehmigung
- **Grüne öffentliche Beschaffung (GPP):**
 - Bevorzugung von Recyclingmaterial und wiederverwendeten Bauprodukten in öffentlichen Ausschreibungen, ggf. gekoppelt mit CO₂-Äquivalenten für die Baumaßnahme als Entscheidungskriterium
 - Vergabestellen müssen ab 2026 Lebenszykluskosten inkl. CO₂-Preis, Rezyklinganteil und Transportdistanz gewichten (min. 30 % des Zuschlagskriteriums)
 - Ausschreibung von einfacheren, standardisierten Bauweisen mit lösbaren Verbindungen für Baumaterialien und -produkte (Design-for-ReUse bzw. Design-for-Recycling)

Eine gelungene Transformation des baden-württembergischen Bausektors verlangt ein funktionierendes Zusammenspiel aus technischer Infrastruktur und Entwicklung, ökonomischen Anreizen, regulatorischen Leitplanken und digitaler Transparenz. Kernstück kann ein Netz regionaler Sekundärrohstoffzentren darstellen. In Regionen mit hohem Aufkommen von Bau- und Abbruchabfällen sollten großskalige SRZ Aufbereitungs- und Investitionskapazitäten bündeln, während in peripheren Gebieten mobile SRZ-Anlagen die Transportdistanzen minimieren. Die derzeitige technische Hebelwirkung speist sich vor allem aus Investitionen in SRZ 2-Technologien, die heterogene Bau- und Abbruchabfälle selektiv in qualitätsgesicherte Sekundärrohstoffe überführen können anstatt sie einer Verfüllung oder Deponierung zuzuführen. Ergänzend sichern Carbonisierungsanlagen dauerhafte CO₂-Bindung. Entsulfatisierungsmodule erschließen gipshaltige Ströme. Pyrolyse- und lösemittelbasierte Routen könnten EPS- und Polymerkreisläufe erschließen. Öffentliche Auftraggeber könnten als Marktmotor agieren und in Vergabeverfahren zwingend Recyclingbaustoffe, CO₂-reduzierte Zemente und hohe

Wiederverwendungsquoten verankern, flankiert von einem CO₂-Schattenpreis, der ökologische Kosten internalisiert.

Damit auch eine Wiederverwendung von Bauprodukten industriell skalieren kann, bedarf es langfristiger, möglichst digital unterstützter Kooperationen zwischen Planern (Architekten, Ingenieuren), Rückbauunternehmen und SRZ-Standorten (Hubs) für frühzeitige Planungssicherheit. Ein digitaler Ressourcenpass (bspw. DGNB-System) oder Produktpass kann diesen Prozess unterstützen und Transparenz entlang des gesamten Lebenszyklus schaffen. Rechtliche Unsicherheiten - allen voran Gewährleistungsfragen bei tragenden wiederverwendeten Bauteilen - sind durch bundeseinheitliche Normen zu klären. Parallel sollten Schulungen verpflichtend in die Fortbildungsordnungen der Architekten- und Ingenieurkammern aufgenommen werden.

Die techno-ökonomische Analyse des Projekts zeigt einen Konflikt zwischen Wirtschaftlichkeits- und Klimazielen: Eine rein kostenoptimierte SRZ-Struktur verursacht rund 100 Mio. € Betriebskosten pro Jahr, emittiert jedoch etwa 10.000 t CO₂-Äquivalente pro Jahr mehr als eine CO₂-optimierte Struktur. Ein SRZ-Netz mit großen Standorten in urbanen Regionen und mobilen Modulen in ländlichen Räumen entschärft diesen Zielkonflikt, weil es Skaleneffekte großer Anlagen nutzt und gleichzeitig Transporte begrenzt. Ökonomisch können steigende Deponieabgaben für unbehandelte aber verwertbare mineralische Abfälle, Investitionsprämien bzw. Zuschüsse für SRZ-2/3-Technik und eine Förderung für TRL6+-Anlagentechnik die Marktakzeptanz und Umsetzung unterstützen.

Die notwendige Mehrdimensionalität der Maßnahmen verlangt eine gestufte Governance: EU-Rahmen (Waste Framework Directive), Bundesnormen (End-of-Waste-VO, NKWS), Landesspezifika (Abfallwirtschaftsplan BW, CO₂-Schattenpreis) und kommunale Umsetzung müssen ineinandergreifen. Mit dieser koordinierten Agenda kann Baden-Württemberg zum europäischen Referenzmodell für hochwertige, klimaneutrale Sekundärrohstoffkreisläufe avancieren und zugleich regionale Wertschöpfung sowie technologische Innovationskraft substantziell stärken.

7 Quellen

Aggregates Europe – UEPG. Figures - Aggregates Europe; 2024, <https://www.aggregates-europe.eu/facts-figures/figures/> [abgerufen am 28.10.24].

Al-Bayati, Hanaa Khaleel Alwan; Das, Prabir Kumar; Tighe, Susan L.; Baaj, Hassan (2016): Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate. In: *Construction and Building Materials* 112, S. 284-298. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.176.

Algarvio, D.; Lima, M.M.R.A.; Cunha, M. L. (2013): Quality improvement of recycled aggregates from a construction and demolition waste recycling pilot plant. In: *Materials Science Forum* 730-732, S. 630-635. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.730-732.630.

Ambrós, Wesley Monteiro; Sampaio, Carlos Hoffmann; Cazacliu, Bogdan Grigore; Miltzarek, Gerson Luis; Miranda, Leonardo R. (2017): Usage of air jigging for multi-component separation of construction and demolition waste. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 60, S. 75-83. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.11.029.

Barrau, Enora; Aissani, Lynda; Thiriet, Pierre; Laforest, Valérie; Tanguy, Audrey (2025): Life Cycle Assessment of Concrete Recycling Solutions in Light of Their Technical Complexity. In: *Recycling* 10 (1), S. 28. DOI: 10.3390/recycling10010028.

Bergs, Laura; Dobers, Kerstin; Feil, Alexander; Fricke, Claas; Hülsmann, Thomas; Koller, Michaela et al.: Rohstoffeffizienz und Kreislaufwirtschaft: Pilotvorhaben KUBA - Nachhaltige Kunststoffwertschöpfungskette: Pilotfall Kunststoffe in Bauwirtschaft und Gebäuden. FKZ: 033R214A-F. Laufzeit: 01.12.2018 - 31.10.2020. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH; Fraunhofer IML; RWTH Aachen - ANTS; FH Münster - IWARU; VinylPlus Deutschland e.V.; DEHEMA e.V.; BASF SE; Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - ITC; PlasticsEurope Deutschland. Online verfügbar unter https://dechema.de/Forschung/Projekte/KUBA-EGOTEC-90c9a586c586a96f587d194f2a49ec6b/_/BMBF_FKZ_033R214A-F_KUBA_Schlussbericht.pdf.

Besserer, Arnaud; Troilo, Sarah; Girods, Pierre; Rogaume, Yann; Brosse, Nicolas (2021): Cascading Recycling of Wood Waste: A Review. In: *Polymers* 13 (11). DOI: 10.3390/polym13111752.

Bergs, Laura; Dobers, Kerstin; Feil, Alexander; Fricke, Claas; Hülsmann, Thomas; Koller, Michaela et al.: Rohstoffeffizienz und Kreislaufwirtschaft: Pilotvorhaben KUBA - Nachhaltige Kunststoffwertschöpfungskette: Pilotfall Kunststoffe in Bauwirtschaft und Gebäuden. FKZ: 033R214A-F. Laufzeit: 01.12.2018 – 31.10.2020. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH; Fraunhofer IML; RWTH Aachen - ANTS; FH Münster - IWARU; VinylPlus Deutschland e.V.; DEHEMA e.V.; BASF SE; Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - ITC; PlasticsEurope Deutschland. Online verfügbar unter https://dechema.de/Forschung/Projekte/KUBA-EGOTEC-90c9a586c586a96f587d194f2a49ec6b/_/BMBF_FKZ_033R214A-F_KUBA_Schlussbericht.pdf.

Bicer, Ayse (2021): Investigation of waste EPS foams modified by heat treatment method as concrete aggregate. In: *Journal of Building Engineering* 42. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102472.

Bilitewski, Bernd; Härdtle, Georg (Hg.) (2013): Abfallwirtschaft. Handbuch für Praxis und Lehre. 4th ed. Heidelberg: Springer.

Bisciotti, Andrea; Jiang, Derek; Song, Yu; Cruciani, Giuseppe (2024): Estimating attached mortar paste on the surface of recycled aggregates based on deep learning and mineralogical models. In: *Cleaner Materials* 11, S. 100215. DOI: 10.1016/j.clema.2023.100215.

Bonifazi, Giuseppe; Capobianco, Giuseppe; Serranti, Silvia; Malinconico, Sergio; Paglietti, Federica (2022): Asbestos detection in construction and demolition waste adopting different classification approaches based on short wave infrared hyperspectral imaging. In: *Detritus* (20), S. 90-99. DOI: 10.31025/2611-4135/2022.15211.

Braymand, S.; Roux, S.; Fares, H.; Déodonne, K.; Feugeas, F. (2017): Separation and Quantification of Attached Mortar in Recycled Concrete Aggregates. In: *Waste Biomass Valor* 8 (5), S. 1393-1407. DOI: 10.1007/s12649-016-9771-2.

Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e.V. (Hg.) (2022): Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2040 in Deutschland. Studie. Unter Mitarbeit von Stoll&Partner, Fritz Schwarzkopp, Sebastian Loyen, Jürgen Blazejczak und Martin Gornig. Berlin. Online verfügbar unter https://cdn.prod.website-files.com/664355396b105bd9a4e9cadb/665dd3a096315c0e03fb96fd_2022-04-20_BBS_Rohstoffstudie_01_ONLINE.pdf.

Bumanis, Girts; Zorica, Jelizaveta; Korjamins, Aleksandrs; Bajare, Diana (2022): Processing of Gypsum Construction and Demolition Waste and Properties of Secondary Gypsum Binder. In: *Recycling* 7 (3), S. 30. DOI: 10.3390/recycling7030030.

Butera, Stefania; Christensen, Thomas H.; Astrup, Thomas F. (2015): Life cycle assessment of construction and demolition waste management. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 44, S. 196-205. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.07.011.

Caro, D.; Lodato, C.; Damgaard, A.; Cristóbal, J.; Foster, G.; Flachenecker, F.; Tonini, D. (2024): Environmental and socio-economic effects of construction and demolition waste recycling in the European Union. In: *Science of the Total Environment* 908. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168295.

Chen, Junjie; Fu, Yonglin; Lu, Weisheng; Pan, Yipeng (2023): Augmented reality-enabled human-robot collaboration to balance construction waste sorting efficiency and occupational safety and health. In: *Journal of Environmental Management* 348, S. 119341. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119341.

Cristóbal García, J.; Caro, D.; Foster, G.; Pristerà, G.; Gallo, F.; Tonini, D. (2024): Techno-economic and environmental assessment of construction and demolition waste management in the European Union. Status quo and prospective potential. JRC Technical Report. Hg. v. Publications Office of the European Union. Luxembourg (JRC135470). Online verfügbar unter https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/jrc135470/jrc2024-techno-economic_and_environmental_assessment_of_cdw_management_in_the_eu_final_with_identifiers_2.pdf.

Damgaard, A.; Lodato, C.; Butera, S.; Kamps, M.; Corbin, L.; Astrup, T. et al. (2022): Background data collection and life cycle assessment for construction and demolition waste (CDW) management. Publications Office of the European Union. Luxembourg (EUR - Scientific and Technical Research series No. JRC 130992). Online verfügbar unter <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC130992>.

Davis, Peter; Aziz, Fayeem; Newaz, Mohammad Tanvi; Sher, Willy; Simon, Laura (2021): The classification of construction waste material using a deep convolutional neural network. In: *Automation in Construction* 122, S. 103481. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103481.

Deutsche Umwelthilfe (2025): 5 Kernforderungen der Deutschen Umwelthilfe zur Stärkung der Kreislaufwirtschaft im Bau- und Gebäudebereich. Online verfügbar unter https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Kreislaufwirtschaft/250529_DUH_5_Kernforderungen_Bau_und_Geb%C3%A4udebereich_final.pdf?utm_source=chatgpt.com.

Dittrich, Sebastian; Thome, Volker; Seifert, Severin; Höhn, Anna-Lena (2015): Verwertungspotential von elektrodynamisch aufbereitetem Altbeton. Online verfügbar unter <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/9134f5eb-d23d-48e4-b97c-2bf0c221718c/details>.

Doschek-Held, Klaus; Krammer, Anna Christine; Steindl, Florian Roman; Sattler, Theresa; Juhart, Joachim (2024): Recycling of mineral wool waste as supplementary cementitious material through thermochemical treatment. In: *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA* 42 (9), S. 806-813. DOI: 10.1177/0734242X241237199.

European Commission. HORIZON 2020 – WORK PROGRAMME 2018-2020: General Annexes. G. Technology readiness levels (TRL); 2017.

Eurostat (2022): Generation of waste by waste category, hazardousness and NACE Rev. 2 activity.

Feng, Chunhua; Cui, Buwen; Huang, Yihong; Guo, Hui; Zhang, Wenyan; Zhu, Jianping (2022): Enhancement technologies of recycled aggregate - Enhancement mechanism, influencing factors, improvement effects, technical difficulties, life cycle assessment. In: *Construction and Building Materials* 317. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126168.

Feng, Chunhua; Wang, Jie; Cui, Buwen; Ye, Zihao; Guo, Hui; Zhang, Wenyan; Zhu, Jianping (2024): Evaluation of techniques for enhancing recycled concrete aggregates: Chemical treatment, biological modification and synergistic reinforcement. In: *Construction and Building Materials* 420, S. 135641. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135641.

Heinrich Feeß GmbH & Co. KG. (2025). Navision [ERP-System].

Liesch, Anna-Lena; Thome, Volker; Dittrich, Sebastian (2018): ENSUBA—A new method for solving the gypsum problem in waste autoclaved aerated concrete. In: *ce/papers: Volume 2, Issue 4 Special Issue: ICAAC - 6th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete*

Fořt, Jan; Černý, Robert (2020): Transition to circular economy in the construction industry: Environmental aspects of waste brick recycling scenarios. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 118, S. 510-520. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.09.004.

Gebremariam, Abraham T.; Di Maio, Francesco; Vahidi, Ali; Rem, Peter (2020): Innovative technologies for recycling End-of-Life concrete waste in the built environment. In: *Resources, Conservation and Recycling* 163. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104911.

Gehring, Florian; Albrecht, Stefan; Homolka, Sarah; Leistner, Philip; Thome, Volker; Seifert, Severin (2015): Aus Altbeton wird Beton – ein innovativer Recyclingansatz. In: *Bauphysik* 37 (5), S. 296–300. DOI: 10.1002/bapi.201510032.

Gong, Yifan; Chen, Ping; Lin, Yunjie; Wan, Yiling; Zhang, Li; Meng, Tao (2022): Improvement of recycled aggregate properties through a combined method of mechanical grinding and microbial-induced carbonate precipitation. In: *Construction and Building Materials* 342, S. 128093. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128093.

Gründerlexikon (März 2025). <https://www.gruenderlexikon.de/checkliste/informieren/personalkosten-kalkulieren/>

Gutknecht, V., Neustark AG (Oktober 2023) Persönliche Kommunikation

Heß, T., Leiblein GmbH (Februar 2025). Persönliche Kommunikation.

Hoffmann Sampaio, Carlos; Ambrós, Wesley Monteiro; Cazacliu, Bogdan Grigore; Oliva Moncunill, Josep; Veras, Moacir Medeiros; Miltzarek, Géron Luis et al. (2021): Construction and Demolition Waste

Recycling through Conventional Jig, Air Jig, and Sensor-Based Sorting: A Comparison. In: *Minerals* 11 (8), S. 904. DOI: 10.3390/min11080904.

Hu, Kui; Chen, Yujing; Naz, Falak; Zeng, Changnv; Cao, Shihao (2019): Separation studies of concrete and brick from construction and demolition waste. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 85, S. 396-404. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.01.007.

Hyvärinen, Marko; Ronkanen, Mikko; Kärki, Timo (2020): Sorting efficiency in mechanical sorting of construction and demolition waste. In: *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA* 38 (7), S. 812-816. DOI: 10.1177/0734242X20914750.

Kalinowska-Wichrowska, Katarzyna; Pawluczuk, Edyta; Bołtryk, Michał (2020): Waste-free technology for recycling concrete rubble. In: *Construction and Building Materials* 234. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117407.

Kang, Heonchan; Kee, Seong-Hoon (2017): Improving the Quality of Mixed Recycled Coarse Aggregates from Construction and Demolition Waste Using Heavy Media Separation with Fe₃O₄ Suspension. In: *Advances in Materials Science and Engineering* 2017, S. 1-12. DOI: 10.1155/2017/8753659.

Kazmi, Syed Minhaj Saleem; Munir, Muhammad Junaid; Wu, Yu-Fei; Patnaikuni, Indubhushan; Zhou, Yingwu; Xing, Feng (2019): Influence of different treatment methods on the mechanical behavior of recycled aggregate concrete: A comparative study. In: *Cement and Concrete Composites* 104, S. 103398. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103398.

Kekes, Tryfon; Korba, Akrivi; Sotiropoulos, Anastasios; Lekawska-Andrinopoulou, Lucyna (2024): Recycled Wood Cascade Valorisation Framework. Wood2Wood Project. Horizon RIA. Online verfügbar unter https://www.wood2wood-project.eu/wp-content/uploads/2025/01/Wood2Wood_Deliverable_4.3.pdf.

Ku, Yuedong; Yang, Jianhong; Fang, Huaiying; Xiao, Wen; Zhuang, Jiangteng (2021): Deep learning of grasping detection for a robot used in sorting construction and demolition waste. In: *Journal of Material Cycles and Waste Management* 23 (1), S. 84-95. DOI: 10.1007/s10163-020-01098-z.

Kües, Ursula; Roffael, Edmone (2021): Verwendung gebrauchter Holzfaser- und Holzspanplatten als alternative Rohstoffe zur Herstellung quellungsarmer Holzfaserplatten durch eine neue innovative Technologie. Schlussbericht zum Vorhaben. Georg-August-Universität Göttingen (FKZ: 22005317). Online verfügbar unter <https://www.fnr.de/fileadmin/projekt Datenbank/22005317.pdf>.

Lau Hiu Hoong, Jean David; Lux, Jérôme; Mahieux, Pierre-Yves; Turcry, Philippe; Aït-Mokhtar, Abdelkarim (2021): Classification of Recycled Aggregates Using Deep Learning. In: Vítor M.C.F. Cunha, Mohammadali Rezazadeh und Chandan Gowda (Hg.): *Proceedings of the 3rd RILEM Spring Convention and Conference (RSCC 2020)*. Volume 4: Shift to a Circular Economy, Bd. 35. 1st ed. 2021. Cham: Springer International Publishing; Imprint Springer (RILEM Bookseries, 35), S. 21-32.

Lin, Kunsen; Zhou, Tao; Gao, Xiaofeng; Li, Zongshen; Duan, Huabo; Wu, Huanyu et al. (2022): Deep convolutional neural networks for construction and demolition waste classification: VGGNet structures, cyclical learning rate, and knowledge transfer. In: *Journal of Environmental Management* 318. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115501.

Liu, Weizao; Teng, Liumei; Rohani, Sohrab; Qin, Zhifeng; Zhao, Bin; Xu, Chunbao Charles et al. (2021): CO₂ mineral carbonation using industrial solid wastes: A review of recent developments. In: *Chemical Engineering Journal* 416, S. 129093. DOI: 10.1016/j.cej.2021.129093.

Lotfi, Somayah; Eggimann, Manuel; Wagner, Eckhard; Mróz, Radosław; Deja, Jan (2015): Performance of recycled aggregate concrete based on a new concrete recycling technology. In: *Construction and Building Materials* 95, S. 243–256. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.021.

Lotfi, Somayah; Deja, Jan; Rem, Peter; Mróz, Radosław; van Roekel, Eric; van der Stelt, Hans (2014): Mechanical recycling of EOL concrete into high-grade aggregates. In: *Resources, Conservation and Recycling* 87, S. 117-125. DOI: 10.1016/j.resconrec.2014.03.010.

Lv, Tong; Xu, Lei; Wang, Junjie; Zhang, Qihang; Ran, Bo; Huang, Rong et al. (2024): Review on physical performance, modification mechanisms, carbon emissions and economic costs of recycled aggregates modified with physical enhancement technologies. In: *Journal of Environmental Management* 357, S. 120713. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.120713.

Madaster Germany GmbH (2025). Online verfügbar unter <https://madaster.de/>.

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (Hg.) (2020): Genehmigungs- und Anzeigeverfahren nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz. Leitfaden. Online verfügbar unter https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Umwelt/BImSchG-Genehmigungsleitfaden/Leitfaden-Genehmigungsverfahren-2020.pdf.

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (Hg.) (2023): Abfallbilanz 2022. Ressourcen aus unserer kommunalen Kreislaufwirtschaft. Stuttgart. Online verfügbar unter https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Umwelt/Abfallbilanz-2022-barrierefrei.pdf.

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (Hg.) (2024): Abfallbilanz 2023. Ressourcen aus unserer kommunalen Kreislaufwirtschaft. Online verfügbar unter https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Umwelt/Abfallbilanz-2023.pdf.

Müller, Anette (2018): Baustoffrecycling. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Moreno-Juez, J.; Vegas, Iñigo J.; Gebremariam, Abraham T.; García-Cortés, V.; Di Maio, F. (2020): Treatment of end-of-life concrete in an innovative heating-air classification system for circular cement-based products. In: *Journal of Cleaner Production* 263. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121515.

Netsch, N., et al (2022): Recycling of polystyrene-based external thermal insulation composite systems - Application of combined mechanical and chemical recycling

Nikmehr, Bahareh; Kafle, Bidur; Al-Ameri, Riyadh (2024): A review of the advanced treatment techniques for enriching the recycled concrete aggregates for recycled-based concrete: economic, environmental and technical analysis. In: *SASBE* 13 (3), S. 560-583. DOI: 10.1108/SASBE-11-2022-0243.

Öko-Institut e.V. (2003): Ermittlung der durch die Wiederverwendung von gebrauchten Bauteilen realisierbaren Energieeinsparpotenziale und CO₂-Reduktionspotenziale. Endbericht.

Pantini, S.; Giurato, M.; Rigamonti, L. (2019): A LCA study to investigate resource-efficient strategies for managing post-consumer gypsum waste in Lombardy region (Italy). In: *Resources, Conservation and Recycling* 147, S. 157-168. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.04.019.

Pedreño-Rojas, M. A.; Fořt, J.; Černý, R.; Rubio-de-Hita, P. (2020): Life cycle assessment of natural and recycled gypsum production in the Spanish context. In: *Journal of Cleaner Production* 253, S. 120056. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120056.

Persyn, D., Díaz-Lanchas, J., & Barbero, J. (2022). Estimating road transport costs between and within European Union regions. *Transport Policy*, 124, 33-42. DOI: 10.1016/j.tranpol.2020.04.006.

Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., & West, R. E. (2003). *Plant design and economics for chemical engineers* (5. ed.). McGraw-Hill chemical engineering series. McGraw-Hill.

Radica, Francesco; Iezzi, Gianluca; Trotta, Oriana; Bonifazi, Giuseppe; Serranti, Silvia; Brito, Jorge de (2024): Characterization of CDW types by NIR spectroscopy: Towards an automatic selection of recycled aggregates. In: *Journal of Building Engineering* 88, S. 109005. DOI: 10.1016/j.jobbe.2024.109005.

Rautkoski, Hille; Vähä-Nissi, Mika; Kataja, Kirsi; Gestranus, Marie; Liukkonen, Sari; Määttänen, Marjo et al. (2016): Recycling of Contaminated Construction and Demolition Wood Waste. In: *Waste Biomass Valor* 7 (3), S. 615-624. DOI: 10.1007/s12649-016-9481-9.

Reich, H., Kleemann GmbH (März 2025). Persönliche Kommunikation.

Rywotycki, Marcin; Cebo-Rudnicka, Agnieszka; Szajding, Artur; Kaç, Sławomir; Rikardsen, Mads; Heggelund, Johan et al. (2024): Thermal removal of binder from waste glass wool intended for recycling. In: *J Therm Anal Calorim* 149 (23), S. 13709–13719. DOI: 10.1007/s10973-024-13661-z.

Sattler, Theresa Magdalena (2024): Development of Innovative Recycling Processes for Mineral Wool Waste. DOI: 10.34901/mul.pub.2024.047.

Sattler, Theresa; Doschek-Held, Klaus; Krammer, Anna; Pomberger, Roland; Vollprecht, Daniel (2024): Volume 26 - March 2024. In: *Detritus* (26), S. 60-68. DOI: 10.31025/2611-4135/2024.18355.

Sattler, Theresa; Galler, Robert; Vollprecht, Daniel (2020): Entwicklung innovativer Recyclingverfahren für Mineralwolleabfälle - Projekt RecyMin. In: *Berg Huetttenmaenn Monatsh* 164 (12), S. 552-556. DOI: 10.1007/s00501-019-00922-w.

Schimek, Julia; Sattler, Theresa Magdalena (2020): Aufbereitung von künstlichen Mineralfasern als Grundlage für die weitere Verwendung. In: *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 7: -Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen-*. Online verfügbar unter <https://pure.unileoben.ac.at/en/publications/aufbereitung-von-k%C3%BCnstlichen-mineralfasern-als-grundlage-f%C3%BCr-die->.

Schleier, Julia; Simons, Martin; Greiff, Kathrin; Walther, Grit (2022): End-of-life treatment of EPS-based building insulation material – An estimation of future waste and review of treatment options. In: *Resources, Conservation and Recycling* 187, S. 106603. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106603.

Schnell, Alexander; Rübner, Katrin; Seher, Julia; Müller, Constanze; Müller, Anette; Liebezeit, Steffen et al. (2024): Manufacturing and Application of Lightweight Aggregates from Construction and Demolition Waste. In: *Chemie Ingenieur Technik* 96 (7), S. 969-975. DOI: 10.1002/cite.202300211.

Shigeishi, Mitsuhiro (2017): Separation and collection of coarse aggregate from waste concrete by electric pulsed power. In: *AIP Conference Proceedings* 1887, S. 20077. DOI: 10.1063/1.5003560.

Sirimewan, Diani; Bazli, Milad; Raman, Sudharshan; Mohandes, Saeed Reza; Kineber, Ahmed Farouk; Arashpour, Mehrdad (2024): Deep learning-based models for environmental management: Recognizing construction, renovation, and demolition waste in-the-wild. In: *Journal of Environmental Management* 351. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119908.

Sivamani, Jagan; Renganathan, Neelakantan Thurvas; Palaniraj, Saravanakumar (2021): Enhancing the quality of recycled coarse aggregates by different treatment techniques-a review. In: *Environ Sci Pollut Res* 28 (43), S. 60346-60365. DOI: 10.1007/s11356-021-16428-3.

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2025): Abfallbilanz 2023. In GENESIS-Online Datenbank. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/statistischer-bericht-abfallbilanz-5321001237005.html>.

Steins, Justus J.; Volk, Rebekka; Schultmann, Frank (2021): Modelling and predicting the generation of post-demolition autoclaved aerated concrete (AAC) volumes in Germany until 2050. In: *Resources, Conservation and Recycling* 171, S. 105504. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105504.

Teixeira, Artur Bressanelli; Barkat, Hassan; Sampaio, Carlos Hoffmann; Moncunill, Josep Oliva (2024): Recovery of Demolished House Rocks from Construction and Demolition Waste with Water Jigs. In: *Minerals* 14 (1), S. 39. DOI: 10.3390/min14010039.

Teipel, Ulrich; Fehn, Thomas; Wailersbacher, Beate; Wagner, Swetlana (2022): Projektverbund für mehr Ressourceneffizienz in der bayerischen Wirtschaft insbesondere für KMU und Handwerk – ForCYCLE II. Abschlussbericht. Nürnberg. Online verfügbar unter https://www.stmuv.bayern.de/themen/ressourcenschutz/forcycle/forcycle2/doc/11_abschlussbericht.pdf?utm_source=chatgpt.com.

Trotta, Oriana; Bonifazi, Giuseppe; Capobianco, Giuseppe; Serranti, Silvia (2021): Recycling-Oriented Characterization of Post-Earthquake Building Waste by Different Sensing Techniques. In: *Journal of imaging* 7 (9). DOI: 10.3390/jimaging7090182.

Väntsi, Olli; Kärki, Timo (2014): Mineral wool waste in Europe: a review of mineral wool waste quantity, quality, and current recycling methods. In: *J Mater Cycles Waste Manag* 16 (1), S. 62-72. DOI: 10.1007/s10163-013-0170-5.

Vegas, Iñigo; Broos, Kris; Nielsen, Peter; Lambertz, Oliver; Lisbona, Amaia (2015): Upgrading the quality of mixed recycled aggregates from construction and demolition waste by using near-infrared sorting technology. In: *Construction and Building Materials* 75, S. 121-128. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.109.

Verma, Abhishek; Babu, V. S.; Arunachalam, S. (2022): Influence of acetic acid soaking and mechanical grinding treatment on the properties of treated recycled aggregate concrete. In: *Journal of Material Cycles and Waste Management* 24 (3), S. 877-899. DOI: 10.1007/s10163-022-01360-6.

Vincent, Taillard; Guy, Mercier; Louis-César, Pasquier; Jean-François, Blais; Richard, Martel (2022): Physical process to sort construction and demolition waste (C&DW) fines components using process water. In: *Waste Management* 143, S. 125-134. DOI: 10.1016/j.wasman.2022.02.012.

Volk, Rebekka; Müller, Richard; Schultmann, Frank; Rimbon, Jérémy; Lützkendorf, Thomas; Reinhardt, Joachim; Knappe, Florian (2019): Stofffluss- und Akteursmodell als Grundlage für ein aktives Ressourcenmanagement im Bauwesen von Baden-Württemberg "StAR-Bau" - Schlussbericht des Forschungsvorhabens. Karlsruhe, Baden: KIT Scientific Publishing (Produktion und Energie, 32). Online verfügbar unter <https://www.ksp.kit.edu/site/books/m/10.5445/KSP/1000086644/>.

Volk, Rebekka; Steins, Justus J.; Kreft, Oliver; Schultmann, Frank (2023): Life cycle assessment of post-demolition autoclaved aerated concrete (AAC) recycling options. In: *Resources, Conservation and Recycling* 188, S. 106716. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106716.

Wang, Jiangang; Zhang, Jinxi; Cao, Dandan; Dang, Haixiao; Ding, Bo (2020): Comparison of recycled aggregate treatment methods on the performance for recycled concrete. In: *Construction and Building Materials* 234, S. 117366. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117366.

Waskow, Regis; Gonçalves Maciel, Vinícius; Tubino, Rejane; Passuello, Ana (2021): Environmental performance of construction and demolition waste management strategies for valorization of recycled coarse aggregate. In: *Journal of Environmental Management* 295, S. 113094. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113094.

Xiao, Wen; Yang, Jianhong; Fang, Huaiying; Zhuang, Jiangteng; Ku, Yuedong (2019): A robust classification algorithm for separation of construction waste using NIR hyperspectral system. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 90, S. 1-9. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.04.036.

Yap, Zhen Shyong; Khalid, Nur Hafizah A.; Haron, Zaiton; Mohamed, Azman; Tahir, Mahmood Md; Hasyim, Saloma; Saggaff, Anis (2021): Waste Mineral Wool and Its Opportunities-A Review. In: *Materials (Basel, Switzerland)* 14 (19). DOI: 10.3390/ma14195777.

Yliniemi, Juho; Kinnunen, Paivo; Karinkanta, Pasi; Illikainen, Mirja (2016): Utilization of Mineral Wools as Alkali-Activated Material Precursor. In: *Materials (Basel, Switzerland)* 9 (5). DOI: 10.3390/ma9050312.

Yunusa, Mujahed; Zhang, Xiaoshan; Cui, Peiqiang; Tian, Xiaowu (2022): Durability of Recycled Concrete Aggregates Prepared with Mechanochemical and Thermal Treatment. In: *Materials* 15 (16). DOI: 10.3390/ma15165792.

Zhan, Bao Jian; Xuan, Dong Xing; Poon, Chi Sun (2018): Enhancement of recycled aggregate properties by accelerated CO₂ curing coupled with limewater soaking process. In: *Cement and Concrete Composites* 89, S. 230-237. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.03.011.

Zhang, Chunbo; Hu, Mingming; Dong, Liang; Gebremariam, Abraham; Miranda-Xicotencatl, Brenda; Di Maio, Francesco; Tukker, Arnold (2019): Eco-efficiency assessment of technological innovations in high-grade concrete recycling. In: *Resources, Conservation and Recycling* 149, S. 649-663. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.06.023.

Zhang, Hongru; Zhang, Baoming; Tang, Lingyan; Zeng, Weilai (2023): Analysis of two processing techniques applied on powders from recycling of clay bricks and concrete, in terms of efficiency, energy consumption, and cost. In: *Construction and Building Materials* 385, S. 131517. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131517.

Anhang A

Zusätzlich wurde im Rahmen des Projektes eine Analyse der Wiederverwendungspotenziale von Bauprodukten durchgeführt. Die Wiederverwendung steht an oberster Stelle der europäischen Abfallhierarchie und könnte im deutschen Gebäudebestand ein bislang kaum erschlossenes Ressourcen- und Klimaschutzpotenzial bieten und könnte insbesondere auch im Bereich des einfachen und kostengünstigen Bauens eine attraktive Alternative darstellen. Mehrfache Wiederverwendung von Bauteilen kann jedoch graue Energie, Treibhausgasemissionen und Rohstoffe einsparen. Eine ältere Studie des Öko-Instituts zeigte bereits 2003, dass durch Re-Use gegenüber einem Neubau Primärenergie- und CO₂-Emissionen um über 60 % sinken können (Öko-Institut e.V. 2003). Würden Bauteile vorm bzw. beim Rückbau systematisch wieder auf den Markt gebracht anstatt entsorgt, ließen sich daher möglicherweise enorme Umweltentlastungen erzielen. Trotz dieser möglichen Potenziale sind nicht alle Bauprodukte für einen Re-Use geeignet. Eine Entscheidung über eine technisch mögliche sowie ökonomisch und ökologisch sinnvolle Wieder-/Weiterverwendung sollte daher möglichst datenbasiert erfolgen. Allerdings ist diese erforderliche (Open Access) Datengrundlage derzeit noch unstrukturiert und lückenhaft bzw. kaum vorhanden – hier besteht Forschungsbedarf.

Die folgende Analyse wurde daher lediglich qualitativ anhand eines Kriterienkatalogs sowie auf Basis des Leitfadens des Umweltbundesamtes (UBA 2015) zur Wiederverwendung von Bauteilen durchgeführt. Dazu wurden die Potenziale der verschiedenen Bauteile bzw. Bauteilgruppen anhand von fünf Kriterien auf einer ordinalen Skala von 1 = geringes Potenzial bis 5 = hohes Potenzial bewertet.

Außenfenster, -türen, -tore: Das größte Potenzial liegt hier in der hohen gesellschaftlichen Nachfrage vor allem nach Fenstern und Türen in Standardgröße. Auch für historische Bauteile und große Holzbauteile wird der Markt als beachtlich eingeschätzt. Da die Demontage und Lagerung teilweise sehr aufwändig ist und die Materialbeschaffenheit durch den direkten Kontakt mit dem Außenklima oft beansprucht ist, wird das Potenzial zur Wiederverwendung allerdings nur als moderat eingeschätzt. Herausforderung bei Fenstern und Außentüren ist auch die Einhaltung aktueller energetischer Anforderungen (Wärmedämmung, Dichtheit) bei Wiedereinbau in Neubauten. Ältere Fenster können aber in weniger anspruchsvollen Umgebungen (z. B. Innenwände, unbeheizte Räume, Denkmalsanierung) weiter genutzt werden oder durch Nachrüstungen verbessert werden. Konkrete Daten zur ökonomischen oder ökologischen Vorteilhaftigkeit (bestimmter Konstellationen) liegen nicht vor, auf denen sich vielversprechende Geschäftsmodelle bzw. Praktiken etablieren könnten.

Kriterien (Leistungspotenziale)	1	2	3	4	5	Begründung
★ Materialqualität			●			<ul style="list-style-type: none"> • Direkter Kontakt zum Außenklima • Wärmetechnische Anforderungen, Freiheit von Kratzern • Weichmacherwanderung, Einsatz von Holzschutzmitteln
🔨 Demontagefähigkeit			●			<ul style="list-style-type: none"> • Aufwand abhängig von Einbauweise • Aufwändige Lagerung • Notwendigkeit von Gerüsten
💰 Wirtschaftlichkeit				●		<ul style="list-style-type: none"> • Vermarktungspotenzial abhängig von Wärmeschutz und Materialbeschaffenheit • Standardmaße und besondere Bauteile wirtschaftlicher
📄 Standardisierung				●		<ul style="list-style-type: none"> • Fenster: 1,00 x 1,00 m • Aluminium/ Kunststoff-Türen: <2,20 m hoch, 0,90 m breit • Historische Holztüren nicht standardisiert
👥 Gesellschaftliche Akzeptanz und Nachfrage					●	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Nachfrage nach wiederverwendbaren Fenstern und Außentüren

Abbildung 13 - Außenfenster, -türen, -tore

Innentüren: Innentüren zeigen ein sehr hohes Potenzial zur Wiederverwendung. Aufgrund des fehlenden Kontakts zum Außenklima können diese in der Regel mit sehr guter Materialqualität überzeugen; die Oberflächen können ggf. aufgearbeitet werden. Weiterhin sind im Gegensatz zu Außentüren und Fenstern auch keine energetischen Gesichtspunkte zu beachten, allerdings haben sich möglicherweise Schall- und Brandschutz-Anforderungen der Nutzer geändert und erfordern ggf. eine Nachrüstung. Die Wiederverwendung von Innentüren spart die Ressourcen für neue Holz- oder Metallrahmen und -türlätter sowie Glas und vermeidet Abfälle. Technisch ist der Ausbau meist gut machbar, allerdings wäre auch hier eine Standardisierung der Maße wünschenswert. Aufgrund der hohen gesellschaftlichen Nachfrage und den geringen Montagekosten zeichnen sich insbesondere historische und standardisierte Türen durch hohes wirtschaftliches Potential und damit hohes Potential zur Wiederverwendung aus. Konkrete Daten zur ökonomischen oder ökologischen Vorteilhaftigkeit (bestimmter Konstellationen) liegen nicht vor, auf denen sich vielversprechende Geschäftsmodelle bzw. Praktiken etablieren könnten.

Kriterien (Leistungspotenziale)	1	2	3	4	5	Begründung
★ Materialqualität					●	<ul style="list-style-type: none"> Kein Kontakt zum Außenklima keine energetischen Gesichtspunkte zu beachten Oberflächenbeschaffenheit i.d.R. untergeordnete Rolle
🔧 Demontagefähigkeit					●	<ul style="list-style-type: none"> Relativ leichter Ausbau, Transport und Lagerung
💰 Wirtschaftlichkeit					●	<ul style="list-style-type: none"> Leichte Vermarktung von Standardmaßen und -Systemen Regionale Nachfrageunterschiede
📄 Standardisierung				●		<ul style="list-style-type: none"> Innentüren oftmals ohne besondere Anforderungen Spezialtüren für Brand- und Rauchschutz (verlieren durch Ausbau i.d.R. ihre Zulassung)
👥 Gesellschaftliche Akzeptanz und Nachfrage					●	<ul style="list-style-type: none"> Nachfrage nach Innentüren am höchsten bundesweit

Abbildung 14 - Innentüren

Treppen: Auch Treppen haben ein sehr hohes Potenzial zur Wiederverwendung. Insbesondere der hohe Neupreis macht die deutlich günstigeren, wiederverwendeten Treppenanlagen für Nutzer attraktiv. Die einfache Lagerung und gute Demontierbarkeit von Treppenanlagen unterstreicht ebenfalls das große Potential für die Wiederverwendung von Treppen. Lediglich der ungewisse Schadstoffgehalt von lackierten und oberflächenbehandelten Holztreppen könnte das Potential in diesem Fall mindern. Konkrete Daten zur ökonomischen oder ökologischen Vorteilhaftigkeit (bestimmter Konstellationen) liegen nicht vor, auf denen sich vielversprechende Geschäftsmodelle bzw. Praktiken etablieren könnten.

Kriterien (Leistungspotenziale)	1	2	3	4	5	Begründung
★ Materialqualität				●		<ul style="list-style-type: none"> Einschätzung des Schadstoffgehalts bei lackierten und oberflächenbehandelten Holztreppen notwendig
🔧 Demontagefähigkeit					●	<ul style="list-style-type: none"> Gute Demontierbarkeit und einfache Lagerung von Treppen, Treppengeländern, Pfosten, Handläufen
💰 Wirtschaftlichkeit				●		<ul style="list-style-type: none"> Teurer Transport ganzer Treppen Relativ hohe Preise durch hohe Neupreise Besonders gute Vermarktung ganzer Treppen
📄 Standardisierung					●	<ul style="list-style-type: none"> Landesbauordnungen regeln Wiedereinbau Einfache Anpassbarkeit der Treppen
👥 Gesellschaftliche Akzeptanz und Nachfrage					●	<ul style="list-style-type: none"> Attraktiver Kaufpreis (1/2 Neupreis) Hohe Nachfrage nach geradläufigen oder viertelgewendelten, ganzen Treppen

Abbildung 15 - Treppen

Bodenbeläge: Grundsätzlich können Bodenbeläge (z. B. Natursteinplatten, Parkett, Fliesen) ausgebaut und in anderen Gebäuden erneut verlegt werden. Durch Teer- und bitumenhaltigen Klebstoffe in bzw. unter altem Parkett und dem zeitintensiven Ausbau von Parkett und mit Zementmischung befestigten

Fliesen, kann das Potenzial für die Wiederverwendung von Bodenbelägen eingeschränkt sein. Großes Potential liegt allerdings bei alten Holzfußböden (z. B. Kiefer, Eiche oder Pitchpine) und rustikalen Designs, die gesellschaftlich stark begehrt sind. Fliesen sind ebenfalls gefragt, solange sie gereinigt bzw. von Mörtel befreit sowie in ausreichenden Mengen und guter Qualität verfügbar sind. Andere Böden wie Kork, Linoleum, Bitumen oder Teppich sind aufgrund ihrer flächigen Verklebung schwieriger auszubauen und können möglicherweise auch größere Abnutzungsspuren aufweisen, wenn sie nicht für ein Recycling oder eine Wiederverwendung designt waren d.h. insbesondere lösbare Verbindungen aufweisen. Konkrete Daten zur ökonomischen oder ökologischen Vorteilhaftigkeit (bestimmter Konstellationen) liegen nicht vor, auf denen sich vielversprechende Geschäftsmodelle bzw. Praktiken etablieren könnten.

Kriterien (Leistungspotenziale)	1	2	3	4	5	Begründung
★ Materialqualität			●			<ul style="list-style-type: none"> • Gute Reinigung notwendig, Freiheit von Nagellöchern • Dicke der Nutzschicht über Nut ausschlaggebend • Teer- und bitumenhaltige Klebstoffe in altem Parkett
🏗️ Demontagefähigkeit			●			<ul style="list-style-type: none"> • Sehr zeitintensiver Ausbau von Parkett • Einfacher Ausbau von Keramikfliesen • Unmöglicher Ausbau bei Zementmischung
💰 Wirtschaftlichkeit				●		<ul style="list-style-type: none"> • Teurer Ausbau von Parkett • Gute Vermarktbarkeit von Holzfußböden • Fliesenverkauf lohnend, wenn mind. 10qm unversehrt
📄 Standardisierung					●	<ul style="list-style-type: none"> • Bauaufsichtliche Festlegungen für hochbeanspruchte Bereiche
👥 Gesellschaftliche Akzeptanz und Nachfrage					●	<ul style="list-style-type: none"> • Trend zum Rustikalen (sehr breite Dielen) • Besonders alte Holzfußböden (Kiefer, Eiche, Pitchpine) sehr begehrt

Abbildung 16 - Bodenbeläge

Dacheindeckungen und Wände: Das Potenzial für die Wiederverwendung von Dacheindeckungen und Wänden wird als moderat eingeschätzt. Zwar haben historische Dachziegel und Mauersteine großes Potenzial in der Denkmalpflege, doch sind vor allem der hohe Ausbau- und Transportaufwand und die eingeschränkte Materialqualität durch Kontakt mit dem Außenklima als limitierende Faktoren zu nennen. Je größer die Anzahl an gleichen Steinen oder Dachziegeln, desto besser wird allerdings die Vermarktbarkeit eingeschätzt. Evtl. ist eine Nutzung (historischer) Bauteile wie Ziegeln in der Fassadengestaltung, oder im Garten- und Landschaftsbau denkbar, bspw. zur Errichtung von Höhenabfangungen, Mauern oder Rasenumrandungen. Konkrete Daten zur ökonomischen oder ökologischen Vorteilhaftigkeit (bestimmter Konstellationen) liegen nicht vor, auf denen sich vielversprechende Geschäftsmodelle bzw. Praktiken etablieren könnten.

Kriterien (Leistungspotenziale)	1	2	3	4	5	Begründung
★ Materialqualität			●			<ul style="list-style-type: none"> • Kontakt mit Außenklima • Wiederverwendung von min. 40 Jahren muss möglich sein • Druckfestigkeitsprüfung und frei von Flechten, Ausblüfung
🔨 Demontagefähigkeit				●		<ul style="list-style-type: none"> • gute Demontierbarkeit von Dachziegeln oder -pfannen (Einhängesystem) • erheblicher Transportaufwand
💰 Wirtschaftlichkeit				●		<ul style="list-style-type: none"> • Mauersteine sortiert nach Marktanteilen: Mauerziegel, Kalksandsteine, Porenbetonsteine und Betonsteine • Nur Vermarktbar, wenn gut gereinigt • Bessere Vermarktung, je größer Anzahl gleicher Steine
📄 *Standardisierung						
👥 Gesellschaftliche Akzeptanz und Nachfrage				●		<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz historischer Ziegel für Denkmalschutz beliebt • Alte Backsteine als Vormauersteine beliebt

*keine Informationen in der Datengrundlage gegeben

Abbildung 17 – Dacheindeckungen und Wände

Heizkörper und Thermostatventile: Heizkörper und Thermostatventile zeigen ein moderates bis geringes Potenzial zur Wiederverwendung. Große Einschränkungen bestehen vor allem in der Materialqualität, da eine Vielzahl an Anforderungen wie das Vorliegen eines Markenprodukts, die geforderte Neuwertigkeit oder Mindest-Restlebensdauer, die Vielzahl von Dokumenten und die großen Anforderungen an die Materialbeschaffenheit einschränkend auf das Potential zur Wiederverwendung wirken. Auch die relativ zeitaufwändige Demontage und der Transport und die eher moderate Nachfrage tragen dazu bei, dass das Potential zur Wiederverwendung eher geringer ausfällt. Konkrete Daten zur ökonomischen oder ökologischen Vorteilhaftigkeit (bestimmter Konstellationen) liegen nicht vor, auf denen sich vielversprechende Geschäftsmodelle bzw. Praktiken etablieren könnten.

Kriterien (Leistungspotenziale)	1	2	3	4	5	Begründung
★ Materialqualität			●			<ul style="list-style-type: none"> • müssen einwandfrei funktionieren, nicht älter als 5-10 Jahre, Markenprodukte sein • Herstellerinformationen, Gebrauchsanweisungen und Schornsteinprotokolle müssen vorhanden sein
🔨 Demontagefähigkeit				●		<ul style="list-style-type: none"> • relativ zeitaufwändige Demontage und Transport • problemlose Lagerung
💰 Wirtschaftlichkeit			●			<ul style="list-style-type: none"> • Heizkörper aus Stahlblech mit garantiertem Schrottpreis erschwert Anreiz zur Wiederverwertung • Angebot von Heizanlagen (Brennern) in Bauteilbörsen nicht angestrebt (wenn überhaupt Ersatzteillager)
📄 Standardisierung				●		<ul style="list-style-type: none"> • Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes • Brennwerttechnik muss vollständig sein • regional Anforderungen an Abgaswerte
👥 Gesellschaftliche Akzeptanz und Nachfrage				●		<ul style="list-style-type: none"> • Nachfrage nach Heizkörpern vorhanden: Platz 3 in Bauteillagern

Abbildung 18 - Wärmeerzeuger/ Heizkörper und Thermostatventile

Sanitäreinrichtungen und Armaturen: Durch die in der Regel gute Materialqualität und Demontagefähigkeit wird das Potenzial für die Wiederverwendung von Sanitäreinrichtungen und Armaturen als hoch bis moderat eingeschätzt. Obwohl vor allem Designer-Badkombinationen große Nachfrage erfahren, schränken vor allem die niedrigen erzielbaren Preise von Nicht-Designer-Sanitäreinrichtungen das wirtschaftliche Potential und damit den Anreiz zur Wiederverwendung für Verkäufer erheblich ein. Auch herrscht in der Gesellschaft teilweise noch wenig Akzeptanz für wiederverwendete Sanitäranlagen; die Entwicklung bzw. Nutzung professioneller Reinigungs- und Beschichtungsverfahren könnte Vorbehalte reduzieren. Konkrete Daten zur ökonomischen oder ökologischen Vorteilhaftigkeit (bestimmter Konstellationen) liegen nicht vor, auf denen sich vielversprechende Geschäftsmodelle bzw. Praktiken etablieren könnten.

Kriterien (Leistungspotenziale)	1	2	3	4	5	Begründung
★ Materialqualität					●	• gute Erneuerbarkeit durch neue Beschichtung
🔨 Demontagefähigkeit				●	●	• gute Ausbaubarkeit von Badarmaturen • aufwändige Demontage von eingemauerten Badewannen oder Duschwannen
💰 Wirtschaftlichkeit				●		• Voraussetzung für Verkauf: günstige Preise • hohe Preise möglich für Designer-Bauteile • Ausbau 40 Jahre alter Gussbadewannen unwirtschaftlich
📄 Standardisierung					●	• meist standardisiert , können mit wenig Anpassungsaufwand ausgetauscht werden
👥 Gesellschaftliche Akzeptanz und Nachfrage				●		• hohe Nachfrage nach Badkombinationen (v.a. Designer) • Platz 2 und 3 bzgl. Verkäufe in Bauteillagern • teilweise wenig Akzeptanz bei Sanitäranlagen

Abbildung 19 - Sanitäreinrichtungen

Natur- und Pflastersteine: Natursteinelemente und standardisierte Pflastersteine haben sehr hohes Wiederverwendungspotenzial. Aufgrund ihrer extremen Langlebigkeit und einfachen Demontage eignen diese sich besonders für eine Wiederverwendung, die auch mehrfach erfolgen kann.

Kriterien (Leistungspotenziale)	1	2	3	4	5	Begründung
★ Materialqualität					●	<ul style="list-style-type: none"> Reinigung notwendig Extreme Langlebigkeit, mehrfache Wiederverwendung
🔧 Demontagefähigkeit				●	●	<ul style="list-style-type: none"> Sehr leichte Demontagefähigkeit Aufwändiger Transport
💰 Wirtschaftlichkeit				●	●	<ul style="list-style-type: none"> sehr gute Vermarktung von Natursteinelementen schwierigere Vermarktung von Gehwegplatten
📄 Standardisierung				●	●	<ul style="list-style-type: none"> standardisierte Pflastersteine nicht standardisierte Natursteine, Brunnen, etc.
👥 *Gesellschaftliche Akzeptanz und Nachfrage						

*keine Informationen in der Datengrundlage gegeben

Abbildung 20 – Natur- und Pflastersteine

Umwehrungen: Aufgrund der besonderen Stabilität und des guten Grundmaterials, wird das Potential zur Wiederverwendung insbesondere von metallischen Umwehrungen (Trepengeländer, Brüstungen) als hoch eingeschätzt. Auch die leichte Abbaubarkeit und die guten Vermarktungsmöglichkeiten tragen zu einem sehr hohen Potenzial zur Wiederverwendung bei. Allerdings müssen auch hier die nicht standardisierten Bauteile möglicherweise an den neuen Einsatzort angepasst werden, was entsprechendes Werkzeug und handwerkliches Können erfordert. Lediglich die individuelle Anpassung und Bearbeitung von Zäunen lohnt sich aufgrund des hohen Zeit- und Kostenaufwandes nicht. Konkrete Daten zur ökonomischen oder ökologischen Vorteilhaftigkeit (bestimmter Konstellationen) liegen nicht vor, auf denen sich vielversprechende Geschäftsmodelle bzw. Praktiken etablieren könnten.

Kriterien (Leistungspotenziale)	1	2	3	4	5	Begründung
★ Materialqualität					●	<ul style="list-style-type: none"> stabil und von guter Grundsubstanz, dürfen angerostet sein keine Wiederverwendung von Drahtzäunen (Beulen)
🔧 Demontagefähigkeit					●	<ul style="list-style-type: none"> leichte Abbaubarkeit von Zäunen und Toren Ausbaubarkeit von Zaunpfosten abhängig von Montierung
💰 Wirtschaftlichkeit					●	<ul style="list-style-type: none"> Gute Vermarktung von Zäunen, Systemgeländern und Toren Anpassung aufwändig und kostenintensiv
📄 Standardisierung					●	<ul style="list-style-type: none"> in der Regel genormtes Material bei geringen Ansprüchen (Schule etc.) auch nicht genormtes Material möglich
👥 *Gesellschaftliche Akzeptanz und Nachfrage						

*keine Informationen in der Datengrundlage gegeben

Abbildung 21 - Umwehruung: Zäune/Tore und Geländer

Stahlbetonteile: Als eher moderat bis gering wird aktuell das Potential für die Wiederverwendung von Stahlbetonteilen eingeschätzt. Das Potenzial liegt hier hauptsächlich in der relativ guten Materialqualität von Stahlbetonbauteilen im Falle eines sachgemäßen Rückbaus (Bauzustandstufen (BZS 1 und 2)), Umschlags, Transports und Zwischenlagerung. Größere Einschränkungen ergeben sich allerdings durch die mangelnde Standardisierung, die eine zeit- und kostenaufwendige Katalogisierung und Vermarktung notwendig macht. Auch aufgrund des attraktiven Preises der wiederverwendeten Bauteile wird die Nachfrage nach diesen Bauprodukten allerdings als vielversprechend bewertet. Konkrete Daten zur ökonomischen oder ökologischen Vorteilhaftigkeit (bestimmter Konstellationen) liegen nicht vor, auf denen sich vielversprechende Geschäftsmodelle bzw. Praktiken etablieren könnten.

Kriterien (Leistungspotenziale)	1	2	3	4	5	Begründung
★ Materialqualität				●		<ul style="list-style-type: none"> müssen Kriterien neuer Stahlbetonbauteile entsprechen 80-90% der Bauteile behalten BZS 1 und 2 bei sachgemäßem Rückbau, Umschlag und Transport
🔧 Demontagefähigkeit			●	●		<ul style="list-style-type: none"> genaue Erfassung des Spendergebäudes notwendig Zwischenlagerungen notwendig
💰 Wirtschaftlichkeit				●		<ul style="list-style-type: none"> Verkaufspreis Deckenplatte: ca. 31% der Neukosten Verkaufspreis Innenwandfertigteile: ca. 23% der Neukosten zeit- und kostenaufwendige Katalogisierung der potenziellen Fertigteile
📄 Standardisierung		●				<ul style="list-style-type: none"> Trotz standardisierter Bau- und Typserien große Unterschiede in geometrischen Abmaßen, Elementmassen, verbaute Elementanzahl
👥 Gesellschaftliche Akzeptanz und Nachfrage					●	<ul style="list-style-type: none"> hauptsächliche Nachfrage nach Deckenplatten 28% fertiggestellter Nichtwohngebäude in Stahlbetonbauweise (2011)

Abbildung 22 - Stahlbetonteile

Stahlbauteile: Stahlbauteile zeigen das größte Potenzial von allen Bauprodukten durch ihre nahezu unbegrenzte Recyclingfähigkeit und hohe Standardisierung. Auch die Demontage ist vergleichsweise einfach und (hohe) Erlöse für Verkäufer verlockend. Stahlträger können durch Entschrauben oder Abtrennen relativ unbeschädigt gewonnen werden und für einen ähnlichen oder auch angepassten Verwendungszweck wieder eingebaut werden. Allerdings sind tragende Bauteile oft fest mit dem Bauwerk verbunden, sodass ihr selektiver Ausbau sehr zeit- und arbeitsaufwändig ist. Wichtig ist die statische Überprüfung und ggf. Aufarbeitung (Entrosten, neue Bohrungen, Beschichtung) vor dem Wiedereinbau. Die hohe gesellschaftliche Akzeptanz von Stahlbauteilen zeigt sich in den unvergleichbar hohen Wiederverwendungs- und Recyclingraten.

Kriterien (Leistungspotenziale)	1	2	3	4	5	Begründung
★ Materialqualität					●	<ul style="list-style-type: none"> • ohne Qualitätseinbußen nahezu 100% recyclingfähig • hohe Wertbeständigkeit
🔧 Demontagefähigkeit					●	<ul style="list-style-type: none"> • einfacher Rückbau durch Demontage von Schraubenverbindungen oder Brennschneiden
💰 Wirtschaftlichkeit					●	<ul style="list-style-type: none"> • (hohe) Erlössituation für Stahl /Stahlschrott und direkter Verwertungsweg zum Aufbereiter/ Metallhandel
📄 Standardisierung					●	<ul style="list-style-type: none"> • Normung für verbaute Stahlbauteile • Stahlbau-Grundnormen/DIN-Nomen, EURONORM, Eurocode
👥 Gesellschaftliche Akzeptanz und Nachfrage					●	<ul style="list-style-type: none"> • Wiederverwendungsrate von 11 % • Recyclingrate von 88 % • relative Anteil der fertiggestellten Gebäude in Stahlbauweise 22,4 % (2011)

Abbildung 23 - Stahlbauteile

Holzbauteile: Große Herausforderungen bei der Wiederverwendung von **Holzbauteilen** bestehen insbesondere bei der Schadstoffprüfung und der Standardisierung von Holzbauteilen. Aufgrund der derzeit mangelnden Möglichkeiten zur schnellen und kostengünstigen Einschätzung des Gefährdungspotenzials durch Holzschutzmittel und Oberflächenbehandlungen werden Holzbauteile häufig als unbrauchbar für eine Wiederverwendung eingestuft. Zudem bedarf es einer industrialisierten Prüfung der Holzbauteile hinsichtlich anderer Schädigungen wie Holzwurmfraß, Löcher, Einkerbungen, etc. Großvolumige Vollholzelemente (insbesondere Eiche) erfreuen sich allerdings relativ großer Beliebtheit und auch die positiven Effekte der Bauprodukte auf die Reduzierung von Treibhausgasen durch reduzierte thermische Verwertung (Verbrennung) und stattdessen anhaltende Speicherung des darin enthaltenen Kohlenstoffs sowie die Schonung der Holzreserven in den Wäldern sprechen für eine Wiederverwendung. Aufgrund der notwendigen kostenintensiven chemischen und chronologischen Analyse wird das Potential allerdings derzeit als eher gering eingeschätzt. Konkrete Daten zur ökonomischen oder ökologischen Vorteilhaftigkeit (bestimmter Konstellationen) liegen nicht vor, auf denen sich vielversprechende Geschäftsmodelle bzw. Praktiken etablieren könnten.

Kriterien (Leistungspotenziale)	1	2	3	4	5	Begründung
★ Materialqualität		●				<ul style="list-style-type: none"> • Gefährdungspotenzial durch Holzschutzmittel und Oberflächenbehandlungen (fehlende Dokumentation) • natürliche Dauerhaftigkeit
🔧 Demontagefähigkeit			●			<ul style="list-style-type: none"> • weitestgehend zerstörungsfreie Demontage • Schwer lösbare Verbunde/ Verunreinigungen • Trockene Lagerung und hoher Bergungsaufwand
💰 Wirtschaftlichkeit			●			<ul style="list-style-type: none"> • kostenintensive chemische und chronologische Analyse, um Schadstoffe auszuschließen
📄 Standardisierung			●			<ul style="list-style-type: none"> • Charakterisierung und Klassifizierung von schutzmittelbehandelten Althölzern schwierig • Holzbauteile neueren Datums mit Normung
👥 Gesellschaftliche Akzeptanz und Nachfrage				●		<ul style="list-style-type: none"> • besonders beliebt: großvolumige Vollholzelemente (insb. Eichenholz), da knappes Angebot • starke Nachfrage nach historischen Holzbauteilen • Fertiggestellte Gebäude in Holzbauweise sinkend (2011)

Abbildung 24 - Holzbauteile

Zusammenfassung der qualitativen Potentialanalyse

Technisch und wirtschaftlich ausgereifte Wiederverwendungspfade existieren heute vor allem für normierte, modular montierte Bauteile wie Stahlträger, Innentüren oder komplette Treppen. Bei komplexen oder schadstoffanfälligen Produkten, etwa Holzbauteilen oder alten Kunststofffenstern, überwiegen Prüf- und Aufbereitungsaufwände, sodass ihr Potenzial mittelfristig von verbesserten Rückbaumethoden, Produktpässen, qualitätsgesicherter Aufbereitung und regulatorischen Anreizen abhängt.

- **Hohes Potenzial** bieten normierte, demontierbare und wertbeständige Bauteile:
 - Stahlbauteile,
 - Innentüren,
 - Treppen
 - Umwehungen
 - Natur-/Pflastersteine
- **Mittleres Potenzial** bieten Bauteile mit materialspezifischen Einschränkungen (kontaminationsbedingter Mehraufwand) und kleineren Marktsegmenten (z.B. energetische Anforderungen):
 - Außenfenster und -türen,
 - Bodenbeläge,
 - Sanitärobjekte und Armaturen
 - Dacheindeckungen und Wände

Eine Verminderung des Potenzials sieht das Umweltbundesamt vor allem durch zeitliche Aufwände und Kosten durch hohe Prüf- und Planungsaufwände sowie fehlende Standardisierung, Schadstoff- und

Qualitätsrisiken oder statische Unsicherheiten. Insgesamt identifiziert die UBA-Studie aber vor allem institutionelle statt technischer Barrieren und empfiehlt einen Mix aus Rechts-, Markt- und Informationsinstrumenten (UBA 2015). Regulatorische Unsicherheit, juristische Haftungsrisiken wie z. B. fehlende verlässliche Verfahren zur Resttragfähigkeitsprüfung, ökonomische Fehlanreize durch hohe Schrottpreise bzw. vergleichsweise günstige Entsorgungskosten sowie mangelnde Marktetablierung und -transparenz erschweren die Etablierung dieses Verwertungspfades. Abhilfe könnten hier die verpflichtende Durchführung eines Pre-Demolition-Audits (DIN SPEC 91484) (Forderung u.a. der Deutschen Umwelthilfe) oder digitale Produktpässe für Bauteile für eine bessere Vermarktung, Qualitätsnachweise und CO₂-Bilanzierung darstellen. Plattformen wie *Madaster* vergeben bereits einen Circularity Indicator, der Wiederverwendungschancen transparent macht und sich BIM-kompatibel mit Ausschreibungstools koppeln lässt (Madaster Germany GmbH 2025).

Die öffentliche Beschaffung könnte darüber hinaus als Markthebel auftreten, um eine stabilere Nachfrage nach wiederverwendeten Bauprodukten zu generieren und Skaleneffekte auszulösen. Umweltverbände fordern dies bereits für Vergabeverfahren vgl. Deutsche Umwelthilfe 2025).

In Deutschland gibt es bereits zahlreiche lokale und teilweise bundesweite Akteure, die Wiederverwendung praktizieren und unterstützen. Digitale Plattformen wie *Madaster*, *ebay*, *N1* oder *Concular* bieten Materialpässe und Börsen für Sekundärbaustoffe an. Die digitale Plattform *Restado* (vormals Bauteilnetz) vernetzt lokale Bauteilbörsen, und Plattformen wie *ReUse and Trade* oder regional organisierte Bauteilbörsen (z. B. in Bremen, Berlin, Hamburg) und vermitteln gebrauchte Materialien zwischen Abrissunternehmen und Bauherren. Diese Angebote sollten systematisch genutzt und strukturell in Baden-Württemberg unterstützt und ausgebaut werden, damit sie sich langfristig am Markt etablieren.

Anhang B

Tabelle 8 Identifizierte Technologien bzw. Ansätze

	Technologie / Verfahren	SR-Produktstrom	Kurzbeschreibung / Prinzip	TRL	Quellen
Mineralik	Mechanischer Abrieb (LA-Abriebmühle)	RC-Grobkörn- nung	Los Angeles -Abriebmühle (Trommel/Stahlkugeln)/ Schlagmühle entfernt Mörtel → senkt Wasserabsorption, erhöht Druckfestigkeit, Bedarf Feinstaub-Kontrolle	8-9	Al-Bayati et al. (2016), Altbeton Recycling (Projektbericht, Gering et al. 2015), Bisciotti 2024, Braymand 2017, C2CA Projekt (Lotfi et al. (2014), Lotfi et al. (2015), Lotfi et al. (2017), Gebremariam et al. (2020), Zhang, Hu et al. (2019), Feng 2024, Gong et al. (2022), Kalinowska-Wichrowska et al. (2020), Kazmi et al. (2019), Leng 2023, Lippiatt et al. (2014), Liu 2021, Lv et al. (2024), Mistri et al. (2024), Pedro et al. (2014), Shigeishi (2017), Sivamani et al. (2021), Verma et al. (2022), Werkstoff der nächsten Generation (R-Beton) (Projekt), Yunusa et al. (2022), Zhan & Poon, 2018, ELDYNTON (Projekt, Dittrich et al. 2015), FaBeR (Projekt, Overhage et al. (2024)), RC-Zement (Projekt, Perbix und Malorny 2021), Redemco (Projekt, Weimann und Adam (2017)), Schnell et al. 2024 (REA-Light-EU)
	Hybrid: Thermo-Mechanisch (ADR+HAS)	Grob- u. Fein-RCA	Aufprallrotor + 350 °C Luftklassierer, trockenes Verfahren → höhere Qualität als rein mechanisch, Heißluft-Energie Bedarf, Mobile Anlage, kein Brauchwasser	5-8	
	CO ₂ -Härtung	RC-Gesteinskörn- nung	Ca(OH) ₂ + CO ₂ → CaCO ₃ , Porenfüllung und erhöhte Festigkeit, 1 bar CO ₂ , 24 h → senkt Wasserabsorption, CO ₂ -Bindung + Festigkeitssteigerung, Kinetik langsam; Druckkammern und CO ₂ -Logistik nötig	4-7	
	Chemische Abtrennung (milde Säure / Polymer)	RC-Grobkörn- nung	3 % Essigsäure, 24 h Einweichen, milde Säure bevorzugt, nass-chemische Feinreinigung → Hohe Reinheit, senkt Wasserabsorption, Chemikalienbedarf, Abwasser & Neutralisation erforderlich	3-5	
	REALight-Sinterung (Mauerwerk)	Leichtzuschlag	Gemahlenes Mauerwerk + ≤ 1 wt.-% SiC → Drehrohrofen, Aufbläh-Sinterung zu kugeligen LWA → ersetzt Blähton, nutzbar für Infrareichtbeton, simultane SO ₄ -Abtrennung, Energiebedarf, SiC-Kosten	6-7	
	Hybrid: Chemisch-Mechanisch	RC-Grobkörn- nung	LA-Abrieb + Säure + 400 °C → hohe Qualitätssteigerung; komplexe Prozesskette, ohne Abwasserkreislauf nicht praktikabel	4-6	
	Thermische oder alkalische Aktivierung (Ziegelmehl)	erhärtender Bindemitteler-satz	Na-Silikat/NaOH, 40 °C, chemisch gebundene Matrix mit geringer Porosität → CO ₂ -Vorteil; hohe Alkalikosten	4-6	
	Bio-MICP	Feinfraktion	Urea-Bakterien → CaCO ₃ , biogene Karbonatisierung, Porenverschluss → chemikalienarm, CO ₂ -Speicherung, Prozessdauer, NH ₃ -Emission, Skalierung offen	2-3	
EPS	EPS-Verdichtung	Leichtzuschlagstoff, gepresste Blöcke / Pellets	schmelz- bzw. mechanisches Verdichten zur Volumenreduzierung → kosten- & energiearm, Volumenreduzierung, Schaumstruktur geht verloren, Downcycling, HBCD nicht entfernt	8-9	Bicer et al. (2021), ForCYCLE II (Projekt, Teipel et al. 2022), CIRCULAR-EPS / LIFE-PSLOOP (Projekt, Schlummer et al. (2015), Schlummer et al. (2017)), KUBA (Projekt, Schleier et al. (2022))
	EPS-Lösemittel (CreaSolv®)	PS-Granulat	Selektive PS-Lösung, Entfernung von HBCD → Polymerqualität nahe Neuware, ermöglicht geschlossenen Stoffkreislauf, Hohe OPEX & CAPEX (Lösungsmittel), Rückgewinnungskreislauf erforderlich	7-8	
	EPS-Pyrolyse	Styrol-Öl / Monomer	Sauerstofffreie thermische Spaltung von EPS, Zeolith-Katalyse erhöht Styrolausbeute → Gewinn hochwertiger Rohstoffe (Styrol), Verwertung auch HBCD-EPS, hoher Strombedarf, Vorverdichtung nötig, verwertbare Nebenprodukte, HBr-Gasbehandlung	5-7	
Holz	Sensor-Sortierung + Zerkleinerung	Holzchips für Span-/Faserplatten	HSI-/NIR-Erkennung + ML-Klassifikation, Zerkleinern, Schreddern, Fräsen → sehr hohe Sortiergenauigkeit, Hohe	4-6	Besserer 2021, Khodaei 2022, OHA-Film Projekt (Leiter et al.

	Technologie / Verfahren	SR-Produktstrom	Kurzbeschreibung / Prinzip	TRL	Quellen
	(Sortenreines A1-A2-Holz)		Faserreinheit → Wiedereinsatz in MDF/HDF, CAPEX Sensor, Training nötig, Spektrale Erkennung von Beschichtungen + Klebern; Klassifikation in Echtzeit		(2022), Leiter et al. (2023), Holzfasern und Holzspanplatten als alternative Rohstoffe (Projekt, Kües et al. (2021)), Wood2Wood (Projekt, Kekes et al. (2024)), Mancini 2023, Rautkoski 2016, Troilo et al. 2023
	Hybrid-MDF-Recovery/ MDF-Recovery®, Wood2Wood framework	MDF-Rezyklat	Sensor + milde Hydrolyse + Sprüherfaserung → Potenzial zu closed-loop MDF; CAPEX hoch, Kombiniert energiearme mechanische Schritte mit gezielter thermischer/chemischer Reinigung	4-6	
	Dampfexplosion (MDF) (Verklebte A2/A3-Platten)	MDF-Fasern	Dampfdefibrierung (150-190 °C, 10-20 min) → hoher Integrationsnutzen in MDF-Linien, Entfernt 60-80 % UF-Harz unter Beibehaltung der Faserintegrität; ermöglicht einen MDF-Ersatz von ≥ 20 %, Abgasbehandlung erforderlich,	4-6	
	Rapid-FLIM + KI-Klassifikation (A1-A4-Post-Consumer-Holz)	-	Inline-Trennung A1/A2 vs. A3/A4, Fluoreszenz-Lebensdauer-Imaging; MLP-Netz < 5 % false positives → erkennt halogenierte A4, verhindert Downcycling, Prototypisch, hohe Investition	4-5	
	Niedertemperatur-Pyrolyse (MDF) (Leimhaltiges A2/A3-Holz)	entklebte Späne/Fasern, Pyrolyseöl	Sauerstofffreies thermisches Depolymerisieren, Fasern bleiben intakt → Harzentfernung, Faserrückgewinnung; Energiekosten, Abgasreinigung	4-5	
	Biologische Dekontamination (belastetes A3/A4)	dekontaminierte Späne	5-14 d Pilz-/Bakterienabbau von Cu, Cr, As / PAK → niedriger Energiebedarf, lange Prozesszeiten, niedrige TRL	3-4	
Wolle	Thermochemische Behandlung zu SCM	Schlacke (SCM)	CaO + Schmelzen + Quench → Hochreaktives SCM als Zementersatz, hoher Energiebedarf	4-5	BitKOIN (Projekt, Doschek-Held et al. (2024)), Recymin (Projekt, Sattler et al. (2020), Sattler et al. (2024)), Wool2Loop Project (Projekt), Yap 2021, Rywotycski (2024), Yliniemi (2016)
	Geopolymerisierung (WOOL2LOOP)	Mineralwolle-Binder	NaOH/Na-Aluminat → Aktivatoren teuer; Sickerwasser-Risiko	5-6	
Gips	Hybrid: Mechanisch + Thermisch (REALight)	RC-Gips + leichte Granulate	CDW-Mahlen, Drehrohröfen (Schwellenbrennen) inkl. SO ₂ -Abgas scrubbing (FGD-Gips) → nutzt Sulfatgehalt doppelt: Gips & Leichtaggregat → Prozesskomplexität	6 - 7	GipsRec2.0-Projekt, Yap (2021), Bumanis (2022), REALight-Projekt, Schnell et al. (2024), Chilli et al. (2017), Vincent et al. (2022)
	Thermische Behandlung	Halbhydrat- oder Anhydrit-Gips	Zerkleinern und Trocknen/Calcinieren anschließende Hydratisierung im Binder → hohe Produktqualität, reaktiv + Energiebedarf < nat. Gips (geringere Restfeuchte), Brennenergie nötig, Staubabgas	7-8	
	Chemische Reinigung / Säure-Laugung	reiner Gips (Flocken / Pulver) + Nebenprodukt Mg-Gips	Zerkleinern, H ₂ SO ₄ -Leaching, Filtration, Ca(OH) ₂ -Neutralisation (Gips-Fällung), Wasser-Recycling → hohe Reinheit, entfernt lösliche Salze & Schwermetalle, Chemikalien- & Abwasseranfall, höhere OPEX	4-5	