

KI-basierte optische Klassifikation mineralischer Massen und Böden im Feld

Bauschutt und Böden weisen hohe Verwertungsquoten von 90 % auf. Durch den regulatorischen Rahmen gehen große Mengen als minderwertig verloren, die ressourcenschonend hochwertig weiterverwendet werden könnten. Optische Systeme im Feld können hierfür qualitätssichernd und validierend wirken, um diese Materialien für die Kreislaufwirtschaft im Bau im Stoffstrom fortlaufend bereitstellen zu können.

Fabian Hüttig und Max-Frederick Gerken

Die mineralischen Bauabfälle stellen den umfangreichsten Abfallstrom in Deutschland dar und bilden mit einem Anteil von etwa 60 % am Gesamtabfallaufkommen eine zentrale Herausforderung sowie Chance für die Kreislaufwirtschaft. Ihre ordnungsgemäße Erfassung, Aufbereitung und Verwertung ist nicht nur durch die Abfallhierarchie des § 6 KrWG gefordert, sondern trägt maßgeblich zur Ressourcen- und Deponieschonung bei [1].

Die Klassifizierung erfolgt über Kapitel 17 Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV). Im Langzeitmittel seit 1996 liegen Bauabfälle bei 207,2 Mio. t (Mt) pro Jahr, wobei maßgeblich mit 125 Mt, also 60 % Boden und Steine (AVV 17 05 04/06/08) und konstant 27 % Bauschutt (AVV 17 01) anfallen; die übrigen Fraktionen wie Straßenaufbruch (AVV 17 03 02) und Gipse (AVV 17 08 02) bleiben mengenmäßig gering.

Dabei sind die Verwertungsquoten hoch: 2022 wurden 188,2 Mt (90,4 %) „umweltverträglich verwertet“, davon 75,3 Mt zu Recycling-Baustoffen aufbereitet. Für körnige Fraktionen (Bauschutt etc.) liegt die Quote bei 95,8 %, weit über der EU-Vorgabe von 70 % (vgl. § 14 Abs. 3 KrWG) [2].

Der Bauschutt (55,2 Mt, 2022) umfasst Beton (17 01 01), Ziegel (17 01 02), Fliesen/Keramik (17 01 03) und Gemische (17 01 07). Bundesweite Tonnagen je Unterfraktion werden nicht separat erfasst, da die AVV-Statistik aggregiert [1]. Dieser Umstand steht, wie im

Weiteren gezeigt werden wird, der hochwertigen Wiederverwendung und Weiterverwertung im Wege.

Besonders, wenn man berücksichtigt, dass sich typische Zusammensetzungen aus bauwerkspezifischen Kennwerten ergeben und individuell vorkunden lassen: In Gebäuden vor 1970 dominieren Ziegel/Mauerwerk mit ca. 60 Masse-%, Beton ca. 30 %; ab 1970 kehrt sich dieses Verhältnis durch den Anstieg der Betonbauweise ab den 1960er-/70er-Jahren um, sodass Beton bis 86 Masse-% und Mauerwerk nur 12 – 35 % darstellt [3].

Insbesondere aus diesen Betonmengen können heute hochwertige RC-Gesteinskörnungen entstehen. Berichtet sind 46,6 Mt, die aus 59,8 Mt im Jahr 2018 recycelt worden sind [4]. Allerdings, bedarf es, diese Zahlen kritisch in den Primärrohstoffbedarf und ihre qualitative Substitution einzuordnen, wie im Folgenden dargestellt wird.

Der Primärrohstoffbedarf der deutschen Bauindustrie und Substitutionsmöglichkeiten aus mineralischen Abfällen

Der jährliche Rohstoffverbrauch in der deutschen Baubranche betrug 2014 insgesamt 620 Mt, davon im Hochbau 216,9 Mt (35%) und Straßen-/Tiefbau mit 402,5 Mt (65 %); wobei Primärrohstoffe als Gesteinskörnungen, Sand und Kies sowie Kalkstein für Zement dominieren [4]. So lag im Jahr 2019 nach Branchenangaben die Fördermenge von Sand und Kies bei ca. 45 % (259 Mt), 38 % Naturstein (217 Mt) und 10 % Kalkstein (60 Mt), gefolgt von zu je ~ 2 % Spezialkies/Sand (10,9 Mt), Ziegelton (10,5 Mt) und Spezialton/Kaolin (12,6 Mt). Expertenprognosen des Bundesverbands Baustoffe, Steine und Erden (bbs) prognostizieren eine Stagnation bis leichten Anstieg auf ~ 604 Mt (bei hoher Baukonjunktur) [5].

Die Substitutionsquote (Anteil der Sekundärrohstoffe) betrug 2019 etwa 15 % bei 100 Mio. t Sekundärrohstoffen; darunter 73,7 Mt RC-Gesteine und 7,4 Mt Hochofenschlacke. RC-Gesteinskörnungen entstehen durch mechanische Aufbereitung von Bauschutt, Straßenaufbruch und Böden zu definierten Fraktionen, die Primär-gesteinskörnungen ersetzen sollen – sie bleiben jedoch weitgehend auf minderwertige Anwendungen beschränkt (**Tabelle 1**) und deckten ca. 13 % des Gesteinskörnungsbedarfs [2]. Nur ein Bruch-

/ Kompakt /

- Große Mengen an Bauschutt und Böden könnten hochwertig weiterverwendet werden, wenn nicht durch regulatorische Rahmen große Mengen als minderwertige Ressource verloren gehen.
- KI-basierte Bilderkennungssysteme ermöglichen es, mineralische Massen vom „unbekannten Abfall“ in einen transparenten, regelkonformen und marktfähigen Stoffstrom zu überführen.
- Die eigentliche Transformationswirkung entsteht, wenn diese Daten in übergeordnete Markt-, Logistik- und Regulierungsökosysteme integriert werden und so die Kreislaufwirtschaft im Bauwesen technisch wie ökonomisch tragfähig machen.

Tabelle 1: Verwendung von RC-Gesteinskörnungen (ca. 75 Mt, 2022)

Anwendungsbereich	Anteil (%) [3]	Menge (Mio. t) [7]	Wertigkeit
Tiefbau (technische Bauwerke, Tragschichten)	78 – 80	58 – 60	niedrig
Asphaltzuschlag	15 – 20	11 – 15	mittel
RC-Beton/Bauteile	< 1	< 0,8	hoch
Sonstiges (Deponie etc.)	5 – 7	4 – 5	niedrig

Quelle: Fabian Huettig

teil erreicht hochwertige Einsatzbereiche, kurz: 1 % (0,9 von 192 Mt) in die Betonproduktion, während der Großteil im Tiefbau oder in der Verfüllung (ca. 57 Mio. t) landet [4], [6].

Zusammenfassend bieten mineralische Massen und Böden wegen ihres Volumens enorme Kreislaufpotenziale. Die heute kommunizierte Verwertungsquote von ~ 90 % täuscht hochwertiges Recycling vor, da „Verwertung“ die Verfüllung einschließt (§ 3 Abs. 23a KrWG). Die Differenzierung deren Wertigkeit hinsichtlich eines „echten Recyclings“, unterstreicht dabei die Notwendigkeit eines sortenreinen Anfalls, dessen Erfassung und Qualifizierung für ein Routing zu hochwertigem Recycling ermöglicht [1], [6], [7]. Dieses Vorhaben ist jedoch in ein komplexes regulatorisches Werk eingebunden, welches für eine zukünftige Steigerung der Wertigkeit, valide und digital beherrschbar werden muss.

Regulatorische Einordnung: Hürden und Chancen

Der Übergang von Bauabfall oder Boden zu RC-Gesteinskörnung oder Ersatzbaustoff (z. B. RC-Gestein) setzt ein abgeschlossenes Verwertungsverfahren voraus, das Gefahrenpotenziale dauerhaft ausschließt und Markt-/Normkonformität gewährleistet [8].

Das Ende der Abfalleigenschaft erfolgt definitionsgemäß nach § 5 Abs. 1 KrWG, wenn:

1. ein Verwertungsverfahren (Anlage 2 KrWG) abgeschlossen ist,
2. der Stoff primärrohstoffsubstituierbar, marktfähig und normgerecht ist und
3. abfallspezifische Gefährdungspotenziale (z. B. Schadstoffe) ausgeschlossen sind [9].

Ohne EU-weite „End-of-Waste“-Verordnungen (z. B. für RC-Materialien) greifen nationale/landesrechtliche Kriterien; die Beweislast liegt stets beim Inverkehrbringer [8]. Die ErsatzbaustoffV regelt keine Abfallende-Kriterien für mineralische Fraktionen, wodurch fehlende bundeseinheitliche Regelungen zu landesspezifischen Auslegungen führt, wie etwa in Baden-Württemberg. Hier endet die Abfalleigenschaft interimistisch nach § 5 KrWG für Klasse-0/1-Materialien [10].

Nach Verarbeitung müssen Abschn. 4 der ErsatzbaustoffV (technischer Einbau) bzw. BBodSchV §§ 6 – 8 (bodenähnliche Nutzung) eingehalten werden; der Inverkehrbringer mineralischer Ersatzbaustoffe muss den Verwender bei Abgabe auf die Einhaltung aller Anforderungen der ErsatzbaustoffV hinweisen, insbesondere zu Einbauvorgaben und bodenähnlichen Anwendungen; dies erfolgt typischerweise via Konformitätserklärung oder Lieferschein. [10], [11] Diese vorläufige Regelung schließt nahtlos an die Güteüber-

wachung (Abschn. 3) an, um Schadstoffanreicherung und Umweltgefährdung auszuschließen [12].

Bei RC-Gestein aus Bauschutt (z. B. Beton-/Mauerwerkbruch) endet die Abfalleigenschaft erst nach dauerhaftem Ausschluss abfallspezifischer Gefahrenpotenziale (§ 5 KrWG), oft nicht vor finaler Einbauverwendung in technischen Bauwerken, da Schadstoffe (z. B. PAK, Schwermetalle) mobilisierbar bleiben [8], [9]. Dies verknüpft sich mit DepV (Deponiekriterien) und LAGA M 20 (Zuordnungswerte Z 0–2): Nur Klasse RC-1/RC-3 erlaubt eine deponie-

freie Kreislaufführung, unterliegt aber Inverkehrbringerpflichten zur Nachverfolgung [11], [13]. Die Konformitätserklärung dokumentiert die Materialklasse (z. B. RC-1), Prüfwerte und Einbauvorgaben die durch den Lieferschein (Anlage 7 EBV) mit Nachweis der Güteüberwachung ergänzt werden [14], [11]. Im Recyclingprozess (z. B. Nassaufbereitung) interagiert dies mit den Baufachlichen Richtlinien, wonach Wiedereinbau ein Schadstoff-Abfallkataster erfordert, allerdings Deponien schont und Upcycling fördert [3], [13].

Werner et al. [6] kritisieren das Missverhältnis zwischen Angebot und Nachfrage von RC Gesteinen: Kapazitäten für hochwertige RC-Baustoffe existieren, doch fehlt Nachfrage, insbesondere im öffentlichen Hochbau. Als Ursachen nennen Sie insbesondere vorgenannte aufwendige Zertifizierung/ Dokumentation, die Informationsdefizite zu Qualität und sowie den steten Abfallstatus von Abbruchmaterial und Bodenaushub, der daraus entstandenes RC-Material in gesellschaftlicher Wahrnehmung stets minderwertig wirken lässt [7].

Müller [3] warnt andererseits hinsichtlich der Qualität vor technischen Risiken wie Ettringitbildung in sulfathaltigen RC-Mischungen, die zu Schäden in Tragschichten führen.

Um hier effizient steuern und vorbeugen und dokumentieren zu können, bedingt es zuvorderst die möglichst sortenreine Verbringung anfallender Massen zu gewährleisten, wie es untergesetzlich vorgesehen/-schrieben ist: Die Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV) greift bei Bauschutt, Bauabfällen und Böden zwar nur teilweise, da mineralische Fraktionen aus Kapitel 17 05 AVV (Boden, Steine, Baggergut) explizit ausgenommen sind (§ 2 Nr. 3 GewAbfV). Sie gilt jedoch für nicht-mineralische Bauabfälle (z. B. Holz, Glas, Kunststoffe, Metalle, Gips) sowie gemischte Bauabfälle (17 09 04), mit einer Getrennthaltungspflicht für Fraktionen wie Beton (17 01 01), Ziegel (17 01 02), Fliesen/Keramik (17 01 03) und Bitumengemische (17 03 02). Für Böden (17 05), Steine und Baggergut gelten spezielle Regelungen der BBodSchV und seit 2023 die ErsatzbaustoffV.

Gemischte mineralische Fraktionen (17 01 07, Z1.2) dürfen nur bei Unzumutbarkeit getrennter Sammlung entstehen und erfordern Vorbehandlung. Dabei besteht gem. § 9a KrWG i.V.m. § 8 GewAbfV ein Vermischungsverbot – also die absichtliche oder unabsichtliche Schadstoffverdünnung von Abfällen zu betreiben, durch Mischung von Z1/Z2-Materialien (LAGA M20) welche Schadstoffe „verwässern“ könnten.

Handlungsorientierend kann die bereits angeführte Baufachliche Richtlinie Recycling für den Umgang mit Bau- und Abbruchabfällen sowie den Einsatz von RC-Baustoffen auf Bundesliegenschaften bei Rück-, Um- und Neubau sein [13].

Basierend auf KrWG (Abfallhierarchie, Erzeugerpflichten, Getrenntsammlung), EU-BauPV, Arbeitsschutz (TRGS 519 Asbest), BBodSchV priorisiert sie den selektiven Abbruch, erfordert eine Bestandsaufnahme/Erstbewertung (Checklisten, Schadstoffkatas-ter), Probenahme und ein vorzeitiges Abfallentsorgungskonzept ebenso wie die Wiederverwendung von Bauteilen; RC-Baustoffe (mineralisch: aus Bauschutt; nicht-mineralisch: EPS, Gips); Einsatz in Straßen-/Erdbau (Tragschichten) wie auch Hochbau (Leichtbeton), die Güteüberwachung (Eignungsnachweis, WPK, Fremdprüfung) und Nachweispflichten (NachwV).

Hierfür können digitale Lösungen schon heute in bestehende Prozesse eingebunden werden. Dafür notwendig sind nur maschinenlesbare Daten, die über Materialien am Punkt des Anfalls, im Transport sowie in der Weiterverarbeitung temporo-spatial vorliegen.

Optische Qualifizierungsmöglichkeiten und deren Nutzen im Feld

Digitale Bilderkennung von Böden, Bauschutt und anderen mineralischen Massen ist kein Selbstzweck, sondern eine Voraussetzung, um Kreislaufwirtschaft im Bauwesen technisch, wirtschaftlich und regulatorisch überhaupt umsetzen zu können.

Mineralische Bauabfälle und Böden fallen dezentral, in großen Massen und in stark schwankender Qualität an; die heutige Klassifikation erfolgt überwiegend visuell (bewertet/beurteilt durch einen Menschen) oder über punktuelle Laboranalysen mit erheblichen Zeitverzögerungen.

Dadurch werden Stoffströme vorsorglich (und ökonomischen wie gesellschaftlichen Zwängen folgend) der minderwertigen Weiterverwertung oder direkt auf Deponien gelenkt, obwohl sie bautechnisch und umweltrechtlich als Ersatzbaustoff oder RC-Zuschlag zu Beton hochwertig einsetzbar wären. Gleichzeitig bleibt, wie oben gezeigt, der Bedarf an Gesteins-Rohstoffen bis 2040 mindestens konstant, während die Substitution durch RC-Baustoffe nur moderat wächst und industrielle Nebenprodukte (Schlacken, Flugaschen, REA-Gips) zurückgehen. Ohne belastbare Echtzeitdaten zur Materialqualität am Ort des Anfalls bleiben die Substitutionspotenziale ungenutzt, die Zirkularitätsrate nichtmetallischer Mineralien stagniert und CO₂-Einsparpotenziale durch RC-Gesteinskörnungen werden nicht gehoben.

Optische Systeme adressieren genau diese Lücke, unterscheiden sich aber deutlich in Eignung, Kosten und Robustheit. Maßgeblich für optische Systeme ist deren Einsatzmöglichkeit „im Feld“. Das bedeutet, Bilddaten zu erzeugen und auswerten zu können, die unter wechselnden Licht- (Sonne, Wolken), Wetter- (Temperatur, Regen, Schnee) oder Emissionsverhältnissen (Stäube, Säuren/Basen, Schlamm) von jeweils gleichen Materialien (Beton, Ziegel, Boden etc.) erzeugt werden. Hinzu kommt häufig die Herausforderung, dass sich die zu beurteilenden Massen bewegen – etwa auf einer Ladefläche oder einem Förderband. Dazu stehen verschiedene Technologien zur

Verfügung, die teilweise in anderen Bereichen (Raumfahrt, Geowissenschaften, Medizin) schon zur Anwendung kommen:

- Die übliche (fotographische) Darstellung sichtbaren Lichts (RGB, VIS), die eine menschliche Bewertung zulässt, verbessert zwar die Dokumentation, ist aber vom Informationsgehalt unzureichend, um valide Daten für einzelne Stofffraktionen insbesondere in Stoffgemischen zu liefern.
- Hyperspektral-Kameras bieten hohe spektrale Auflösung und damit feine Materialdifferenzierung, sind aber teuer, empfindlich gegenüber Staub/Feuchte, brauchen Push-Broom-Geometrie mit geringer lateraler Auflösung und verlieren damit den räumlichen Kontext, etwa für Korngröße und Kantenlänge. Für offene Ladeflächen, Förderbänder mit breiten Materialströmen und variierenden Umweltbedingungen sind sie daher nur begrenzt praxistauglich.
- Klassische Nahinfrarot (NIR) Detektoren. Bekannt aus Sortierautomatisation im Kunststoff- und Glasrecycling sowie Bergbau (Technologieführer sind hier: Tomra Systems ASA und EVK DI Kerschhaggl GmbH) erreichen hohe Trennschärfen, benötigen aber definierte Kornbanden und relativ saubere Oberflächen; die Detektoren liegen typischerweise jenseits von 35.000 Euro pro Kanal und sind für geschlossene, klimatisierte Anlagen ausgelegt. Für mobile oder teilmobile Anwendungen auf Baustellen sind Investitions- und Betriebskosten wie auch die Empfindlichkeit gegenüber Verschmutzung limitierend für deren Einsatz.
- Laser-induzierter Breakdown-Spektroskopie (LIBS) oder Laser Light Imaging Detection and Ranging (LIDAR) liefern jeweils nur einen Ausschnitt der benötigten Informationen; dazu kommen hohe Kosten und eingeschränkte Echtzeitfähigkeit bei breiten, schnellen Stoffströmen. Für eine flächendeckende Erfassung von Bauschutt und Böden im Feld gelten sie derzeit als technologisch interessant und ökonomisch und betrieblich nur in Nischen tragfähig.

Tabelle 2: Optische Technologien für die Erkennung von mineralischen Massen und Böden im Feld

Anforderung	Multispektralkameras	LIDAR	Flächenkameras	Laser-induced breakdown spectroscopy
Erkennung von mehr als vier Materialklassen	✓	x	x	✓
räumliche Klassifizierung von Material	x	✓	✓	x
Volumenquantifizierung Materialstrom	x	✓	x	x
Ortserkennung einer Materialklasse im Strom	✓	x	x	✓
Detektionsgeschwindigkeit 4,8 m/s	✓	✓	✓	✓
Einsetzbar unter Feldbedingungen	x	✓	✓	x
Preis pro System < 10.000 EUR	x	✓	✓	x

Quelle: Fabian Huettig



Bild 1: Ladefläche mit einer RC-Gesteinskörnung aufgezeichnet mittels VIS-Technologie bei Durchfahrt eines LKW unter einem Erfassungssystem

- Multispektrale Systeme fokussieren auf wenige, materialspezifisch ausgewählte Wellenlängenbänder im sichtbaren und Infrarotbereich. Dies reduziert Datenmenge, Kosten und Komplexität, da die Technologie robust, kompakt und echtzeitfähig auslegbar ist. In Kombination mit stereographischer 3D-Bildgebung liefern sie - bereits in der Entwicklung - sowohl spektrale Klassen (Beton, Ziegel, Gips, Störstoffe) als auch räumliche Parameter (Korngröße, Kornform, Volumenstrom) für Fördergeschwindigkeiten bis etwa 4,7 m/s.

Gleichwohl, muss sich der Preis für diese Systeme in die ökonomischen Rahmen des Mehrwerts einordnen. Systeme je nach Aufgabe von über 10.000 oder gar 100.000 Euro sind dafür nicht tragfähig.

Der Übersicht in **Tabelle 2** ist zu entnehmen, dass eine Kombination von Technologien notwendig ist, um konkrete, diskrete und bedarfsgerechte Datenpakete für den jeweiligen Anwendungszweck liefern zu können. Abgewogen über Kosten, Robustheit und Informationsgehalt spricht viel dafür, multispektrale, KI-gestützte Bildgebung als technisch und wirtschaftlich tragfähigen Kernbaustein für eine breite Anwendung in der Bau- und Recyclingpraxis zu betrachten, während Hyperspektral- und LIBS-Systeme eher Ergänzungen für Spezialfälle etwa für die Sortenüberwachung in Aufbereitungs- oder Produktionsanlagen bleiben.

Ein bereits im Feld erprobtes und installiertes System ist der sog. Truck-Imager (Firma Optocycle), der über Waageneinrichtungen oder Baustellenausfahrten installiert werden kann, um offene Ladeflächen detailgetreu aufzuzeichnen (**Bild 1** und **Bild 2**). Hier liefern, neben dem für das menschliche Auge notwendige RGB-Bild, auch optionale multispektrale Sensoren genauere Informationen über die Zusammensetzung. Verbunden mit Wiege- und Lieferscheinen kann auch mittels Dichtewert und Volumenschätzung, die Homogenität der Masse bestimmt werden. Computervision-Algorithmen ermöglichen es zusätzlich, Störstoffe wie Holz oder auch Kantengrößen von Beton-/Mauerbruch oder Korngrößenverteilung von Gesteinen zu benennen. In Summe jeweils wertvolle und reliable Informationen, die Aussagen über die Qualität sowie den zu erwartenden Preis für eine Aufbereitung auszumachen. Unter Umständen kann auch individuell ein geeigneter Partner mit der Kompetenz der Verwertung genau dieser Ladung zur Verwertung angefahren werden. Die LTE-/5G-Technologie macht die Datenverfügbarkeit auch da möglich, wo kein kabelgebundener Internetzugang zur Verfügung steht. Dies ist allerdings zwingend notwendig, da die u. a. neuronalen Netze zur Bild- bzw. Sensordatenverarbeitung via Cloud Computing laufen und Ergebnisse an das Dashboard des



Bild 2: Erfassungsmodul im Feld: Optocycle Truck Imager über der Anlieferungswaage bei einem Betonwerk

Kunden bzw. eine API-Schnittstelle für die freie Nutzung (etwa in Stoffstromplattformen) übergeben wird.

Das Bereitstellen dieser Informationen für alle Stakeholder im Abbruch-/Bauprozess temporo-spatial ist ein Gamechanger.

Denkansatz „Stoffstromplattform“ und Möglichkeiten im Kreislauf

Kern des Ansatzes ist, mineralische Massen nicht mehr als „Abfall“, sondern als dynamische, qualitätsklassifizierte Ressource zu behandeln, deren Eigenschaften über den gesamten Lebenszyklus digital erfasst werden (**Bild 3**). Daraus ergeben sich mehrere Ebenen von Möglichkeiten:

Auf Prozessebene können Echtzeit-Klassifikationsdaten genutzt werden, um Preprocessing, Sortierung, Lagerung und Rezepturführung adaptiv zu steuern, z. B. Umschaltung von Stoffströmen bei Grenzwertüberschreitungen für RC-Typen nach Ersatzbaustoff V. Das reduziert Fehlchargen, minimiert Laboraufwand und ermöglicht eine kontinuierliche Qualitätssicherung statt stichprobenbasierter Kontrolle.

Auf Produktebene lassen sich konstante, nachweisbare Qualitäten erzeugen, die Vertrauen bei R-Beton-Herstellern und Bauherren schaffen und so Nachfragehemmnisse für RC-Baustoffe adressieren, die u. a. in Qualitätsunsicherheit und Haftungsfragen liegen. Digitale Qualitätsnachweise können perspektivisch in EPDs, DGNB-Kriterien und Bauteilkataloge integriert werden.

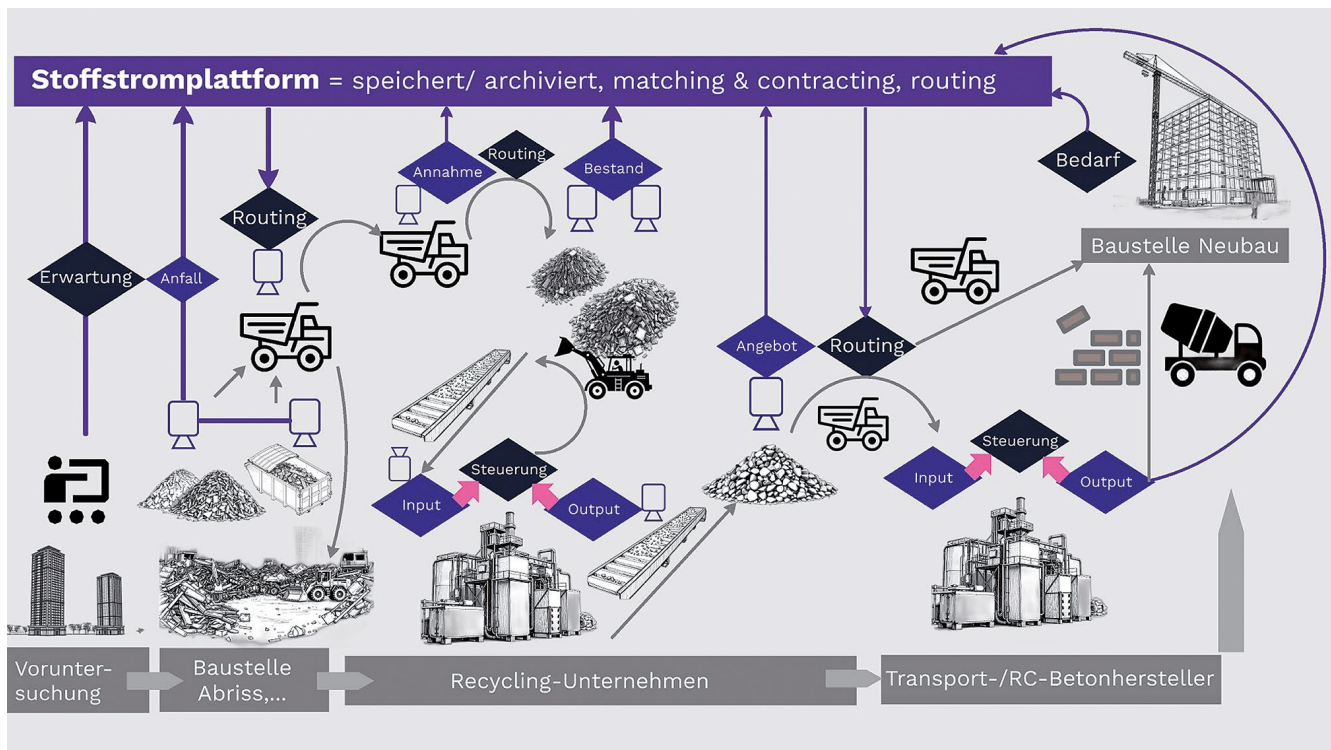


Bild 3: Schematische Darstellung der Einbindung optischer Systeme in die Verwertung und Aufbereitung von mineralischen Massen und Böden: Eine Stoffstromplattform kann von den Vorerkundungen von Abbrucharealen für die Planung der Baustelleneinrichtung bis zur Bedarfsmeldung für Neubauprojekte Mengen und Qualitäten im Strom rechtssicher speichern/bereitstellen, abfragen und anfordern bzw. makeln. Datenströme (violett) insb. aus optischen Systemen (blau) liefern Informationen zu Aufwerk- oder Containerüberwachung auf Baustellen wie auch bei Recyclingunternehmen oder Rohstoff-/RC-Betonproduzenten; Ladeflächenqualifizierung bei Abfuhr und Anlieferung von Bauabfällen oder RC-Gesteinen sowie Überwachung von Förderbändern zur Beschickung und damit Steuerung von Aufbereitungsanlagen oder Betonwerken inklusive der Ergebnis- und Qualitätskontrolle. Auch Erwartungswerte sowie Bedarfe von Baustellen können über die Plattform steuernd auf anfallende Massen reagieren.

Auf Systemebene kann die zunehmende Verknappung primärer Steine-Erden-Rohstoffe und das geplante Ende CO₂-intensiver Nebenprodukte (Schlacken, Flugaschen) durch gezielten Einsatz hochwertiger RC-Fractionen kompensiert werden; Szenarien zeigen, dass RC-Baustoffe bis 2040 um 5 – 17 % zulegen können, wenn Aufbereitung und Logistik verbessert werden. Dazu sind aber verlässliche Daten zu Mengen, Qualitäten, Schadstoffprofilen und räumlich-zeitlicher Verfügbarkeit erforderlich – genau hier setzt die Bilderkennung an.

Der volle Hebel entsteht erst, wenn Bild- und KI-Daten nicht isoliert in Anlagen, bei Betreibern oder in bilateralen Vertragspartnern verbleiben, sondern in digitale Stoffstromplattformen multilateral eingebunden werden, die als digitaler Umschlagplatz dienen können (**Bild 3**):

Hier können Qualitätsdaten der optischen Systeme als standardisierte Datenpunkte (Materialklasse, Korngrößenband, RC-Typ, Umweltparameter) sowie geographisch verortet anfallende Menge (inkl. der Vorerkundungserkenntnisse) abgelegt werden. Statt heterogenem Bauschutt stellt sich ein teils voraussagbarer, handelbarer Rohstoff mit nachvollziehbarer Qualität und Güte als (zukünftiger) Bestand „digital“ zur Verfügung.

Die Ein- und Auslagerungen solcher Materien bei Stakeholdern (auf Baustellen oder in Recyclingunternehmen) können in Echtzeit

und qualitätsgeprüft, digitalen Materialpässen versehen werden. Das erleichtert die Erfüllung von Nachweis- und Dokumentationspflichten (NachwV, GewAbfV, ErsatzbaustoffV), reduziert Transaktionskosten und unterstützt Behörden bei der Kontrolle von Verwertungswegen.

- Gekoppelt mit Logistik-Plattformen lassen sich Transporte auf Basis realer Qualitäten und Bedarfe routen: Böden und Bauschutt gelangen direkt zu passenden Verwertungsorten (selbe oder andere Baustelle, Recycler), Leerfahrten und unnötige Deponietransporte werden reduziert, was sowohl Deponieraum schon als auch LKW-bedingte CO₂-Emissionen senkt.
- In der Planung und im Hochbau können Planer und Bauherren über Plattform-Schnittstellen gezielt RC-Material mit definierten Eigenschaften beschaffen, was die in DGNB-Leitlinien geforderte zirkuläre Beschaffung und Urban-Mining-Strategien erst praktikabel macht [15]. Langfristig lassen sich so Closed-Loop-Konzepte bis auf Bauteil- und Gebäudeebene abbilden.

In Summe ermöglichen KI-basierte Bilderkennungssysteme, mineralische Massen vom „unbekannten Abfall“ in einen transparenten, regelkonformen und marktfähigen Stoffstrom von Ressourcen zu überführen; die eigentliche Transformationswirkung entsteht, wenn diese Daten in übergeordnete Markt-, Logistik- und Regulie-

rungsökosysteme integriert werden und so Kreislaufwirtschaft im Bauwesen technisch wie ökonomisch tragfähig machen.

Auch, wenn „predemolition audits“ unterstützend anfallende Mengen vorhersagen können, bleiben die Anstrengungen, den Anteil wiederzuverwendender Bauteile durch strukturierten Rückbau zu steigern davon unberührt. Vielmehr muss sich die hochwertige Anschlussnutzung (auch von Bauabfällen) als fester Bestandteil in die Vorplanung und Durchführung integrieren, wie es die DGNB-Leitlinie und letztlich veröffentlichte DIN SPEC 91595:2026 „Anschlussnutzungskonzept für Bauprodukte aus Bestandsgebäuden“ beschreiben.

Literatur

- [1] Klöckner, J., Giern, S., & Heuser, B. (2022). Mineralische Bauabfälle. In: P. Kurth, A. Oexle, & M. Faulstich (Hrsg.), Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft (2. Aufl., S. 609–625). Springer Vieweg.
- [2] Kreislaufwirtschaft Bau. (2024). Mineralische Bauabfälle – Monitoring 2022: Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2022 (14. Monitoring-Bericht). <https://www.kreislaufwirtschaft-bau.de>
- [3] Müller, A. (2018). Baustoffrecycling: Entstehung – Aufbereitung – Verwertung (2. Aufl.). Springer Vieweg.
- [4] Kreislaufwirtschaft Bau. (2021). Mineralische Bauabfälle – Monitoring 2018: Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2018 (12. Monitoring-Bericht). <https://www.kreislaufwirtschaft-bau.de>
- [5] Stoll, F., Blazejczak, J., Schwarzkopp, F., Gornig, M. & Loya, S. (2022). Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine- und Erden-Industrie bis 2040 in Deutschland. Aktualisierung 2022. Berlin: Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V. https://www.bv-miro.org/wp-content/uploads/bbs_Studie-Rohstoffnachfrage-bis-2040.pdf
- [6] Werner, M., Kretschmar, D., Zinder, G., Uhlig, B. (2022). Was behindert den Einsatz von mineralischen RC-Baustoffen? WiKo Tagungsbandbeitrag (INTEGRAL-Projekt, TU Dresden), Vortrag 17.-18.03.2022. https://integral-info.webspace.tu-dresden.de/cms_integral/wp-content/uploads/WiKo_Tagungsbandbeitrag_Werner.pdf
- [7] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ). Ressourcen der Zukunft für Zement und Beton: Ressourcenroadmap 2050. Düsseldorf: VDZ gGmbH; 2022. https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/VDZ-Studie_Ressourcenroadmap_2022.pdf
- [8] Lammers, T. (2022). Abfallbegriff: Beginn und Ende der Abfalleigenschaft. In P. Kurth, A. Oexle, & M. Faulstich (Hrsg.), Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft (2. Aufl., Kap. 1, S. 3 – 26). Springer Vieweg.
- [9] Thärichen, A. (2022). Rechtliche Aspekte der Kreislaufwirtschaft: Abfall, Produkt und Nebenprodukt (Dissertation). Nomos.
- [10] Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM BW). (2025, 11. April). Schreiben zum Ende der Abfalleigenschaft mineralischer Ersatzbaustoffe.
- [11] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA). (2025). FAQ zur Ersatzbaustoffverordnung (Version 3, Stand 13.05.2025).
- [12] Hepting-Hug, M. (2025). Anwendung der LAGA-Vollzugshilfe zur Ersatzbaustoffverordnung (Rundschreiben, 24.10.2025). Ministerium für Umwelt Baden-Württemberg.
- [13] Niedersächsisches Landesamt für Bau und Liegenschaften (NLBL) (2018). Baufachliche Richtlinien Recycling: Arbeitshilfen zum Umgang mit Bau- und Abbruchabfällen sowie zum Einsatz von Recycling-Baustoffen auf Liegenschaften des Bundes. Online: https://www.bfr-recycling.de/downloads/Baufachliche_Richtlinien_Recycling.pdf

- [14] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV). (2004). Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TL Gestein-StB 04). FGSV Verlag.
- [15] Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) e.V. (2019). Circular Economy – Kreisläufe schließen, heißt zukunftsfähig sein. DGNB-Report Januar 2019. Stuttgart. online: <https://www.dgnb.de/de/nachhaltiges-bauen/zirkulaeres-bauen/publikationen>

Autoren

Prof. Dr. Fabian Huettig
Max-Frederick Gerken, B.Sc.

Optocycle GmbH
Am Mark 12
72070 Tübingen
f.huettig@optocycle.com
m.gerken@optocycle.com



Mineralischen Bauabfälle

Klöckner, J. et al.: Mineralische Bauabfälle.
In: Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft.
Wiesbaden: Springer Vieweg, 2022.
<https://sn.pub/34tb1v>