

# WP3-A2. Vergleichsstudie zu Informationstechnologien, die auf internationaler Ebene im Steinsektor im Bereich Abfallwirtschaft eingesetzt werden.



Dieses Werk ist lizenziert unter einer [Creative Commons Namensnennung -  
Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

*„Finanziert durch die Europäische Union. Die geäußerten Ansichten und Meinungen sind jedoch ausschließlich die der Autoren und spiegeln nicht unbedingt die der Europäischen Union oder der Exekutivagentur Bildung, Audiovisuelles und Kultur (EACEA) wider. Weder die Europäische Union noch die EACEA können dafür haftbar gemacht werden.“*



## Inhalt

1.	EINLEITUNG .....	4
2.	ABFALLWIRTSCHAFT UND DIGITALISIERUNG: EIN ÜBERBLICK .....	5
2.1.	Abfallwirtschaft in der Steinindustrie.....	6
2.2.	Digitale Transformation in der Abfallwirtschaft.....	8
2.3.	Wesentliche Informationstechnologien .....	9
2.3.1.	Abfallverfolgungssysteme und Rückverfolgbarkeit .....	10
2.3.2.	Intelligente Container, Fernüberwachung und IoT .....	11
2.3.3.	Künstliche Intelligenz (KI) und automatisierte Sortierung .....	12
2.3.4.	Datenanalyse und Entscheidungsunterstützung .....	13
2.3.5.	Mobile Anwendungen und Einbeziehung von Interessengruppen.....	14
2.3.6.	Blockchain und integrierte Architekturen.....	14
2.4.	EU-Politikrahmen.....	15
2.4.1.	Europäischer Green Deal. ....	15
2.4.2.	Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft (CEAP, 2020). ....	16
2.4.3.	Programm „Digitales Europa“ (DIGITAL).....	16
2.4.4.	Auswirkungen auf RockChain.....	17
3.	ABFALLWIRTSCHAFT UND IT-EINFÜHRUNG .....	18
3.1.	DEUTSCHLAND.....	18
3.1.1.	IT-Einführung und Digitalisierungsinitiativen.....	19
3.1.2.	Relevante Projekte, Programme und Strategien .....	19
3.1.3.	Auswirkungen auf RockChain.....	21
3.2.	SPANIEN .....	21
3.2.1.	IT-Einführung und Digitalisierungsinitiativen.....	22
3.2.2.	Relevante Projekte, Programme und Strategien .....	23
3.2.3.	Auswirkungen auf RockChain.....	24
3.3.	RUMÄNIEN.....	24
3.3.1.	IT-Einführung und Digitalisierungsinitiativen.....	24
3.3.2.	Relevante Projekte, Programme und Strategien .....	25
	Auswirkungen auf RockChain.....	26
3.4.	KROATIEN .....	27
3.4.1.	IT-Einführung und Digitalisierungsinitiativen.....	27
3.4.2.	Relevante Projekte, Programme und Strategien .....	28

Auswirkungen für RockChain .....	29
4. ERGEBNISANALYSE .....	30
4.1. DEUTSCHLAND.....	31
Stärken bei der Einführung von IT und Ausbildungsangeboten.....	31
Schwächen und Lücken .....	32
Potenzial für die Integration in die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft .....	32
4.2. SPANIEN.....	33
4.2.1. Stärken bei der Einführung von IT und beim Ausbildungsangebot .....	33
4.2.2. Schwächen und Lücken .....	34
4.2.3. Potenzial für die Integration mit den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft .....	34
4.3. RUMÄNIEN.....	35
4.3.1. Stärken bei der Einführung von IT und Schulungsangeboten.....	35
4.3.2. Schwächen und Lücken .....	35
4.3.3. Potenzial für die Integration mit den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft .....	36
4.4. KROATIEN .....	36
4.4.1. Stärken bei der Einführung von IT und Schulungsangeboten.....	36
4.4.2. Schwächen und Lücken .....	37
4.4.3. Potenzial für die Integration von Prinzipien der Kreislaufwirtschaft.....	37
5. BEST PRACTICES .....	39
5.1. BEWÄHRTE DIGITALE LÖSUNGEN.....	39
IoT & intelligente Logistik (Effizienzebene).....	39
Digitale Tools für CDW (Verwertungsstufe) .....	39
EdTech & Blockchain (Kompetenzebene) .....	40
5.2. LEHREN FÜR DEN STEINSEKTOR .....	40
5.3. DIE STRATEGISCHE ROLLE VON ROCKCHAIN .....	40
Ein risikofreies Testfeld .....	40
Überbrückung der IT-Stein-Kluft .....	40
Vorbereitung auf Regulierung.....	41
6. SCHLUSSFOLGERUNG .....	42
7. QUELLEN.....	43
Quellenangaben zu den Abbildungen .....	50

## 1. EINLEITUNG

Dieser Bericht präsentiert die Ergebnisse von WP3-A2, einer vergleichenden Studie zu Informationstechnologien, die auf internationaler Ebene in der Steinindustrie im Bereich Abfallwirtschaft eingesetzt werden.

Das Hauptziel besteht darin, zu analysieren, wie digitale Tools in Abfallbewirtschaftungsprozesse integriert werden und welche Auswirkungen sie auf die Nachhaltigkeit und Wettbewerbsfähigkeit des Sektors haben. Diese Analyse ist ein wesentlicher Bestandteil des RockChain-Projekts, dessen Ziel es ist, die Abfallbewirtschaftung im Steinsektor durch innovative Lösungen wie Blockchain, das Internet der Dinge (IoT) und Big-Data-Analysen zu transformieren.

Auf der Grundlage von Fallstudien aus Spanien, Deutschland, Kroatien und Rumänien bietet das Dokument einen klaren Überblick über die aktuellen nationalen Ansätze. Es zeigt auch Möglichkeiten für eine Zusammenarbeit auf, die die Grundlage für eine gemeinsame europäische Strategie bilden könnten, um so die bestehende Fragmentierung zu überwinden und einen einheitlichen digitalen Rahmen zu schaffen.

Die erzielten Ergebnisse ermöglichen es, bewährte Verfahren zu definieren und strategische Empfehlungen für Akteure des Sektors, politische Entscheidungsträger und Bildungseinrichtungen zu formulieren, mit dem Ziel, den von der Europäischen Union geförderten dualen digitalen und ökologischen Wandel voranzutreiben.

## 2. ABFALLWIRTSCHAFT UND DIGITALISIERUNG: EIN ÜBERBLICK

Entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Naturstein in Europa, von der Gewinnung und dem Zuschnitt bis zum Polieren und zur Endbearbeitung, fallen in jeder Phase Abfälle an. Traditionell konzentrierte sich die Abfallwirtschaft auf die sichere Lagerung oder Entsorgung von Abfällen. Heute hat sich der Ansatz jedoch geändert: Das Ziel besteht nun darin, diese Materialien nahezu in Echtzeit zu messen, zu klassifizieren und zu verfolgen, um sie als Sekundärrohstoffe wiederzuverwenden, beispielsweise als Ersatz für Zuschlagstoffe oder Bindemittel im Bauwesen.

Diese Veränderung steht im Einklang mit den europäischen Prioritäten in Bezug auf Kreislaufwirtschaft und Datenaustausch. Es gibt immer mehr technische Studien, die diesen neuen Ansatz unterstützen: Wenn die mineralische Zusammensetzung und die Partikelgröße genau kontrolliert werden, können Schlamm und Steinschutt Primärmaterialien in Mörteln, Betonen und anderen Produkten effektiv ersetzen (EEA, 2021; Europäisches Parlament, 2024).

Die Digitalisierung ist das wichtigste Instrument, das diese Transformation ermöglicht. Dank verschiedener integrierter Technologien werden physische Abfälle in nützliche und verwertbare Daten umgewandelt:

- IoT und Sensoren: Diese ermöglichen die kontinuierliche Erfassung von Füllstand, Gewicht und Feuchtigkeit in Silos und Containern.
- Computer Vision und künstliche Intelligenz: Diese verwenden Kameras, um Materialien automatisch zu klassifizieren.
- Drohnen (UAVs): Diese führen volumetrische Scans von Lagerbeständen mittels Photogrammetrie oder LiDAR durch.
- Rückverfolgbarkeit: Physische Chargen werden mithilfe von QR-Codes, RFID-Tags oder bald auch dem Digital Product Passport (DPP) mit digitalen Aufzeichnungen verknüpft.



Abbildung1 : Digitaler Produktpass

Durch die Einführung gemeinsamer Leistungskennzahlen (KPIs) wie Abfall-Produkt-Verhältnis, Energieintensität (kWh/t), CO<sub>2</sub>-Bilanz (CO<sub>2</sub>e/t) und Behandlungskosten (€/t) können Unternehmen ihre Fortschritte messen und ihre Nachhaltigkeitsbemühungen mit Daten untermauern (EEA, 2021; Voukkali et al., 2023).

## 2.1. Abfallwirtschaft in der Steinindustrie

Entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Naturstein fallen drei Hauptarten von Abfällen an: Schneide- und Polierschlamm (eine Mischung aus Wasser und feinen Steinpartikeln), feste Fragmente und Mineralstaub. Diese Abfälle stellen auf europäischer Ebene ein beträchtliches Volumen dar. Im Jahr 2022 beispielsweise entfielen rund 38,4 % der gesamten Abfallmenge in der EU-27 auf Bautätigkeiten, während Bergbau und Steinbrüche weitere 22,7 % beitrugen (Eurostat, 2024). Aus diesem Grund sind Sektoren, die mit der Verarbeitung von Mineralien und Zuschlagstoffen verbunden sind, für die aktuellen Strategien zur Kreislaufwirtschaft und Rückverfolgbarkeit von entscheidender Bedeutung.

Über die sichere Entsorgung hinaus haben zahlreiche Studien gezeigt, dass sowohl Schlamm als auch feste Abfälle als Teilersatzstoffe in Baumaterialien wie Mörtel, Untergrundschichten oder innovativen Bindemitteln verwendet werden können. Damit diese Lösungen jedoch im industriellen Maßstab umgesetzt werden können, ist es unerlässlich, dass bestimmte Eigenschaften (wie mineralische Zusammensetzung,

Korngrößenverteilung und Verarbeitungsbedingungen) innerhalb bestimmter Bereiche bleiben. In dieser Hinsicht ist die Standardisierung von Charakterisierungsmethoden ein wichtiger Schritt, um von erfolgreichen Laborversuchen zur tatsächlichen Markteinführung zu gelangen (Afonso et al., 2023; Gehlot & Shrivastava, 2023).

**Waste generation by economic activities and households, EU, 2022**  
(% share of total waste)

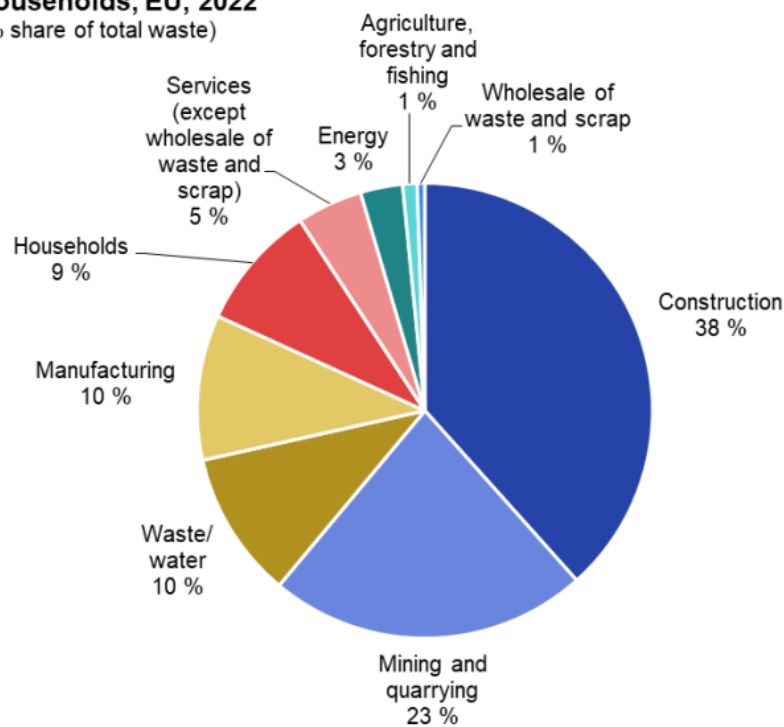


Abbildung2 : Abfallaufkommen durch wirtschaftliche Aktivitäten und Haushalte, 2022

In diesem Zusammenhang erfordert eine moderne Abfallwirtschaft klare Indikatoren und aktuelle Daten zu den verfügbaren Mengen und Strömen. Zu den relevantesten Indikatoren für die Leistungsbewertung gehören:

- Effizienz bei der Materialverwendung: Tonnen Abfall pro Tonne Fertigprodukt.
- Energieintensität: Energieverbrauch pro produzierter Tonne (kWh/t).
- Ökologischer Fußabdruck: Treibhausgasemissionen pro Tonne (CO<sub>2</sub>e/t).
- Kosteneffizienz: Kosten pro behandelter Tonne (€/t).

Durch die ständige Überwachung dieser Indikatoren können Unternehmen Ineffizienzen erkennen und Logistik- und Verwertungsstrategien genauer planen, basierend auf konkreten Daten statt auf Schätzungen (EEA, 2021).



## 2.2. Digitale Transformation in der Abfallwirtschaft

Die Digitalisierung verändert die Art und Weise, wie Abfälle in Verarbeitungsanlagen und Steinbrüchen verwaltet werden, grundlegend. Das traditionelle Modell, das auf reaktiven Maßnahmen basiert – beispielsweise nur dann zu handeln, wenn Container voll sind oder Probleme auftreten –, weicht einem proaktiven Abfallmanagement, das sich an Echtzeitdaten orientiert. Dies liefert aktuelle Bestandsaufnahmen und überprüfbare Daten zur Materialqualität.

Dieser veränderte Ansatz beinhaltet, dass Schlamm und Abfälle nicht mehr als undifferenzierte Abfälle behandelt werden, sondern als verwaltete Materialien mit definierten Eigenschaften: Herkunft, Feuchtigkeitsgehalt, Partikelgröße und Volumen. Kontinuierliche Messungen und Rückverfolgbarkeit ermöglichen eine genauere Planung, reduzieren den Energieverbrauch pro Tonne und optimieren die Logistik. Darüber hinaus bieten gemeinsame Daten-Dashboards Kunden und Behörden einen transparenten und überprüfbaren Überblick über die Leistung (Berg et al., 2020; EEA, 2021).

Im Natursteinsektor basiert diese digitale Transformation auf vier strategischen Säulen:

- Volumenüberwachung von Lagerbeständen: Mit Kameras oder Laserscannern ausgestattete Drohnen führen automatisierte Flüge über Lagerbestände durch. Mithilfe von Techniken wie Photogrammetrie oder LiDAR-Scanning werden die Bilder in 3D-Punktwolken umgewandelt. Bei Verwendung von Bodenpasspunkten (GCPs) oder RTK-GPS ist es möglich, Volumen mit hoher Genauigkeit zu berechnen. Verschiedenen Studien zufolge weisen diese Schätzungen Fehlerquoten auf, die denen von terrestrischen Scannern entsprechen und in der Regel zwischen 1 % und 6 % liegen, was für die tägliche Bestandsverwaltung und Sicherheitsmargen ausreichend ist (Alsayed et al., 2023; Kokamägi et al., 2020; Kovanič et al., 2023).
- Dynamische Routen und intelligente Sammlung: In Containern und Fahrzeugen installierte IoT-Sensoren messen wichtige Variablen wie Füllstand, Gewicht oder Vibrationen und senden die Daten an eine zentrale Plattform. Anstatt festgelegten Routen zu folgen, priorisieren Algorithmen die Sammlung auf der Grundlage der erreichten Kapazität oder der Auslastung pro Fahrt. Dieses Modell, das bereits in Smart Cities getestet wurde, reduziert die Sammelrouten und -zeiten erheblich und kann direkt im Steinbruchkontext angewendet werden (Khan et al., 2024).
- Digitale Kennzeichnung von Fraktionen: Jede Charge von Schlamm oder Schutt wird als „Datenobjekt“ registriert. Physische Identifikatoren wie QR-Codes auf Säcken oder RFID-Tags auf Paletten verknüpfen das Material mit seinem digitalen Zwilling, der Informationen über seine Herkunft (Linie, Schicht), physikalische Eigenschaften (Feuchtigkeitsgehalt, Korngrößenverteilung) und



vorherige Behandlung enthält. Durch die Integration in ERP- oder MES-Systeme können automatische Qualitätskontrollen aktiviert werden, z. B. das Sperren von Chargen, die bestimmte Feuchtigkeitswerte überschreiten, bis sie wiederaufbereitet sind, was auch externe Audits erleichtert (Berg et al., 2020; EEA, 2021).

- Dateninteroperabilität (digitaler Produktpass): Da Gesteinsnebenprodukte auf den Baustoffmarkt gelangen, verlangen Käufer überprüfbare und leicht austauschbare Informationen. Die europäische Initiative für einen digitalen Produktpass (DPP) bietet einen standardisierten Rahmen für den Austausch von Daten zu Zusammensetzung, Prüfung und ökologischem Fußabdruck. Durch die Übernahme dieser Datenmodelle wird die Branche auf künftige regulatorische Anforderungen und Anforderungen im Bereich der umweltorientierten öffentlichen Beschaffung vorbereitet (EPRS, 2024; Wan et al., 2025).

Der Sektor entwickelt sich von einem Abfallmanagementansatz hin zu einem echten Materialmanagement. Selbst mit einer minimalen digitalen Infrastruktur (wie dem Einsatz von Drohnen für die Bestandsaufnahme, Sensoren für die Logistik und interoperablen Chargendaten) sind bereits konkrete Vorteile in Bezug auf Kosten, Energieverbrauch und Emissionen pro Tonne zu erkennen, zusätzlich zu einem größeren Vertrauen in Sekundärmaterialien aus Stein (Alsayed et al., 2023; EEA, 2024; Khan et al., 2024).

## 2.3. Wesentliche Informationstechnologien

Im Natursteinsektor sind Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) keine Ergänzung, sondern vielmehr die operative Grundlage, die es ermöglicht, Abfälle in messbare, rückverfolgbare und sich ständig verbessernde Ströme umzuwandeln.

Diese digitalen Tools arbeiten zusammen, um drei wichtige Ziele zu erreichen:

- Sichtbarkeit: Genau wissen, wie, wo und wann Schlamm und Abfälle anfallen.
- Optimierung: Verbesserung der Logistik- und Behandlungsprozesse, von der Sammlung und Aufbereitung bis zur Wiederverwendung oder zum Verkauf.
- Einhaltung gesetzlicher Vorschriften: Dokumentation der Einhaltung von Umweltvorschriften und Qualitätsanforderungen für Sekundärrohstoffe.

Im Alltag kombiniert das digitale Gesteinsabfallmanagement mehrere Technologien: Abfallverfolgungssysteme, intelligente Container mit Fernüberwachung, künstliche Intelligenz-gestützte Sortierung, mobile Anwendungen für die Berichterstattung vor Ort und Rückverfolgbarkeitslösungen wie RFID-Tags, QR-Codes oder Blockchain-basierte Aufzeichnungen (Berg et al., 2020; EEA, 2021).

### 2.3.1. Abfallverfolgungssysteme und Rückverfolgbarkeit

Abfallverfolgungssysteme nutzen IKT, um den gesamten Lebenszyklus von Steinabfällen zu überwachen: von ihrer Entstehung in Schneide- oder Polierlinien über die Zwischenlagerung und den Transport bis hin zu ihrer Verwertung oder endgültigen Entsorgung.

- Prozessüberwachung: In Steinbrüchen oder Verarbeitungsanlagen beginnt die Verfolgung mit Sensoren und Instrumenten, die an wichtigen Anlagen (wie Sägen, Polierlinien, Filterpressen oder Silos) installiert sind und die anfallenden Mengen sowie relevante Parameter wie Feuchtigkeitsgehalt oder Materialzusammensetzung erfassen. Diese Informationen werden auf digitalen Plattformen zentralisiert, die eine Analyse von Mengen- und Qualitätsmustern ermöglichen und so die Planung auf der Grundlage realer Daten erleichtern.
- Digitale Identifizierung und Transport: Um jede physische Charge mit ihrem digitalen Datensatz zu verknüpfen, werden Identifikatoren wie Barcodes, QR-Codes oder RFID-Tags auf Behältern, Säcken oder Paletten angebracht. Diese Codes werden in jeder Phase des Prozesses (Trocknen, Mischen, Verladen) gescannt, wodurch manuelle Fehler reduziert werden und eine überprüfbare Historie entsteht. Wenn dies zusätzlich mit Geolokalisierungssystemen (GIS und GPS in Lkw) kombiniert wird, kann die Logistikroute überwacht werden, um sicherzustellen, dass die Materialien ihren autorisierten Bestimmungsort erreichen.
- Integration in Managementsysteme: In fortgeschritteneren Konfigurationen sind die Tracking-Module direkt mit Enterprise-Resource-Planning- (ERP) oder Produktionsmanagementsystemen verbunden. Auf diese Weise können Produktionsaufträge an die Abfallströme angepasst, genaue Leistungsindikatoren erstellt, behördliche Berichte automatisiert und die Übereinstimmung der an Dritte gelieferten Nebenprodukte mit den vereinbarten Spezifikationen überprüft werden.



Abbildung3 : Abfallverfolgung

### 2.3.2. Intelligente Container, Fernüberwachung und IoT

Intelligente Container und Silos: Diese Container sehen zwar konventionell aus, sind jedoch mit industriellen Sensoren (wie Ultraschall-Füllstandsmessgeräten, Wägezellen oder Gassensoren) sowie Kommunikationsmodulen ausgestattet. In der Steinindustrie ist diese Technologie für die Verwaltung von Schlamm tanks, Feinsilos und Schuttcontainern von entscheidender Bedeutung. Die Geräte senden Echtzeitdaten zu Füllstand, Gewicht oder anderen Anomalien (wie Leckagen oder Überhitzung) an eine zentrale Plattform. Diese Transparenz ermöglicht es, die Abholung entsprechend der tatsächlichen Kapazität der Tanks zu planen, wodurch unnötige Fahrten mit halb leeren Lkw vermieden und das Risiko gefährlicher Verschüttungen erheblich verringert werden (Berg et al., 2020; Khan et al., 2024).

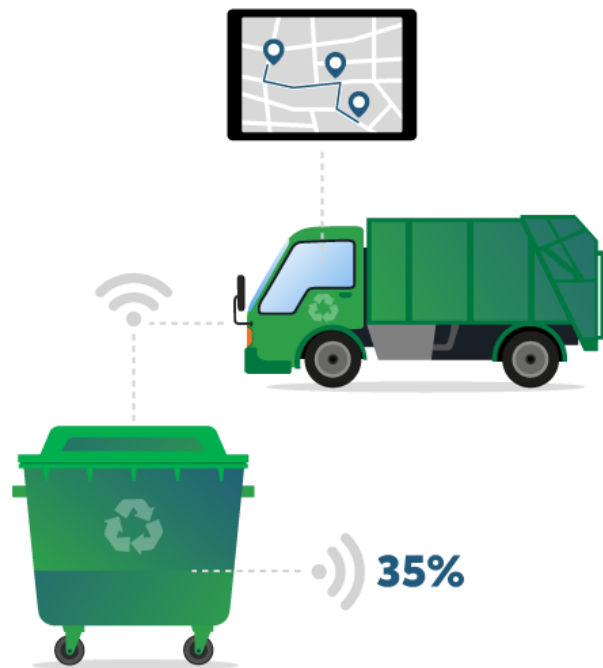


Abbildung4 : Intelligente Container

Industrielle Fernüberwachung: Das Internet der Dinge (IoT) beschränkt sich nicht nur auf die Lagerung. Es kann auch zur Überwachung aktiver Maschinen in der Abfallwirtschaft eingesetzt werden. Wichtige Geräte wie Schlammumpen, Filterpressen oder Förderbänder können mit Sensoren ausgestattet werden, um Vibrationen, Temperatur, Druck oder Energieverbrauch zu messen. Das System gibt Warnmeldungen aus, wenn Betriebsparameter vom Normalwert abweichen oder wenn beispielsweise ein Container zu lange voll bleibt. Dies ermöglicht eine vorausschauende Wartung und verhindert Ausfälle, bevor sie auftreten. In fortgeschritteneren Implementierungen verwenden Außendienstmitarbeiter mobile Anwendungen, die optimierte Routen vorschlagen und die Bestätigung von Aufgaben in Echtzeit ermöglichen, wodurch der Kreislauf zwischen digitaler Planung und physischem Betrieb geschlossen wird (Kabugo et al., 2020; Khan et al., 2024).

### 2.3.3. Künstliche Intelligenz (KI) und automatisierte Sortierung

Künstliche Intelligenz (KI) revolutioniert das Gesteinsabfallmanagement durch zwei Hauptanwendungen: automatische Materialsortierung und Prozessoptimierung auf der Grundlage von Datenanalysen.

Computersicht und automatische Sortierung: Bildverarbeitungssysteme, die in der Regel mit RGB- oder Hyperspektralkameras ausgestattet sind, die auf Förderbändern installiert sind, können unerwünschte Materialien in Echtzeit identifizieren und die Partikelgrößenverteilung analysieren. Wenn das System eine nicht spezifikationsgerechte Fraktion oder Verunreinigung erkennt, aktiviert es ein

mechanisches Tor oder ein Luftabsaugsystem, um diese auszusortieren. Diese Technologie, die in Bau- und Abbruchabfallanlagen (CDW) bereits gut etabliert ist, verbessert die Reinheit der zurückgewonnenen Fraktionen erheblich und reduziert den Bedarf an manueller Sortierung, die oft riskant und ineffizient ist.

Prozessanalyse und -optimierung: Über die Klassifizierung hinaus können KI-Algorithmen historische Systemdaten verarbeiten, um Muster oder Ineffizienzen zu erkennen, die mit dem menschlichen Auge nicht wahrnehmbar wären. Diese Analysefähigkeit ermöglicht es, Prozesse in Echtzeit anzupassen, wodurch die Energieintensität (kWh/t) reduziert und eine stabilere Qualität der Nebenprodukte gewährleistet wird. Um mit der Anwendung dieser Modelle zu beginnen, reichen in der Regel einige Wochen an Aufzeichnungen und ein grundlegender Satz gekennzeichnete Bilder aus, vorausgesetzt, die Betriebsbedingungen sind konstant.

#### 2.3.4. Datenanalyse und Entscheidungsunterstützung

Über künstliche Intelligenz und Automatisierung hinaus ist die Datenanalyse, von deskriptiven Statistiken bis hin zu interaktiven Dashboards, unerlässlich, um Telemetriedaten in konkrete und nützliche Entscheidungen umzuwandeln.

Unterstützung bei operativen Entscheidungen: Die Analyse historischer und Echtzeitdaten zur Abfallerzeugung ermöglicht es Werksleitern, von einem reaktiven zu einem vorausschauenden Management überzugehen. Zu den praktischen Anwendungen gehören die Optimierung von Arbeitsschichten, die richtige Dimensionierung von Zwischenlagerbereichen und die Ermittlung des genauen wirtschaftlichen Break-even-Punkts für die Weiterleitung einer Charge zum Recycling auf der Grundlage des angesammelten Volumens und seiner Qualitätsmerkmale.

Strategische Leistungsüberwachung: Auf strategischer Ebene ermöglichen Analysewerkzeuge die Berechnung von Leistungskennzahlen (KPIs) nach Produktionslinie, Schicht oder Produktfamilie. Zu den relevantesten gehören:

- Materialeffizienz: Tonnen Abfall pro Tonne Produkt.
- Energieintensität: Energieverbrauch pro produzierter Einheit (kWh/t).
- Kreislaufwirtschaft: Prozentsatz der von Deponien umgeleiteten Abfälle.

Diese Indikatoren bieten eine objektive Grundlage für kontinuierliche Verbesserungen und die Einhaltung der von der europäischen Kreislaufwirtschaft festgelegten Berichtsrahmen (Voukkali et al., 2023; EEA, 2024).

Einbindung von Interessengruppen: Die Datenanalyse ist auch ein wirkungsvolles Instrument, um Verhaltensänderungen zu fördern. Die Darstellung visueller Daten zur Abfallreduzierung gegenüber Betreibern – oder sogar lokalen Gemeinschaften – fördert ein verantwortungsbewussteres Materialmanagement. Darüber hinaus dienen diese Daten als konkrete Grundlage für Schulungsmaßnahmen im Zusammenhang mit Initiativen wie RockChain.

### 2.3.5. Mobile Anwendungen und Einbeziehung von Interessengruppen

Mobile Anwendungen sind zu einem wichtigen Instrument geworden, um IKT direkt in die Hände des Betriebspersonals und externer Akteure der Wertschöpfungskette zu geben.

Einsatz vor Ort: In Steinbrüchen und Verarbeitungsanlagen ermöglichen diese Apps den Mitarbeitern, Aufgaben direkt vor Ort auszuführen, ohne zu einem festen Arbeitsplatz zurückkehren zu müssen:

- Meldung von Vorfällen: Sie ermöglichen die sofortige Erfassung von Verschüttungen, Verstopfungen oder Kontaminationsereignissen, einschließlich Fotos und Geolokalisierungsdaten.
- Aufgabenüberprüfung: Sie erleichtern die Echtzeit-Bestätigung von Maßnahmen wie Reinigen, Bewegen oder Inspizieren von Containern.
- Digitale Leitfäden: Sie integrieren Checklisten für die Einhaltung gesetzlicher Vorschriften und Microlearning-Module zum richtigen Umgang mit Gesteinsnebenprodukten.

Verbindung mit der erweiterten Kette: Über die Anlagen hinaus verbessern mobile Anwendungen die Koordination mit Werkstätten, Transportunternehmen und anderen Partnern und replizieren damit Modelle, die bereits in der städtischen Abfallwirtschaft etabliert sind:

- Logistische Koordination: Sie ermöglichen den Echtzeit-Austausch von Abholplänen und Annahmekriterien mit kleinen Werkstätten oder Transportunternehmen.
- Umweltüberwachung: Sie bieten die Möglichkeit, illegale Deponien zu melden und schaffen so einen bidirektionalen Kommunikationskanal, der zur Synchronisierung der Maßnahmen zwischen Produzenten, Transportunternehmen und Recyclingbetrieben beiträgt.

### 2.3.6. Blockchain und integrierte Architekturen

Die Blockchain-Technologie als eine Form der Distributed-Ledger-Technologie (DLT) entspricht einem zentralen Bedarf in der Abfallwirtschaft: einer transparenten und manipulationssicheren Historie über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg.

Unveränderliche digitale Aufzeichnung: Jede Charge Schlamm oder Bauschutt wird digital als sequenzielles Asset dargestellt. In jeder Phase (Erzeugung, Aufbereitung, Verladung oder Annahme) wird ein Ereignis mit einem Zeitstempel und einer kryptografischen Signatur des verantwortlichen Akteurs aufgezeichnet. Sobald diese Daten validiert und in die Aufzeichnung aufgenommen wurden, können sie nicht mehr geändert werden. Diese unveränderliche Historie stärkt das Vertrauen zwischen Geschäftspartnern und Behörden, insbesondere bei grenzüberschreitenden



Transporten, bei denen Rückverfolgbarkeit und rechtliche Verantwortung von entscheidender Bedeutung sind (Lim et al., 2021; Bułkowska et al., 2024).

IoT und Smart Contracts: Pilotstudien haben das Potenzial der Kombination von Blockchain mit IoT-Sensoren durch sogenannte „Smart Waste Contracts“ aufgezeigt. In diesen Fällen führt der Code in der Blockchain selbst automatische Aktionen auf der Grundlage der von Sensoren erfassten Daten aus. Wenn beispielsweise eine Charge am richtigen Bestimmungsort ankommt und Sensoren bestätigen, dass der Feuchtigkeitsgehalt unter dem vereinbarten Grenzwert liegt, kann das System automatisch eine Zahlung freigeben oder eine Abnahmebescheinigung ausstellen. Dies reduziert den Verwaltungsaufwand und vermeidet Zahlungsverzögerungen (Lamichhane, 2017).

Hybride Architektur (On-Chain und Off-Chain): Es ist wichtig zu beachten, dass die Blockchain nicht isoliert funktioniert, sondern als Teil einer umfassenderen Architektur. Damit sie funktionsfähig ist, ist ein hybrider Ansatz erforderlich:

- On-Chain: Es werden nur wesentliche Metadaten (wie Hashes, Zeitstempel oder Transaktionszusammenfassungen) gespeichert, um die Integrität des Systems zu gewährleisten.
- Off-Chain: Größere Dateien (wie vollständige Berichte, detaillierte Zertifikate oder Bilder) werden in traditionellen Datenbanken oder dezentralen Speicherlösungen wie IPFS gespeichert.

Beide Ebenen müssen mit bestehenden Enterprise-Resource-Planning- (ERP) oder Manufacturing-Execution-System- (MES) Systemen verbunden sein, um Datenduplikate zu vermeiden. Dieses pragmatische Design kombiniert die Sicherheit der Blockchain mit der Effizienz traditioneller IKT-Tools (Berg et al., 2020; Lim et al., 2021).

## 2.4. EU-Politikrahmen

Die europäische Politik im Bereich Abfall und Ressourceneffizienz basiert auf einem zentralen Grundsatz: In Branchen mit hohem Materialverbrauch ist Kreislaufwirtschaft ohne Daten nicht möglich. Um zu verstehen, was mit den Materialien in jeder Phase des Prozesses geschieht, ist der Einsatz digitaler Tools zunehmend erforderlich.

Dieser Rahmen basiert auf drei Säulen, die sowohl die Vorschriften als auch die Finanzierungsmöglichkeiten für den Natursteinsektor definieren.

### 2.4.1. Europäischer Green Deal.

Dies ist der Fahrplan der EU zur Erreichung der Klimaneutralität bis 2050. Über die Dekarbonisierung hinaus schlägt er einen „gerechten Übergang“ für ressourcenintensive Sektoren wie das Bauwesen und den Bergbau vor.



Auswirkungen auf den Steinsektor: Die Branche muss sich vom linearen Modell „Gewinnung-Verwendung-Entsorgung“ lösen und zu geschlossenen Kreisläufen übergehen, in denen Schlamm und Abfälle wieder in den Produktionsprozess oder verwandte Märkte zurückgeführt werden.



Abbildung5 : Europäischer Green Deal

Datenanforderungen: Es reicht nicht aus, Fortschritte zu verkünden, sie müssen auch nachgewiesen werden. Unternehmen müssen die Abfallerzeugung, die Verwertungsquoten und den Nutzen für die Umwelt mit überprüfbaren Nachweisen quantifizieren (Europäische Kommission, 2019).

#### 2.4.2. Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft (CEAP, 2020).

Dieser Plan setzt die Ziele des Green Deal durch spezifische Produktvorschriften um. Er fördert die Abfallvermeidung, hochwertiges Recycling und die Beseitigung gefährlicher Stoffe, um eine sichere Wiederverwendung zu ermöglichen.

Wichtigstes Instrument: Einführung einer Ökodesign-Verordnung für nachhaltige Produkte (ESPR) und des digitalen Produktpasses (DPP).

Relevanz für den Sektor: Damit Steinnebenprodukte in die Lieferketten der Bauindustrie aufgenommen werden können, müssen sie über eine „digitale Identität“ verfügen, die ihre Herkunft, Zusammensetzung und Sicherheit bescheinigt und so Vertrauen bei den Käufern schafft (Europäische Kommission, 2020).

#### 2.4.3. Programm „Digitales Europa“ (DIGITAL).

Während der Green Deal die Ziele festlegt, stellt das Programm DIGITAL die Mittel zur Verfügung. Zwischen 2021 und 2027 finanziert es die technologischen Kapazitäten, die zur Umsetzung der Politik erforderlich sind.

Prioritäre Bereiche: Künstliche Intelligenz, Cloud-/Edge-Computing und Datenräume.

Anwendung: Es baut Hindernisse für die Implementierung von IoT-Netzwerken und Rückverfolgbarkeitsplattformen ab, indem es die zur Erreichung der Kreislaufwirtschaftsziele erforderliche Infrastruktur finanziert (Europäische Kommission, 2023).

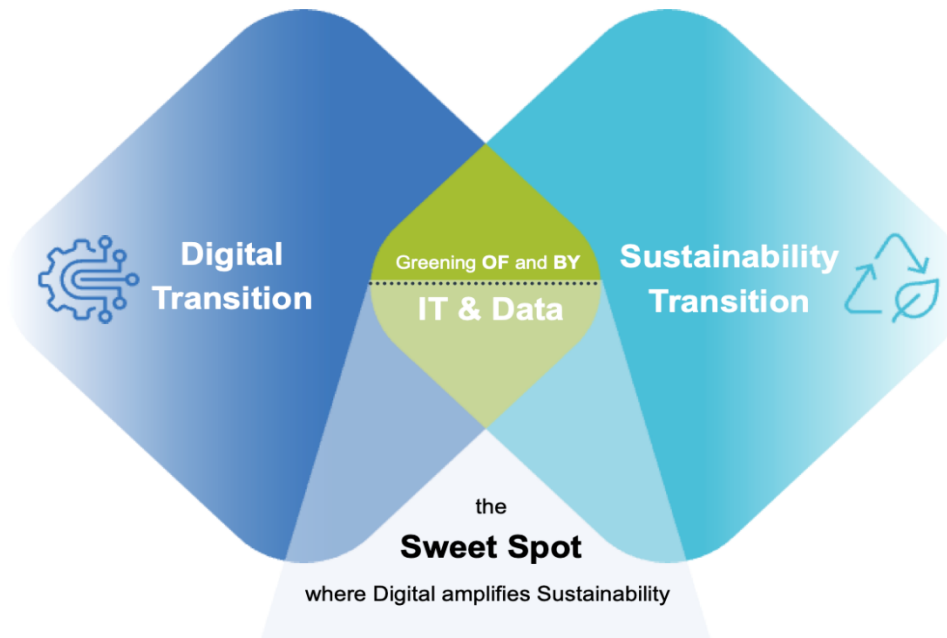


Abbildung6 : Doppelte Transformation

#### 2.4.4. Auswirkungen auf RockChain

Die Kombination dieser Maßnahmen schafft ein günstiges Umfeld für RockChain. Die Übereinstimmung zwischen dem Green Deal (Zirkularitätsziele) und dem DIGITAL-Programm (Technologiefinanzierung) unterstreicht die Stichhaltigkeit des Projektansatzes. Durch die Integration von IoT, KI und Blockchain zur Verwaltung von Steinabfällen entwickelt RockChain nicht nur technisch ausgereifte Lösungen, sondern reagiert auch direkt auf die Priorität der EU für einen datengesteuerten grünen Wandel.

### 3. ABFALLWIRTSCHAFT UND IT-EINFÜHRUNG

Um den Grad der Bereitschaft des Sektors für digitale Kreislaufwirtschaft zu bewerten, enthält dieses Kapitel eine vergleichende Analyse von vier Schlüsselstaaten innerhalb des Projekts: Spanien, Deutschland, Kroatien und Rumänien.

Die Studie gliedert sich in drei grundlegende Fragen, die ein klares Bild der aktuellen Situation vermitteln:

- Operative Realität: Wie wird Abfall derzeit im Natursteinsektor verwaltet?
- Digitale Reife: Wie stark sind digitale Technologien in den täglichen Betriebsabläufen integriert?
- Treiber des Wandels: Welche Projekte, Programme und Strategien beschleunigen diesen Wandel?

Das Ziel geht über eine einfache Diagnose hinaus. Es sollen tragfähige Ansatzpunkte für die Einführung von Rückverfolgbarkeitssystemen entlang der gesamten Wertschöpfungskette, von der Gewinnung bis zur Abfallverwertung, identifiziert werden.

Dieser Ansatz ist auf europäischer Ebene besonders relevant. Das Bauwesen und der Bergbau/Steinbruch sind zusammen für das größte Abfallaufkommen in der EU verantwortlich. Daher stellen Schlamm und Abfälle aus Stein einen strategischen Materialfluss dar, der überwacht, verwertet und in Sekundärrohstoffe umgewandelt werden muss, um die Ziele der Kreislaufwirtschaft zu erreichen (Eurostat, 2024).

In diesem Abschnitt wird detailliert beschrieben, wie sich diese technischen Trends und rechtlichen Rahmenbedingungen in konkrete Chancen und spezifische Ausbildungsbedürfnisse für jedes analysierte Land umsetzen lassen.

#### 3.1. DEUTSCHLAND

Deutschland stellt innerhalb Europas ein Paradox dar: Es verarbeitet enorme Mengen an mineralischen Abfällen (mehr als 200 Millionen Tonnen pro Jahr) mit Verwertungsquoten von über 90 %, stützt sich jedoch nach wie vor stark auf Low-Tech-Downcycling-Verfahren (wie Deponierung). Die Herausforderung besteht nicht mehr in der Abfallsammlung, sondern vielmehr darin, digitale Werkzeuge zu nutzen, um diese in hochwertige Sekundärrohstoffe umzuwandeln.

Die Branche beginnt, sich von einfachen logistischen Lösungen hin zu fortschrittlichen technologischen Lösungen zu bewegen, mit dem Ziel, „Bauschutt“ in datenreiche Vermögenswerte umzuwandeln, die mit fortschrittlichen Fertigungs- und Baunormen kompatibel sind (BMUV, 2023; Kreislaufwirtschaft Bau, 2024).

### 3.1.1. IT-Einführung und Digitalisierungsinitiativen

Im Gegensatz zu anderen Märkten, in denen die Digitalisierung mit Verwaltungsaufgaben beginnt, schreitet die Abfallwirtschaft in Deutschland rasch in Richtung Betriebsautomatisierung und KI-basierter Sortierung voran.

- Von der Logistik zur Prozesssteuerung: Während der Einsatz von GPS und Telemetrie in der C&D-Logistik bereits gang und gäbe ist, liegt der nächste Schritt in automatisierten Sortieranlagen. Die fortschrittlichsten Anlagen integrieren Nahinfrarot-Sensoren (NIR) und hyperspektrale Spektroskopie mit Roboterarmen, um mineralische Fraktionen nicht nur nach Größe, sondern auch nach chemischer Zusammensetzung zu trennen.
- Die Datenlücke: Trotz der Ausgereiftheit dieser Hardware besteht eine große Lücke in der Dateninteroperabilität. Informationen bleiben oft in proprietärer Software „eingeschlossen“. Derzeit wird daran gearbeitet, diese Silos mithilfe cloudbasierter Plattformen aufzubrechen, die Daten von Brechanlagen, Baggern und Lkw aggregieren und Echtzeitindikatoren wie CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Tonne oder Materialreinheit berechnen können (Borchard et al., 2022; Onur, 2024).

### 3.1.2. Relevante Projekte, Programme und Strategien

In Deutschland gibt es mehrere hochrangige Forschungs- und Innovationsprojekte, die sich speziell mit der Schnittstelle zwischen Technologie, Schwerindustrie und Kreislaufwirtschaft befassen. Diese Initiativen gehen weit über die reine Unterstützung von KMU hinaus und konzentrieren sich stattdessen auf die Definition der technischen Standards der Zukunft für diesen Sektor.

- BLOCKWASTE (Blockchain for Waste Management): Dieses Projekt befasst sich direkt mit der „Vertrauenslücke“ bei Abfalldaten. Unter Beteiligung der Fachhochschule Bielefeld untersucht BLOCKWASTE, wie die Blockchain-Technologie manipulationssichere Aufzeichnungen für Abfallströme generieren kann. Es geht über die Theorie hinaus und entwickelt Lehrmittel und Fallstudien zur Verwendung verteilter Hauptbücher, um zu zertifizieren, dass eine bestimmte Abfallcharge gemäß den Vorschriften behandelt wurde, was für hochwertige Steinnebenprodukte von entscheidender Bedeutung ist (BlockWASTE Consortium, 2023).



Co-funded by the  
Erasmus+ Programme  
of the European Union

Abbildung 7 : Blockwaste-Projekt

- SmartRecycling-Up (KI und Robotik): Dieses vom DFKI (Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz) geleitete Projekt ist ein Paradebeispiel für den Transfer fortschrittlicher Technologie in die Abfallwirtschaft. Es entwickelt KI-basierte Steuerungssysteme für Schwermaschinen (Kräne und Bagger), um Sperrmüll und Bauschutt automatisch zu sortieren. Das System nutzt fortschrittliche Computer Vision, um wertvolle Fraktionen aus gemischten Haufen zu „sehen“ und zu trennen, und zeigt damit, wie KI physisch in den Materialkreislauf eingreifen und die Abhängigkeit von gefährlicher manueller Sortierung verringern kann (DFKI, 2025).
- DigiEcoQuarry (deutsches Pilotprojekt – Mammendorf): Der von CSI in der Nähe von Magdeburg betriebene Steinbruch Mammendorf ist ein wichtiger Pilotstandort für dieses Horizon-2020-Projekt. Dort wird das „Innovative Quarry System“ (IQS) in einer realen Hartgesteinsumgebung validiert. Das Pilotprojekt integriert Sensoren, Drohnen und Datenplattformen, um die Gewinnungs- und Verarbeitungskette zu optimieren. Für den Steinsektor zeigt dies live, wie „Abfälle“ (Feinanteile und Abraum) durch datengestützte Spreng- und Verarbeitungsentscheidungen an der Quelle reduziert werden können (DigiEcoQuarry Consortium, 2024).

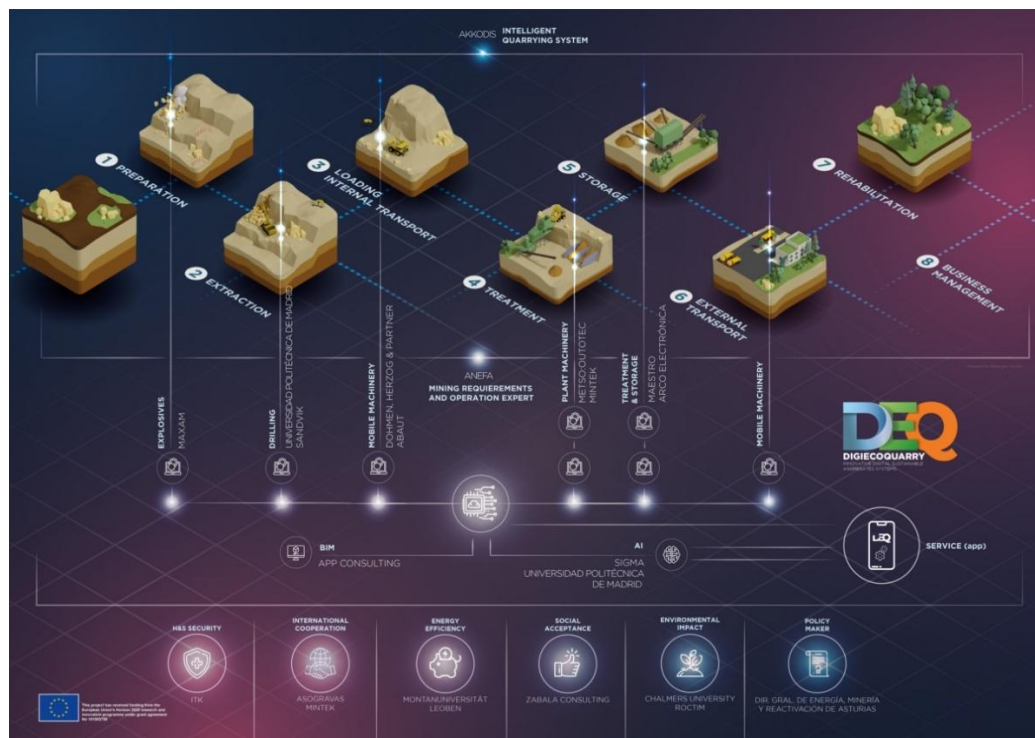


Abbildung8 : DigiEcoQuarry-Projekt

- KaSyTwin (Digital Twins for Infrastructure): Dieses vom Bundesministerium für Digitalisierung und Verkehr (BMDV) geförderte Projekt erstellt mithilfe von KI und Robotik digitale Zwillinge von Kanalisationssystemen. Obwohl es sich auf die Wasserinfrastruktur konzentriert, veranschaulicht es einen entscheidenden



Trend für Steinmaterialien: den Übergang zu „vorausschauender Wartung“ und zum Lebenszyklusmanagement von mineralischen Ressourcen. Es zeigt, wie steinbasierte Infrastruktur als digitale Einheit verwaltet werden kann, indem Daten bereitgestellt werden, die die Nutzungsdauer der Anlage verlängern und ihre Verwertung am Ende ihres Lebenszyklus optimieren (BMDV, 2024).

### 3.1.3. Auswirkungen auf RockChain

Deutschland stellt ein anspruchsvolles, aber schwieriges Umfeld für die Umsetzung von RockChain-Pilotprojekten dar. Das Land hat zwar hohe Betriebsstandards, setzt aber auch strenge Hürden für die Verwendung neuer recycelter Materialien.

- Ein Testfeld für hochwertige Verwertung: Im Gegensatz zu anderen Märkten, die sich auf die einfache Wiederverwendung konzentrieren, bietet Deutschland die Möglichkeit, Schulungsprogramme zu entwickeln, die sich auf qualitätsorientiertes Recycling konzentrieren. Die Schulungsaktivitäten von RockChain können sich darauf konzentrieren, wie digitale Tools wie IoT und Blockchain eingesetzt werden können, um nachzuweisen, dass Steinnebenprodukte die anspruchsvollen chemischen und physikalischen Anforderungen der Bauersatzverordnung (EBV) erfüllen.
- Dateninteroperabilität als Schlüsselkompetenz: Angesichts von Initiativen wie DigiEcoQuarry und SmartRecycling-Up, die in diesem Land aktiv sind, besteht ein klarer Bedarf an Fachkräften, die in der Lage sind, die Welt der Schwerindustrie mit der Datenanalyse zu verbinden. Daher sollte der Ausbildungsplan den Einsatz digitaler Zwillinge und die Integration von Sensordaten in bestehende ERP-Systeme in den Vordergrund stellen und damit über den traditionellen Ansatz der manuellen Berichterstattung hinausgehen.
- Strategische Allianzen: Die starke Präsenz führender Forschungszentren wie dem DFKI und Digitalisierungsinitiativen für KMU wie Mittelstand-Digital bieten ein natürliches Netzwerk für die Verbreitung der Ergebnisse von RockChain. In diesem Zusammenhang würden angehende Techniker nicht nur in Abfallwirtschaft ausgebildet, sondern auch in einer umfassenderen Vision des „industriellen Ressourcenmanagements“ geschult, die im Einklang mit der nationalen Strategie steht, Abfall als standardisierte Produkte für den Markt zu positionieren.

## 3.2. SPANIEN

In vielerlei Hinsicht ist Spanien zu einem „lebenden Labor“ für die Anwendung von Kreislaufwirtschaftsprinzipien im Mineraliensektor geworden. Angetrieben durch die Strategie „España Circular 2030“ und die strengen Anforderungen des Gesetzes 7/2022

über Abfälle und kontaminierte Böden bewegt sich die Industrie weg von der einfachen Abfallentsorgung hin zur Verwertung mithilfe fortschrittlicher Technologien.

Der Schwerpunkt liegt nicht mehr nur auf der Reduzierung von Abfall, sondern auf dem Aufbau eines digitalen Ökosystems, in dem Steinbrüche, Verarbeitungsanlagen und Recyclingzentren miteinander verbunden sind. Diese Veränderung wird durch ein aktives Netzwerk von Technologiezentren (wie Tecnia, IETcc-CSIC, CTM) und Industrieverbänden wie ANEFA unterstützt.

### 3.2.1. IT-Einführung und Digitalisierungsinitiativen

Spanien ist führend bei einigen der fortschrittlichsten Projekte Europas, die auf dem Konzept des „digitalen Steinbruchs“ basieren. Die Digitalisierung ist nicht mehr nur ein Wunschtraum, sondern wird bereits in realen Betriebsumgebungen getestet und angewendet.

- Sensorgesteuerte Produktion: Durch Projekte wie DigiEcoQuarry werden innovative Abbausysteme (IQS) in spanischen Steinbrüchen implementiert. Diese Systeme nutzen IoT-Sensornetzwerke, um Echtzeitdaten über die Gewinnung und Verarbeitung zu erfassen, wodurch das Verhältnis zwischen Produkt und Abfall an der Quelle optimiert werden kann.

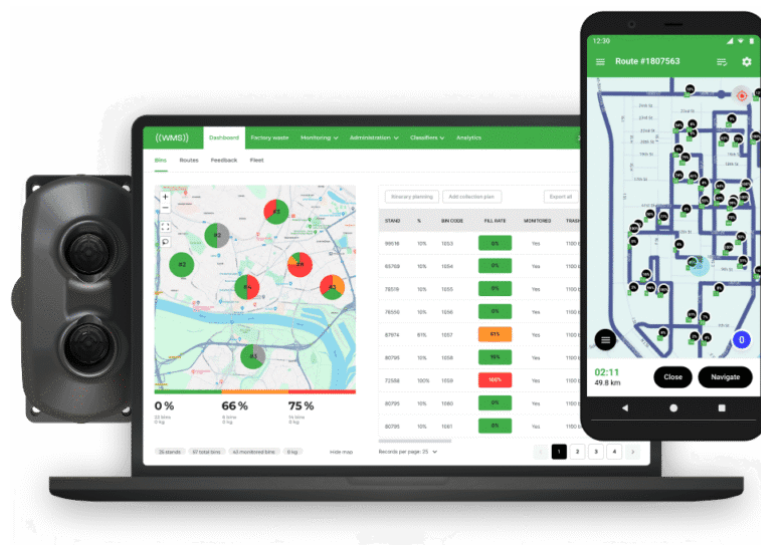


Abbildung9 : Sensoneo

- Massiver Einsatz des IoT: Über die Steinbrüche hinaus zeichnet sich Spanien durch seine digitale Reife in der Abfalllogistik aus. Madrid beispielsweise setzt das größte intelligente Abfallprojekt Europas um, bei dem mehr als 11.000 Sensoren (Sensoneo) installiert wurden, um die Sammelrouten in Echtzeit zu optimieren. Diese Größenordnung zeigt, dass die für die Verfolgung von industriellen Steinabfällen erforderliche IoT-Infrastruktur in diesem Land bereits funktionsfähig und einsatzbereit ist.



- Volumenkontrolle mit Drohnen: Der Einsatz von UAVs zur Verwaltung von Lagerbeständen wird in großen Granit- und Marmorsteinbrüchen zunehmend zur gängigen Praxis. Über die Luftbildfotografie hinaus wird Photogrammetrie eingesetzt, um das genaue Volumen von Abfällen und Nebenprodukten zu berechnen und diese Daten in ERP-Systeme zu integrieren, um eine genaue Bestandsbewertung zu ermöglichen (Himmy et al., 2025).

### 3.2.2. Relevante Projekte, Programme und Strategien

Spanien verfügt über ein sehr aktives Ökosystem, das digitale Technologien mit dem Management von Mineralabfällen verbindet. Spanische Einrichtungen spielen auch eine wichtige Rolle in internationalen Initiativen und stärken den Wissensaustausch auf europäischer Ebene.

- BLOCKWASTE (Bildung und Blockchain): Obwohl sich das Projekt durch seinen Schwerpunkt auf Blockchain auszeichnet, wird seine Anwendung im Steinsektor vom CTM (Zentrum für Marmor-, Stein- und Materialtechnologie) geleitet. Das CTM passt Blockchain-Schulungen für Steinabfallmanager an und stellt sicher, dass KMU in diesem Sektor diese Technologie verstehen und in der Praxis anwenden können.
- ICEBERG (Circular Construction): Dieses Vorzeigeprojekt von H2020 konzentriert sich auf die Rückgewinnung hochwertiger Materialien aus Bau- und Abbruchabfällen (CDW). Mit einer starken spanischen Komponente unter der Leitung von Tecnia und Ihobe validiert ICEBERG Technologien wie die hyperspektrale Bildgebung für die automatisierte Klassifizierung von Beton- und Steinfraktionen, wodurch das Ende der Lebensdauer von Gebäuden mit neuen Sekundärmarktmaterialien verbunden wird (ICEBERG-Konsortium, 2025).



Abbildung10 : Europäisches Projekt Iceberg.

- DigiEcoQuarry und VALREC: Wie in der Branchenübersicht dargelegt, sind diese Projekte für die nationale Innovation von grundlegender Bedeutung. ANEFA leitet DigiEcoQuarry, das sich auf die Digitalisierung der Gewinnungsphase konzentriert, während Sacyr VALREC leitet, das sich auf die Rückverfolgung von recycelten Zuschlagstoffen bis zum Bauprozess konzentriert. Zusammen decken sie den gesamten Zyklus ab, vom Ursprung bis zur Rückführung auf den Markt.
- PERTE Kreislaufwirtschaft: Das „Strategische Projekt für wirtschaftliche Erholung und Transformation“ (PERTE) fungiert als wichtigster finanzieller Treiber. Es

umfasst spezifische Förderlinien für Unternehmen zur Implementierung digitaler Rückverfolgbarkeitssysteme und zur Modernisierung von Abfallbehandlungsanlagen und unterstützt damit direkt die Einführung der genannten Technologien (MITECO, 2024).

### 3.2.3. Auswirkungen auf RockChain

Spanien bietet ein ideales Umfeld für die Umsetzung von RockChain-Pilotprojekten mit folgenden Hauptmerkmalen:

- Zugang zu realen Pilotprojekten: Initiativen wie DigiEcoQuarry, VALREC und ICEBERG bieten spezifische Fallstudien, die in Schulungsaktivitäten integriert werden können.
- Technologische Reife: Der Einsatz von Technologien wie robotergestützter Sortierung und digitalen Zwillingen liefert fortschrittliche Inhalte für Schulungspläne.
- Solide institutionelle Unterstützung: Die Akkreditierungskapazität der IGME-CSIC-Labore ermöglicht es, digitale Kompetenzen mit physikalischen Materialprüfungsstandards zu verknüpfen.

## 3.3. RUMÄNIEN

Rumänien bietet eine einzigartige Gelegenheit für einen „technologischen Sprung“ im europäischen Kontext. Obwohl das Land in der Vergangenheit eine der niedrigsten Recyclingquoten in der EU hatte – wobei die Deponierung nach wie vor die vorherrschende Praxis ist –, durchläuft es derzeit eine rasante Modernisierung seiner Abfallwirtschaftsinfrastruktur, die durch den Nationalen Konjunktur- und Resilienzplan (PNRR) vorangetrieben wird.

Weit davon entfernt, traditionelle Modelle zu kopieren, setzt das Land direkt auf digitale Lösungen. Mit erheblichen Investitionen in „Öko-Inseln“ und intelligente Überwachungssysteme verwandelt die rumänische Regierung ihre Lücke in der Abfallwirtschaft in ein Testfeld für den massenhaften Einsatz des IoT (Europäische Kommission, 2023; Regierung Rumäniens, 2022).

### 3.3.1. IT-Einführung und Digitalisierungsinitiativen

Im Gegensatz zu etablierteren Märkten, in denen Altsysteme Innovationen verlangsamen können, baut Rumänien eine völlig neue Infrastruktur auf, die von Anfang an auf „Intelligenz“ ausgelegt ist.

- Nationale IoT-Einführung (Eco-Islands-Projekt): Im Rahmen des PNRR werden Tausende von „digitalisierten Ökoinseln“ in Städten wie Timișoara, Constanța und Iași installiert. Diese intelligenten Sammelstellen sind mit GSM-Modulen,

Füllstandssensoren und Zugangskontrollsystemen ausgestattet. Dies ist eine landesweite Einführung derselben IoT-Technologie, die zur Verfolgung von Steinabfallcontainern benötigt wird, und bestätigt die technische Machbarkeit dieses Netzwerks (Umweltministerium, 2024).

- Digitale Zwillinge im Bauwesen: Cluj-Napoca, eine Pilotstadt für die NetZeroCities-Mission, ist führend bei der Verwendung digitaler Zwillinge zur Modellierung städtischer Emissionen und Materialflüsse. Diese Initiative kombiniert Satellitendaten (Copernicus) mit lokalen Sensoren, um den ökologischen Fußabdruck der bebauten Umwelt zu verfolgen. Es handelt sich um ein Modell, das leicht skaliert werden kann, um den Lebenszyklus von Baumaterialien und Steinbruchprodukten zu verfolgen (NetZeroCities, 2024).

### 3.3.2. Relevante Projekte, Programme und Strategien

Verschiedene strategische Initiativen legen den Grundstein für den Übergang zu einer digitalen Kreislaufwirtschaft im rumänischen Steinsektor:

- ROCES 2030 (Nationale Strategie für Kreislaufwirtschaft): Diese Strategie identifiziert den Bau- und Bergbausektor eindeutig als vorrangige Bereiche. Sie fordert die Schaffung einer nationalen digitalen Plattform für Abfalldaten, die Papierberichte ersetzen soll. Für Steinunternehmen bedeutet dies eine bevorstehende gesetzliche Verpflichtung: Sie müssen ihre Bestände digitalisieren, wenn sie am Sekundärrohstoffmarkt teilnehmen wollen (rumänische Regierung, 2023).
- Geocycle Romania (industrielle Mitverwertung): Als Teil der Holcim-Gruppe betreibt Geocycle moderne Vorbehandlungsanlagen, die industrielle Mineralabfälle in alternative Ressourcen für Zementöfen umwandeln. Die Werke in Aleșd und Câmpulung wenden Laborkennzeichnungen und strenge Rückverfolgbarkeitsvorschriften an. Diese bestehende industrielle Infrastruktur stellt einen konkreten Weg für die Verwertung von Steinschlamm dar, sofern die erforderlichen digitalen Qualitätsstandards erfüllt sind (Geocycle, 2024).



Abbildung11 : Geocycle-Projekt.

- Innovativer Biomasse-Cluster für grüne Energie: Dieser Cluster mit Sitz in der Region Centru verwaltet Kreislaufwirtschaftsprojekte wie BioRural und SPIRE und verbindet Biomasse- und ländliche Abfallströme mit industriellen Nutzern. Sein Modell der „lokalen Wertschöpfungsketten“ ist direkt auf Steinbruchgebiete anwendbar, wo Steinabfälle vor Ort behandelt werden könnten, wodurch kostspielige und unnötige Transporte vermieden würden (Green Energy Cluster, 2024).

### Auswirkungen auf RockChain

Rumänien bietet ein Umfeld mit hohem Wirkungspotenzial für die Umsetzung des RockChain-Lehrplans, das durch eine starke Nachfrage nach digitalen Kompetenzen zur Begleitung der neuen Infrastruktur gekennzeichnet ist.

- Vom Papier zur Cloud: Der unmittelbarste Schulungsbedarf besteht darin, KMU beim Übergang von manuellen Aufzeichnungen zu den digitalen Standards zu unterstützen, die von der neuen nationalen Plattform gefordert werden. RockChain kann die praktischen Anleitungen bieten, die erforderlich sind, um diesen unvermeidlichen Wandel zu erleichtern.
- Nutzung der neuen Infrastruktur: Mit der Ausweitung intelligenter Öko-Inseln ergibt sich eine einzigartige Gelegenheit, Techniker auszubilden, die in der Lage sind, IoT-Anlagen für die Abfallwirtschaft zu bedienen und zu warten. Diese Kompetenzen sind sowohl im städtischen als auch im industriellen Kontext anwendbar, beispielsweise bei der Verwaltung von Schlamm tanks in Steinbrüchen.
- Regionale Ausbildungszentren: Cluster wie Green Energy oder das innovative Ökosystem in Cluj bieten Netzwerke, die für die Verbreitung des Ausbildungsprogramms bereit sind und sicherstellen, dass die digitalen

Kompetenzen die Fachleute erreichen, die das neue Abfallwirtschaftssystem des Landes betreiben werden.



Abbildung12 : Interreg Kroatien-Bosnien-Montenegro

### 3.4. KROATIEN

Kroatien befindet sich in einer kritischen Phase des Wandels in der Abfallwirtschaft, die durch den dringenden Wiederaufbau nach den jüngsten Erdbeben noch beschleunigt wird. Obwohl das Gesamtabfallaufkommen im Vergleich zu den großen EU-Ländern moderat ist, machen Mineral- und Bauabfälle den größten Teil des nationalen Profils aus.

Der Sektor befindet sich im Übergang von einer starken Abhängigkeit von Deponien zu einem strategischen Ansatz, der sich auf die Verwertung konzentriert. Der Nationale Abfallwirtschaftsplan 2023–2028 legt den Schwerpunkt auf die Modernisierung der Infrastruktur und die Einführung digitaler Verfolgungssysteme mit dem Ziel, große Mengen an Bauschutt in nützliche Ressourcen umzuwandeln, anstatt sie als Umweltbelastung zu betrachten (Amtsblatt, 2023).

#### 3.4.1. IT-Einführung und Digitalisierungsinitiativen

Die Digitalisierung im kroatischen Stein- und Bausektor etabliert sich als wichtiges Instrument zur Verbesserung der Rückverfolgbarkeit und Kontrolle großer Materialmengen.

- Digitale Aufzeichnungen von Bauschutt: Auf Empfehlung der Weltbank entwickelt das Land digitale Aufzeichnungssysteme für Bau- und Abbruchabfälle (CDW). Diese werden Papieraufzeichnungen durch obligatorische digitale



Berichte über Abbruchstellen ersetzen und so eine Rückverfolgbarkeit schaffen, die leicht auf Abfälle aus Steinbrüchen anwendbar ist (Weltbank, 2023).

- Strategie für intelligente Spezialisierung (S3): Die nationale S3-Strategie (2021–2027) umfasst „Nachhaltige Umwelt“ als Priorität und fördert Technologien wie BIM (Building Information Modelling) und modulares Bauen. Dieser Ansatz ermöglicht es, Materialien – einschließlich Stein – bereits in der Entwurfsphase digital zu kennzeichnen, was ihre Rückgewinnung in späteren Phasen erleichtert.
- Pilotprojekte in der Abfalllogistik: Im Rahmen grenzüberschreitender Projekte testen mehrere Gemeinden Recyclinghöfe, die mit IoT-Sensoren ausgestattet sind. Diese Pilotprojekte ermöglichen eine Echtzeitüberwachung der Abfallzu- und -abflüsse und liefern einen ersten Proof of Concept für das digitale Materialmanagement in der Region.

### 3.4.2. Relevante Projekte, Programme und Strategien

Das kroatische Ökosystem ist geprägt von aktiver internationaler Zusammenarbeit und der Entwicklung strategischer Projekte mit einer starken technologischen Komponente:

- Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft in CDW: Dieser gemeinsam mit der Weltbank entwickelte Plan legt den Grundstein für die Zukunft des Sektors. Er schlägt ausdrücklich die Digitalisierung von Abfalldaten vor, um illegale Deponien zu verhindern und den Markt für Sekundärzuschlagstoffe zu fördern. Für Unternehmen der Steinbranche macht dieser Fahrplan deutlich, dass die digitale Compliance bald eine Marktanforderung sein wird (Weltbank, 2022/2023).
- CircleAware (Interreg-Projekt): Dieses Projekt verbindet Kroatien mit Bosnien und Montenegro und testet innovative Lösungen zur Abfalltrennung. In der Stadt Trilj wird eine digitale Lösung zur Überwachung der Abfallmengen in Recyclinghöfen implementiert. Obwohl es sich auf kommunale und kleine Abfälle konzentriert, lässt sich das Modell, das physische Trennung mit digitaler Verfolgung verbindet, leicht auf industrielle Steinabfälle übertragen (Interreg IPA, 2024).
- CrossWaste (Interreg-Projekt): Unter der Leitung von EKO-DUNAV d.o.o. konzentriert sich dieses Projekt speziell auf die Infrastruktur für Bauabfälle, den häufigsten Abfallstrom in der Region. Im Gegensatz zu anderen eher theoretischen Ansätzen entwickelt CrossWaste konkrete Pilotprojekte, bei denen Abfall als nachhaltiges Material in lokalen Straßenbauarbeiten verwendet wird, und zeigt so, wie Schutt in nützliche Infrastruktur umgewandelt und illegale Müllablagerungen durch Verwertung bekämpft werden können (Interreg IPA, 2024).
- KODECO net zero (Holcim Kroatien): Dies ist das erste große Industrieprojekt in Kroatien, das vom EU-Innovationsfonds kofinanziert wird. Obwohl sein Hauptziel die Kohlenstoffabscheidung bei der Zementherstellung ist, integriert es

Prinzipien der Kreislaufwirtschaft und des groß angelegten digitalen Managements. Es setzt einen neuen „Industrie 4.0“-Standard für die Mineralverarbeitung in der Region (Europäische Kommission/Holcim, 2024).



Abbildung13 : KodeCO-Projekt.

### Auswirkungen für RockChain

Kroatien bietet ein aktives Umfeld mit hoher Nachfrage nach RockChain-Schulungslösungen, vor dem Hintergrund von Wiederaufbau und Digitalisierung:

- Wiederaufbau als Chance: Die starke Nachfrage nach Materialien aus dem Wiederaufbau bietet eine ideale Plattform, um Fachleute darin zu schulen, wie sie Steinabfälle in zertifizierte Produkte für öffentliche Bauvorhaben umwandeln können.
- Digitale Compliance-Schulungen: Mit der Einführung digitaler Bauabfallregister besteht ein klarer Bedarf an praktischen Schulungen. RockChain kann diese Lücke schließen, indem es Inhalte zur effizienten Nutzung digitaler Berichterstattungsinstrumente anbietet.
- Erweiterte regionale Reichweite: Dank Projekten wie CircleAware und CrossWaste können die für Kroatien entwickelten Inhalte leicht auf Nachbarländer außerhalb der EU wie Bosnien und Montenegro ausgeweitet werden, wodurch sich die Wirkung von RockChain auf dem Balkan vervielfacht.



## 4. ERGEBNISANALYSE

Der Zweck dieses Kapitels ist es, den Grad der Übereinstimmung zwischen dem aktuellen Bildungsangebot in den vier Partnerländern des Projekts (Spanien, Rumänien, Kroatien und Deutschland) und den neuen technologischen Anforderungen des Natursteinsektors zu bewerten.

Es handelt sich um eine strategische Lückenanalyse, bei der zwei verschiedene Datensätze verglichen werden, die im Laufe des Projekts erhoben wurden:

- Nachfrage (was die Industrie will): Basierend auf den Ergebnissen in Kapitel 3 wird die „operative Realität“ moderner Steinbrüche und Verarbeitungsbetriebe definiert. Es gibt einen klaren Übergang zu einem datengesteuerten Management, das spezifische Fähigkeiten in den Bereichen IoT-Sensorik (für Schlamm und Feinanteile), automatische Klassifizierung mit KI, volumetrische Überwachung mit Drohnen (UAVs) und Rückverfolgbarkeitssysteme (Blockchain oder Digital Product Passport – DPP) erfordert.
- Das Angebot (was das Bildungssystem bietet): Auf der Grundlage der in WP2 durchgeführten Bestandsaufnahme werden aktuelle Programme in der Hochschulbildung und der beruflichen Aus- und Weiterbildung (VET) analysiert, wobei ein besonderer Schwerpunkt auf den Bereichen Umwelttechnik, Abfallwirtschaft, Informationstechnologie und Blockchain liegt.

Der Schwerpunkt liegt auf der Bewertung der Einsatzbereitschaft. Mit anderen Worten: Wenn ein Unternehmen der Branche heute beschließt, seine Abfallströme zu digitalisieren, gibt es dann auf dem lokalen Arbeitsmarkt Fachkräfte mit den erforderlichen hybriden Kompetenzen, um diesen Wandel zu unterstützen?

Die Analyse versucht zu beantworten, ob die aktuellen Ausbildungsprofile noch generalistisch sind (z. B. reine IKT-Entwickler oder Geologen ohne digitale Kompetenzen) oder ob es bereits interdisziplinäre Wege gibt, die digitale Werkzeuge mit der industriellen Materialwirtschaft verbinden.

In den vier untersuchten Ländern lässt sich ein gemeinsames strukturelles Muster beobachten:

- Technologische Expansion: Das Angebot an Kursen zu Blockchain, Datenanalyse und Industrie 4.0 wächst rasant.
- Sektorale Stärke: Traditionelle Studiengänge in den Bereichen Bergbau, Umweltwissenschaften und Abfallwirtschaft sind nach wie vor stark und gut etabliert.
- Integrationslücke: Zwischen den beiden Bereichen besteht nach wie vor eine erhebliche Kluft. Nur wenige Lehrpläne schaffen es, diese beiden Dimensionen

zu verbinden, beispielsweise durch die Verwendung von industriellen Mineralabfällen als Fallstudie für den Unterricht digitaler Technologien.

Die folgenden Abschnitte enthalten eine detaillierte Analyse nach Ländern, in der spezifische Stärken hervorgehoben, kritische Qualifikationslücken identifiziert und konkrete Möglichkeiten für Innovationen in den Ausbildungslehrplänen vorgeschlagen werden.

## 4.1. DEUTSCHLAND

Deutschland hat sich mit außergewöhnlich hohen Verwertungsquoten (über 90 % für mineralische Bauabfälle) und einem strengen Rechtsrahmen auf der Grundlage der Ersatzbaustoffverordnung (EBV) als ausgereifter Maßstab innerhalb der europäischen Landschaft etabliert. Der Sektor steht jedoch vor einem Paradoxon: Obwohl die physische Recycling-Infrastruktur hoch entwickelt ist, ist die Digitalisierung der „letzten Meile“, d. h. die Verbindung zwischen operativen Abfallströmen und Echtzeitdaten, nach wie vor uneinheitlich.

### Stärken bei der Einführung von IT und Ausbildungsangeboten

Deutschland verbindet eine starke Datenkultur mit hochtechnologischer Industriekapazität und bietet damit eine solide Grundlage für den Übergang zu einer digitalen Kreislaufwirtschaft.

- Etablierte Datenkultur: Im Gegensatz zu anderen Märkten mit begrenzten Informationen verfügt Deutschland dank der Initiative „Kreislaufwirtschaft Bau“ seit Mitte der 1990er Jahre über detaillierte Berichte zu mineralischen Stoffströmen. Diese empirische Grundlage – Statistiken, Massenbilanzen, Strömungskarten – kann direkt in Simulationen und angewandten digitalen Schulungen verwendet werden.
- Tradition der technischen Ausbildung und dualen Berufsausbildung: Das deutsche duale System und seine technischen Hochschulen bieten eine erstklassige Ausbildung in Verfahrenstechnik und Automatisierung. Der Ansatz ist stark technisch ausgerichtet, sodass die Absolventen sowohl industrielle Prozesse als auch die Funktionsweise von Maschinen verstehen.
- Hochrangige operative Projekte: Die Existenz fortschrittlicher Initiativen zeigt, dass die Technologie bereits in Betrieb ist und sich nicht nur in der Experimentierphase befindet.
  - o SmartRecycling-Up: KI-basierte Robotersortierprojekte bieten reale Anwendungsfälle für die Vermittlung kognitiver Automatisierung im Bereich Abfall.
  - o DigiEcoQuarry: Der Pilotstandort in Mammendorf stellt eine vollständig sensorisierte Umgebung dar, die sich ideal als „digitales Klassenzimmer“

für die Vermittlung von IoT-Anwendungen in Gewinnungsprozessen eignet.

### Schwächen und Lücken

Das größte Hindernis in Deutschland ist nicht ein Mangel an Technologie, sondern vielmehr die Diskrepanz zwischen groß angelegten Strategien und ihrer Umsetzung in der täglichen Praxis.

- **Umsetzungslücke:** Eine Umfrage unter 130 Unternehmen der Branche zeigt, dass die Digitalisierung zwar als strategische Priorität angesehen wird, ihre praktische Anwendung jedoch tendenziell auf der Verwaltungsebene (z. B. Rechnungsstellung oder Kundenportale) verbleibt, ohne operative Prozesse wie die Echtzeit-Schlammüberwachung oder die vorausschauende Wartung zu erreichen.
- **Curricular Silo:** Es besteht weiterhin eine starre Trennung zwischen den Disziplinen. Blockchain-Kurse sind in der Regel auf den Finanz- oder Logistiksektor ausgerichtet, während sich die Umwelttechnik auf physikalisch-chemische Eigenschaften konzentriert. Es mangelt an interdisziplinären Modulen, die Technologien wie DLT oder KI auf die Zertifizierung von mineralischen Abfällen anwenden, was zu einer Lücke bei den Schlüsselkompetenzen für zukünftige digitale Produktpässe führt.
- **Hindernisse für KMU:** Obwohl Institute wie Fraunhofer und DFKI bei der technologischen Entwicklung führend sind, fehlt vielen kleinen Steinbrüchen und Recyclinganlagen das technische Know-how, um diese Innovationen in profitable und anwendbare Lösungen umzusetzen.

### Potenzial für die Integration in die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft

Deutschland bietet den idealen Rahmen, um Schulungsprogramme mit einem „Qualität-zuerst“-Ansatz zu testen, der über die einfache Abfallvermeidung hinausgeht und sich auf die Zertifizierung hochwertiger Produkte konzentriert.

- **Einhaltung gesetzlicher Vorschriften als berufliche Kompetenz:** Da die EBV hohe Qualitätsstandards für Sekundärrohstoffe festlegt, kann RockChain spezielle Schulungen zum Einsatz digitaler Tools zur Nachweisführung anbieten. Beispielsweise kann vermittelt werden, wie Blockchain nicht für Kryptowährungen, sondern zur Erstellung eines unveränderlichen Prüfpfads genutzt werden kann, der bestätigt, dass eine Charge recycelter Zuschlagstoffe den gesetzlichen Anforderungen entspricht.
- **Nutzung realer Fälle:** Schulungsprogramme können direkt auf Daten und Szenarien aus Projekten wie *SmartRecycling-Up* oder *DigiEcoQuarry* aufbauen. Anstatt sich ausschließlich auf Theorie zu stützen, können die Teilnehmer mit realen Sensordaten eines Sortierroboters oder eines Steinbruchbrechers arbeiten, um die Materialrückgewinnung zu analysieren und zu optimieren.

- Hybride Berufsprofile: Die nationale Strategie für die Kreislaufwirtschaft betont ausdrücklich den Bedarf an „digitalen Wegbereitern“. Dies schafft eine institutionelle Grundlage für die Ausbildung von Technikern, die sowohl mit den geotechnischen Aspekten von Steinnebenprodukten als auch mit den Datenarchitekturen umgehen können, die für zukünftige digitale Produktpässe erforderlich sind.

## 4.2. SPANIEN

Spanien fungiert als „lebendes Labor“ für den Steinsektor. Mit einem Rechtsrahmen, der die Deponierung streng bestraft (Gesetz 7/2022) und Anreize für Kreislaufwirtschaft schafft (PERTE Circular Economy), ist der Modernisierungsdruck hoch. Das Land beherbergt einige der fortschrittlichsten Pilotprojekte Europas, aber der Arbeitsmarkt hat mit dieser technologischen Dynamik noch nicht ganz Schritt gehalten.

### 4.2.1. Stärken bei der Einführung von IT und beim Ausbildungsangebot

Spanien verfügt über die für einen digitalen Wandel erforderlichen „Rohstoffe“, sowohl in Bezug auf industrielle Pilotprojekte als auch auf eine solide Bildungsbasis.

Fortgeschrittene industrielle Pilotprojekte: Der Sektor fängt nicht bei Null an. Initiativen wie *DigiEcoQuarry* (koordiniert von ANEFA) und *VALREC* (unter der Leitung von Sacyr) validieren bereits komplexe digitale Architekturen in realen Betriebsumgebungen. Spanische Steinbrüche testen cyber-physische Systeme (CPS) und Echtzeit-Datenplattformen für Zuschlagstoffe. Darüber hinaus zeigt der Einsatz groß angelegter IoT-Systeme in der Stadtlogistik (z. B. Sensoneo in Madrid), dass das Land bereit ist, umfangreiche Sensornetzwerke zu unterstützen.

Etablierte Bildungsbereiche: Das spanische Hochschulsystem bietet solide, wenn auch oft isolierte Ausbildungsgänge:

- Ingenieurwesen und Umwelt: Starke Studiengänge in Geologie, Bergbau und Umweltwissenschaften, die sich mit Vorschriften zur Kreislaufwirtschaft und Abfallverwertung befassen.
- Industrie 4.0: Ein wachsendes Angebot an Hochschul- und Berufsbildungsprogrammen mit den Schwerpunkten IoT, Big Data und industrielle Automatisierung.
- Blockchain und IT: Ein wachsendes Angebot an Distributed-Ledger-Technologien, oft angetrieben durch dynamische Technologiezentren.

#### 4.2.2. Schwächen und Lücken

Die größte Schwäche Spaniens ist die Fragmentierung. Zwar sind die einzelnen Kompetenzen vorhanden, doch sind sie selten so integriert, dass sie für die Steinindustrie nach dem Abschluss sofort von Nutzen sind.

- Die „Generalistenfalle“: Lehrpläne zum Thema Abfallwirtschaft konzentrieren sich in der Regel auf Siedlungsabfälle oder allgemeine Industrieabwässer, ohne auf die spezifischen Anforderungen an die Handhabung und Rheologie von Steinschlamm einzugehen (z. B. Feuchtigkeitskontrolle, Filterpressenbetrieb).
- Kontextfreie digitale Ausbildung: Umgekehrt sind Blockchain- und IoT-Kurse oft auf Fintech, Logistik oder allgemeine Fertigung ausgerichtet. Die Studierenden lernen vielleicht, wie man Smart Contracts für Kryptowährungen programmiert, aber nicht, wie man eine Charge recycelter Zuschlagstoffe zertifiziert. Es mangelt an angewandten digitalen Kompetenzen für die Schwerindustrie.
- Qualifikationslücke bei KMU: Während große Technologiezentren (z. B. Tecnalia, IETcc-CSIC) über erstklassiges Fachwissen verfügen, gelangt dieses Wissen nicht schnell genug zu den KMU. Kleinen Steinbrüchen fehlt es an Personal, das in der Lage ist, die Konzepte des „digitalen Steinbruchs“ in den täglichen Betrieb umzusetzen, was zu einem Engpass bei der Einführung neuer Technologien führt.

#### 4.2.3. Potenzial für die Integration mit den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft

Spanien ist aufgrund seines starken institutionellen und projektbasierten Ökosystems in einer einzigartigen Position, um diese Lücken zu schließen.

Nutzung anerkannter Wissenschaft: Das Natursteinlabor am IGME-CSIC bietet standardisierte Rahmenbedingungen für petrographische und mechanische Tests. RockChain-Lehrpläne können diese Protokolle direkt integrieren und den Studierenden beibringen, wie sie einen Laborbericht in einen Blockchain-Eintrag oder einen digitalen Produktpass „digitalisieren“ können.

Projektbasiertes Lernen (PBL): Die Existenz aktiver Pilotstandorte wie *DigiEcoQuarry* und *ICEBERG* bietet eine einmalige Gelegenheit. Lehrpläne können auf der Grundlage realer Datensätze – wie Sensorwerten aus einer Brechanlage oder hyperspektralen Bildern eines Sortierroboters – gestaltet werden, sodass die Studierenden anhand realer industrieller Herausforderungen statt anhand theoretischer Modelle lernen.

Modulare Mikro-Zertifikate: Angesichts der in der PERTE-Initiative zur Kreislaufwirtschaft dargelegten Dringlichkeit gibt es einen klaren Markt für kurze, zielgerichtete Kurse. Ein Modul mit dem Titel „Digitale Rückverfolgbarkeit für mineralische Nebenprodukte“ hätte einen unmittelbaren Wert für Fachleute, die neue Vorschriften zur Rückverfolgbarkeit von Abfällen und Steuern einhalten müssen.

### 4.3. RUMÄNIEN

Rumänien stellt ein „SprungszENARIO“ dar. Das Land, das in der Vergangenheit auf Deponien angewiesen war, umgeht nun Zwischenschritte und investiert direkt in eine fortschrittliche digitale Infrastruktur (Öko-Inseln), angetrieben durch seinen Nationalen Konjunktur- und Resilienzplan (PNRR). Die Herausforderung liegt nicht in der Hardware, sondern im Mangel an „menschlicher Software“, die für deren Betrieb erforderlich ist.

#### 4.3.1. Stärken bei der Einführung von IT und Schulungsangeboten

Der wichtigste Treiber in Rumänien sind massive öffentliche Investitionen in die digitale Abfallinfrastruktur, die einen unmittelbaren Bedarf an neuen Kompetenzen schaffen.

- Investitionsboom (hardwaregesteuert): Die landesweite Einführung digitalisierter Ökoinseln und intelligenter Sammelsysteme schafft einen großen Bedarf an technischen Fähigkeiten für den Betrieb und die Wartung dieser Systeme. Die Technologie wird schneller eingeführt, als die Arbeitskräfte ausgebildet werden können.
- Strategische Ausrichtung: Die Strategie ROCES 2030 und das Pilotprojekt „Digital Twin“ in Cluj-Napoca spiegeln das starke politische Engagement für datengesteuerte Kreislaufwirtschaft wider. Die nationale Politik fordert ausdrücklich eine digitale Abfalldatenplattform.
- Industrielle Abnahme: Mit Akteuren wie Geocycle steht ein hochtechnologischer Industriepartner zur Verfügung, der in der Lage ist, Abfälle mitzuverarbeiten. Seine fortschrittlichen Vorbehandlungsanlagen bieten einen konkreten Markt für Steinnebenprodukte – sofern hochwertige digitale Daten zur Verfügung gestellt werden.

#### 4.3.2. Schwächen und Lücken

Die größte Herausforderung in Rumänien ist die Umsetzungslücke, eine Diskrepanz zwischen neu erworbener Infrastruktur und den aktuellen Abläufen vor Ort.

- Lücke zwischen Papier und Cloud: Viele KMU verlassen sich nach wie vor auf manuelle Logbücher. Der Übergang zu den von der ROCES-Strategie geforderten cloudbasierten Plattformen erfordert einen enormen Weiterbildungsaufwand, der in den aktuellen Lehrplänen noch nicht berücksichtigt ist.
- Schwerpunkt der Lehrpläne: Universitätsprogramme im Bereich Abfallwirtschaft konzentrieren sich häufig auf kommunale Abfallströme oder allgemeine Umweltschutzmaßnahmen. Sie befassen sich selten mit den Besonderheiten mineralischer Industrieabfälle oder dem Potenzial der digitalen Verfolgung von Sekundärrohstoffen.



- **Techniker-Mangel:** Es mangelt an Technikern, die für die Schnittstelle zwischen physischen Abfällen und digitalen Systemen ausgebildet sind. Absolventen wissen vielleicht, wie man eine Deponie entwirft, aber nicht, wie man einen intelligenten Sensor kalibriert oder ein digitales Abfallregister verwaltet.

#### 4.3.3. Potenzial für die Integration mit den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft

RockChain kann als „Software“-Schicht fungieren, die die neue Hardware ermöglicht, indem es die Schulungsinhalte anbietet, die erforderlich sind, um PNRR-Investitionen rentabel zu machen.

- **Betriebliche Schulung:** Entwicklung von Lehrplänen, die sich speziell auf den Betrieb und die Wartung der neuen IoT-Anlagen (Öko-Inseln, Sensoren) konzentrieren, die landesweit eingesetzt werden. Die für die Verwaltung eines intelligenten kommunalen Abfallbehälters erforderlichen Fähigkeiten sind nahezu identisch mit denen, die für intelligente Abfallcontainer in Steinbrüchen erforderlich sind.
- **Einhaltung digitaler Berichtspflichten:** Die Schulungen sollten KMU dabei unterstützen, von Papierprotokollen auf die neuen nationalen digitalen Berichtssysteme umzustellen. Diese Compliance-Kenntnisse bieten einen unmittelbaren Mehrwert für die Beschäftigung.
- **Clusterbasiertes Lernen:** Nutzung von Netzwerken wie dem Green Energy Innovative Biomass Cluster zur Verbreitung von Schulungen zur digitalen Kreislaufwirtschaft unter regionalen Betreibern. Dieses Modell verbindet ländliche Steinbrüche mit lokalen industriellen Verwertungswegen und schafft so geschlossene Kreisläufe, die Transportemissionen und -kosten reduzieren.

## 4.4. KROATIEN

Kroatien befindet sich in einer einzigartigen Übergangsphase, die durch den Wiederaufbau nach dem Erdbeben vorangetrieben wird. Diese enorme technische Herausforderung hat Bau- und Mineralabfälle zu einer strategischen Priorität gemacht und den Bedarf an digitaler Verfolgung und Rückgewinnung beschleunigt. Der Sektor bewegt sich weg von der Deponierung hin zu einem Szenario, in dem recycelte Zuschlagstoffe für den Wiederaufbau dringend benötigt werden.

#### 4.4.1. Stärken bei der Einführung von IT und Schulungsangeboten

Die größte Stärke Kroatiens ist die Konvergenz von Marktnachfrage und hochkarätigen Industrieinvestitionen.



- Wiederaufbau als Treiber: Die boomende Nachfrage nach Baumaterialien schafft einen subventionierten, garantierten Markt für hochwertige recycelte Zuschlagstoffe. Dies wird durch den Aktionsplan der Weltbank für die Kreislaufwirtschaft unterstützt, der einen Fahrplan für die Modernisierung des Sektors vorgibt.
- Strategische Industrieprojekte: Kroatien ist Gastgeber für hochmoderne Industrie-4.0-Projekte. Das KODECO-Netto-Null-Projekt (Kohlenstoffabscheidung und -speicherung) von Holcim stellt eine massive Investition in die Dekarbonisierung der Mineralverarbeitung dar und beweist, dass die lokale Industrie für Hightech-Lösungen bereit ist. Darüber hinaus testet das CrossWaste-Projekt den Einsatz von recycelten Bauabfällen im Straßenbau und demonstriert damit praktische, skalierbare Anwendungen.
- Politische Ausrichtung: Der Nationale Abfallwirtschaftsplan (2023–2028) und die Strategie für intelligente Spezialisierung (S3) fördern ausdrücklich die Verwendung digitaler Register und modularer Bauweisen und schaffen so ein günstiges regulatorisches Umfeld für digitale Kompetenzen.

#### 4.4.2. Schwächen und Lücken

Trotz der hochrangigen Projekte gibt es auf operativer Ebene erhebliche Compliance-Lücken.

- Digitale Compliance-Lücke: Da nationale digitale Register für Bau- und Abbruchabfälle zur Verhinderung illegaler Deponien vorgeschrieben sind, mangelt es dringend an Fachkräften, die für die effiziente Nutzung dieser Systeme ausgebildet sind. Kleine Betreiber haben Schwierigkeiten, von der Papierverfolgung auf die neuen digitalen Berichtsstandards umzustellen.
- Siloartige Ausbildung: Der IKT-Sektor in Kroatien ist zwar dynamisch, aber oft von der Schwerindustrie abgekoppelt. Ingenieure verstehen zwar die Materialeigenschaften von Stein (Tiefbau), verfügen jedoch oft nicht über die *erforderlichen* Datenkenntnisse, um Rückverfolgbarkeit zu implementieren oder digitale Bestände zu verwalten.
- Uneinheitliche Umsetzung: Zwar gibt es Vorzeigeprojekte, doch arbeitet der durchschnittliche Steinbruch oder Abbruchbetrieb nach wie vor mit traditionellen Methoden. Die Fähigkeiten, die erforderlich sind, um die Lücke zwischen einem Hightech-Zementwerk und einem kleinen Recyclinghof zu schließen, fehlen in den aktuellen Berufsbildungsprogrammen.

#### 4.4.3. Potenzial für die Integration von Prinzipien der Kreislaufwirtschaft

Kroatien bietet ein dynamisches Umfeld für rekonstruktionsorientierte Ausbildung, in dem RockChain als Instrument zum Kapazitätsaufbau dienen kann.



- Schulung zu Compliance und Rückverfolgbarkeit: Die RockChain-Lehrpläne sollten sich auf die praktische Anwendung der neuen digitalen C&D-Abfallregister konzentrieren. Wenn den Schülern beigebracht wird, wie sie Steinabfälle dokumentieren können, um sie in zertifiziertes Wiederaufbaumaterial umzuwandeln, schafft dies sofortige Beschäftigungsfähigkeit.
- Grenzüberschreitende Skalierung: Durch Projekte wie CircleAware und CrossWaste können in Kroatien entwickelte Ausbildungsmodule leicht auf benachbarte Nicht-EU-Länder (Bosnien und Herzegowina, Montenegro) übertragen werden. Dies positioniert Kroatien als regionalen Knotenpunkt für digitale Kreislaufwirtschaftskompetenzen auf dem Balkan.
- Hightech-Fallstudien: Das KOdeCO-Projekt bietet eine Fallstudie von Weltklasse für die Vermittlung der Prinzipien der industriellen Dekarbonisierung und der digitalen Prozesssteuerung. Die Integration dieser Fallstudie in die Lehrpläne würde den Studierenden die absolute Spitze der europäischen Mineralverarbeitungstechnologie näherbringen.

## 5. BEST PRACTICES

Dieses Kapitel wechselt von der Analyse zur Umsetzung und beleuchtet reale Fälle, in denen digitale Technologien die Abfallwirtschaft verbessern. Diese Beispiele bieten klare Lehren für den Ziersteinsektor und fließen in den RockChain-Lehrplan ein.

Wir konzentrieren uns auf drei Bereiche, in denen digitale Tools ihren Wert unter Beweis gestellt haben: IoT-Logistik, Verwertung von Bauabfällen und Schulung digitaler Kompetenzen. Diese Technologien zeigen, dass der „digitale Steinbruch“ keine Hypothese mehr ist, sondern ein funktionierendes Modell, das bereit für die Nachahmung ist.

### 5.1. BEWÄHRTE DIGITALE LÖSUNGEN

In ganz Europa entwickelt sich die Digitalisierung von Pilotprojekten hin zur großflächigen Umsetzung. Wir identifizieren drei bewährte Lösungen, die für den Steinsektor relevant sind:

#### IoT & intelligente Logistik (Effizienzebene)

Wichtige Tools: Füllstandssensoren, Wägezellen und Routenoptimierung.

- Sensoneo (Madrid): Über 11.000 Sensoren reduzieren die Sammelwege um ~20 %.
- SENS (H2020): Datengestütztes Routing reduziert CO<sub>2</sub>-Emissionen um bis zu 60 %.

Warum das wichtig ist: Dieser Ansatz lässt sich direkt auf Steinabfälle anwenden. Sensoren an Schlamm tanks oder Containern helfen dabei, Lkw-Routen zu optimieren und Überläufe zu vermeiden, was die Sicherheit verbessert und Kosten senkt.

#### Digitale Tools für CDW (Verwertungsstufe)

Wichtige Tools: Hyperspektrale Bildgebung (HSI), BIM, digitale Produktpässe.

- ICEBERG & RECONMATIC: Einsatz von KI zur Sortierung von Mineralfraktionen; BIM zur Verfolgung der Wiederverwendung.
- CityLoops: Verbindet Abbruch und Bauwesen über städtische Datenplattformen.

Warum das wichtig ist: Steinnebenprodukte müssen als wertvolle Baumaterialien behandelt werden. Tools wie DPPs bieten die erforderliche Rückverfolgbarkeit, um Zugang zu hochwertigen Märkten zu erhalten.

## EdTech & Blockchain (Kompetenzebene)

Wichtige Tools: E-Learning-Plattformen, Blockchain-basierte Fallstudien.

- BlockWASTE (Erasmus+): Vermittelt Blockchain anhand realer Abfallszenarien.
- EduZWaCE & Zero Waste Build: Einführung der Kreislaufwirtschaft in die berufliche Bildung.

Warum es wichtig ist: Technologie ist nur so nützlich wie die Menschen, die sie anwenden. Diese Projekte zeigen, wie digitale Kompetenzen mit praktischen, branchenspezifischen Tools vermittelt werden können.

## 5.2. LEHREN FÜR DEN STEINSEKTOR

Aus diesen Beispielen lassen sich fünf wichtige Erkenntnisse ableiten:

- Beginnen Sie mit KPIs, nicht mit Technologie: Installieren Sie keine Sensoren, bevor Sie nicht definiert haben, was gemessen werden soll (z. B. €/Tonne verarbeitet, kWh/Tonne).
- Behandeln Sie Abfall als Produkt: Tools wie DPPs und Labordaten sind für die Einhaltung gesetzlicher und marktbezogener Vorschriften unerlässlich.
- Interoperabilität ist unerlässlich: Systeme müssen Daten unternehmensübergreifend austauschen. Isolierte Lösungen scheitern.
- Regeln vor Code: Bei Blockchain ist Governance wichtiger als Technologie.
- Überbrücken Sie die „hybride“ Lücke: Die Branche braucht Fachleute, die sich sowohl mit Materialien als auch mit Datensystemen auskennen.

## 5.3. DIE STRATEGISCHE ROLLE VON ROCKCHAIN

Der digitale Wandel schafft einen echten Bedarf für RockChain. Sein Wert liegt darin, digitale Tools für den Steinsektor zugänglich, verständlich und praktisch zu machen:

### Ein risikofreies Testfeld

Echte Pilotprojekte sind teuer und riskant. RockChain fungiert als sicherer Simulator – Unternehmen und Studenten können IoT, Routing und Rückverfolgbarkeit testen, ohne den Betrieb zu stören oder Kapital zu investieren.

### Überbrückung der IT-Stein-Kluft

Digitale Teams und Steinbruchteams sprechen unterschiedliche Sprachen. RockChain integriert reale Materialparameter in digitale Arbeitsabläufe und hilft Anwendern so, sich sowohl in physischen als auch in digitalen Umgebungen zurechtzufinden.



---

### Vorbereitung auf Regulierung

Digitale Produktpässe und Gesetze zur Rückverfolgbarkeit von Abfällen stehen bevor. RockChain hilft dabei, Fachleute zu schulen, um diese Anforderungen bereits jetzt zu erfüllen, sodass die Einhaltung der Vorschriften Teil des täglichen Betriebs wird.

RockChain könnte mehr als nur ein Lernwerkzeug sein – es könnte ein strategischer Wegbereiter sein, der der Steinindustrie hilft, den digitalen Wandel durch praktische, risikoarme Schulungen auf der Grundlage realer Anwendungen zu vollziehen.

## 6. SCHLUSSFOLGERUNG

Eine Untersuchung der Abfallwirtschaft und der IT-Einführung in Spanien, Deutschland, Rumänien und Kroatien zeigt einen Sektor am Scheideweg. Mineral- und Bauabfälle dominieren in allen vier Ländern und stellen die Steinindustrie in den Mittelpunkt der europäischen Kreislaufwirtschaft. Doch obwohl die digitalen Werkzeuge vorhanden sind (IoT-Sensoren, KI-Sortierung, Drohnen), ist ihre Nutzung noch begrenzt. In den meisten kleinen und mittleren Unternehmen laufen Hightech-Pilotprojekte parallel zu traditionellen, papierbasierten Systemen.

Das Problem ist nicht die Technologie, sondern die Menschen. Es besteht eine deutliche Lücke zwischen den verfügbaren Innovationen und den Fähigkeiten, die für deren Anwendung im täglichen Betrieb erforderlich sind. Steinbruchmanagern und Anlagenbetreibern fehlt oft das hybride Know-how, um physische Prozesse (wie Schlammbehandlung oder Materialprüfung) mit digitalen Plattformen zu verbinden.

Was laut Best Practices in der EU funktioniert, ist die Konzentration auf Ergebnisse. Digitale Systeme sind dann erfolgreich, wenn sie zur Optimierung von KPIs wie Energieverbrauch oder Materialqualität beitragen – und nicht nur, wenn sie neue Gadgets hinzufügen. Für die Steinindustrie bedeutet dies einen Mentalitätswandel: Abfall sollte wie ein Produkt behandelt werden, mit Qualitätskontrollen und Rückverfolgbarkeit von Anfang an.

Hier hapert es an der Ausbildung. In Umweltkursen werden die Regeln vermittelt, aber nicht die Werkzeuge. Angesichts verschärfter Vorschriften (wie der deutschen EBV, dem spanischen Gesetz 7/2022 oder dem digitalen Produktpass der EU) wird das Wissen um die Datenmeldung genauso wichtig sein wie die Kenntnis der Gesetze. Die derzeitige Ausbildungslandschaft bereitet die Arbeitnehmer nicht auf diesen Wandel vor.

Auch bei der Gestaltung der Ausbildung gibt es Diskrepanzen. IT-Studenten lernen selten etwas über industrielle Werkstoffe, und Ingenieurstudenten kommen selten mit digitalen Systemen in Berührung. Länder wie Rumänien und Kroatien bauen zwar schnell digitale Infrastrukturen auf, aber es fehlen ihnen die Techniker, um diese zu betreiben und zu warten. Dadurch besteht die reale Gefahr, dass High-End-Systeme ungenutzt bleiben.

Die Steinindustrie braucht keine neuen Technologien, sondern bessere Möglichkeiten, diese Technologien mit den Problemen der realen Welt zu verbinden. Hier kann RockChain einen Unterschied machen: als Übersetzer und Testfeld. Durch die Simulation realistischer Szenarien in Steinbrüchen mit digitalen Tools trägt es dazu bei, Risiken zu reduzieren, Vertrauen aufzubauen und eine neue Art von Fachkräften auszubilden – Fachkräfte, die Steinabfälle in zertifiziertes, wertvolles Material verwandeln können.



## 7. QUELLEN

- acatech. (2024). *Digitale Wegbereiter der Kreislaufwirtschaft*. Nationale Akademie der Wissenschaften und Ingenieurwissenschaften.  
<https://en.acatech.de/publication/digital-enablers-of-the-circular-economy>
- acatech – Nationale Akademie der Wissenschaften und Ingenieurwissenschaften. (2024). *Initiative Kreislaufwirtschaft: Digitale Werkzeuge für die Kreislaufwirtschaft*.  
<https://www.circular-economy-initiative.de/>
- Afonso, P., Azzalini, A., Faria, P., Lopes, L., Martins, R., Mourão, P. & Pires, V. (2023). Mörtel auf Basis von Schlamm aus der Verarbeitung von Karbonat-Naturwerksteinen – Ein experimenteller und machbarkeitsorientierter Ansatz. In *Geo-Resilience* 2023. Universidade de Évora.  
<https://dspace.uevora.pt/rdpc/handle/10174/36859>
- Alsayed, A., Bennis, S., & Abdou, A. (2023). Stockpile volume estimation in open and confined environments: A comprehensive review. *Drones*, 7(8), 537.  
<https://www.mdpi.com/2504-446X/7/8/537>
- Amaral, L. F., et al. (2020). Umweltfreundliche Mörtel mit Zusatz von Ziersteinabfällen – Ein mathematischer Modellansatz zur granulometrischen Optimierung. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119283. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119283>  
[papers.ssrn.com](https://papers.ssrn.com)
- ANEFA und DigiEcoQuarry Consortium. (2025). *DigiEcoQuarry: Innovative digitale nachhaltige Zuschlagstoffsteinbrüche der Zukunft (Projekt 101003750)*. CORDIS, Europäische Kommission. <https://cordis.europa.eu/project/id/101003750>
- Barbir, J., & Dabić, A. (2024). Bauabfallwirtschaft in Kroatien. *Kemija u industriji*, 73(1–2), 57–64. <https://hrcak.srce.hr/file/452586>
- Bassi, F., & Guidolin, M. (2021). Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft in europäischen KMU: Untersuchung der Rolle von grünen Arbeitsplätzen und Kompetenzen. *Nachhaltigkeit*, 13(21), 12136.  
<https://doi.org/10.3390/su132112136>
- Berg, H., Sebestyén, J., Bendix, P., Le Blevenec, K., & Vrancken, K. (2020). *Digitale Abfallwirtschaft*. Eionet-Bericht – ETC/WMGE 2020/4. Europäisches Themenzentrum für Abfall und Materialien in einer grünen Wirtschaft.  
<https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-wmge/products/etc-wmge-reports/digital-waste-management>
- Bigbelly. (2013). *Hamburg setzt das intelligente Abfallmanagementsystem von Bigbelly ein*. <https://bigbelly.com/news/hamburg-deploys-bigbellys-smart-waste-management-system> Bigbelly Waste Management Solutions

- Bigbelly / Newham Council. (2020). *Intelligente Solar-Abfallbehälter von Bigbelly erobern Newham, London*. <https://aclima.eus/en/noticia/bigbelly-solar-smart-bins-crushing-it-in-newham-london>
- Bigbelly / Smart Dublin. (2021). *Smart Dublin-Projekt setzt Bigbelly-Abfallbehälter in den Docklands ein*. <https://bigbelly.com/news/smart-dublin-project-deploys-bigbelly-bins-in-the-docklands>
- BlockWASTE Consortium. (2020–2023). *BlockWASTE – Innovative Schulung auf Basis der Blockchain-Technologie für die Abfallwirtschaft (Erasmus+-Projekt 2020-1-EL01-KA203-079154)*. <https://blockwasteproject.eu> Nachhaltiges Griechenland
- BMUV. (2023). *Abfallwirtschaft in Deutschland 2023 – Fakten, Daten, Zahlen*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. [https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Pool/Broschueren/abfallwirtschaft\\_2023\\_en\\_bf.pdf](https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/abfallwirtschaft_2023_en_bf.pdf)
- BMUV (Bundesministerium für Umwelt). (2023). *Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung (EBV)*. <https://www.bmuv.de/en/law/substitute-building-materials-ordinance>
- BMUV. (2024). *Die Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie – Zusammenfassung*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. [https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Abfallwirtschaft/nkws\\_zusammenfassung\\_en\\_bf.pdf](https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/nkws_zusammenfassung_en_bf.pdf)
- BMUV (Bundesministerium für Umwelt). (2024). *Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS)*. <https://www.bmuv.de/en/topic/water-resources-waste/circular-economy/national-circular-economy-strategy>
- BOE (Boletín Oficial del Estado). (2022). *Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular*. <https://www.boe.es/eli/es/l/2022/04/08/7>
- Borchard, R., Zeiss, R., & Recker, J. (2022). Digitalisierung der Abfallwirtschaft: Erkenntnisse aus deutschen privaten und öffentlichen Abfallwirtschaftsunternehmen. *Waste Management & Research*, 40(6), 775–792. <https://doi.org/10.1177/0734242X211029173>
- Bułkowska, K., Gajewska, M., & Co-Autoren. (2024). Blockchain-basiertes Management von recycelbaren Kunststoffabfällen. *Energies*, 17(12), 2937. <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/12/2937>
- CIRCUIT-Konsortium. (2023). *Kreislaufwirtschaftliches Bauen in regenerativen Städten (CIRCUIT)*. <https://www.circuit-project.eu>

- CIRPASS. (2024). *CIRPASS – Digitaler Produktpass*. <https://cirpassproject.eu>
- CIRPASS-Konsortium. (2024). *Der digitale Produktpass (DPP) für die Kreislaufwirtschaft: Empfehlungen für Politik, Wirtschaft und IT*. CIRPASS-Konsortium. [https://cirpassproject.eu/wp-content/uploads/2024/05/CIRPASS\\_The-DPP-for-the-Circular-Economy-Recommendations-for-policy-business-and-IT\\_v12.pdf](https://cirpassproject.eu/wp-content/uploads/2024/05/CIRPASS_The-DPP-for-the-Circular-Economy-Recommendations-for-policy-business-and-IT_v12.pdf)
- CIRPASS-2. (2025). *CIRPASS-2 – Digitaler Produktpass für zirkuläre Wertschöpfungsketten*. <https://cirpass2.eu>
- CityLoops-Konsortium. (2023). *CityLoops – Schließung des Kreislaufs für städtische Materialflüsse*. <https://cityloops.eu>
- datos.gob.es. (2024). *Entdecken Sie den digitalen Produktpass (DPP) und CIRPASS: Ein Blick in die Zukunft der Kreislaufwirtschaft*. <https://datos.gob.es/en/blog/discovering-digital-product-passport-dpp-and-cirpass-look-future-circular-economy>
- DDC-Konsortium. (2024). *Digital Deconstruction – Kreislaufwirtschaftliche Sanierung und Rückbau in der Praxis*. <https://vb.nweurope.eu/projects/project-search/digital-deconstruction>
- DFKI (Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz). (2025). *SmartRecycling-Up: KI-basierte Sortierung von Sperrmüll*. <https://www.dfki.de/en/web/research/projects-and-publications/project/smartrecycling-up>
- Dierks, C., Schultmann, F., & Göswein, V. (2024). *Konsequente Lebenszyklusanalyse der Abbruchabfallwirtschaft in Deutschland*. *Frontiers in Sustainability*, 5, 1417637. <https://doi.org/10.3389/frsus.2024.1417637>
- EduZWaCE-Konsortium. (2024). *EduZWaCE – Bildung für Null Abfall und Kreislaufwirtschaft*. <https://www.eduzwace.eu>
- Europäische Kommission. (2023). *Rumäniens Aufbau- und Resilienzplan*. [https://commission.europa.eu/business-economy-euro/economic-recovery/recovery-and-resilience-facility/romaniyas-recovery-and-resilience-plan\\_en](https://commission.europa.eu/business-economy-euro/economic-recovery/recovery-and-resilience-facility/romaniyas-recovery-and-resilience-plan_en)
- Europäische Kommission und rumänische Regierung. (2022). *Strategie für die Kreislaufwirtschaft in Rumänien*. GD Reform – Instrument für technische Unterstützung. [https://reform-support.ec.europa.eu/system/files/2023-12/CE%20Strategy%20RO\\_18072022\\_Final\\_EN.pdf](https://reform-support.ec.europa.eu/system/files/2023-12/CE%20Strategy%20RO_18072022_Final_EN.pdf)
- Europäische Umweltagentur (EUA). (2021). *Abfall und Kreislaufwirtschaft – Indikatoren*. Europäische Umweltagentur. <https://www.eea.europa.eu/themes/waste/indicators>

- Europäische Umweltagentur (EEA). (2024). *Abfallrecycling in Europa*. Europäische Umweltagentur. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/waste-recycling-in-europe>
- Europäische Umweltagentur (EEA). (2024). *Europas Kreislaufwirtschaft in Fakten und Zahlen*. EEA-Briefing. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/europes-circular-economy-in-facts>
- Europäische Umweltagentur (EEA). (2024). *Länderprofile zur Abfallvermeidung 2025 – Kroatien: Faktenblatt zur Abfallvermeidung 2024*. Europäische Umweltagentur. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/country-profiles-on-waste-prevention-2025>
- Europäische Umweltagentur (EEA). (2025). *Gesamtabfallaufkommen – Kroatien (Europas Umwelt 2025 – Länderprofil)*. Europäische Umweltagentur. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/europes-environment-country-profiles/total-waste-generation>
- Europäische Umweltagentur (EEA). (März 2025). *Länderprofil Abfallwirtschaft – Rumänien: Länderprofil zur Abfallwirtschaft mit Schwerpunkt auf Siedlungsabfällen und Verpackungsabfällen*. Europäische Umweltagentur. <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/waste-and-recycling/municipal-and-packaging-waste-management-country-profiles-2025/ro-municipal-waste-factsheet.pdf>
- Europäisches Parlament. (21. März 2024). *Nachhaltige Abfallwirtschaft: Was die EU unternimmt*. <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20180328STO00751/sustainable-waste-management-what-the-eu-is-doing>
- Eurostat. (2024). *Abfallstatistik – Statistik erklärt (EU-27, Daten für 2022)*. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics)
- FRD Center. (2022). *Chancen der Digitalisierung und Industrie 4.0 in Rumänien 2022*. FRD Center Market Entry Services. <https://www.frdcenter.ro/wp-content/uploads/2022/08/Opportunities-in-digitization-and-industry-4.0-in-Romania.pdf>
- FRD Center. (2023). *Chancen der Digitalisierung und Industrie 4.0 in Rumänien*. FRD Center Market Entry Services. <https://www.frdcenter.ro/wp-content/uploads/2023/04/Opportunities-in-Digitisation-and-Industry-4.0-in-Romania-FRD-Center-Market-Entry-Services.pdf>
- Gehlot, M. R., & Shrivastava, S. (2023). Nutzung von Steinabfällen bei der Entwicklung von nachhaltigem Mörtel: Eine Übersicht über den aktuellen Stand der Technik.

Materials Today: Proceedings, 80, 1688–1696.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.325>

Regierung Rumäniens. (2017). *Planul Național de Gestionare a Deșeurilor (PNGD)*. Ministerul Mediului.  
[https://www.mmediu.ro/app/webroot/uploads/files/PNGD\\_vers5.pdf](https://www.mmediu.ro/app/webroot/uploads/files/PNGD_vers5.pdf)

Regierung Rumäniens. (2018). *Planul Național de Gestionare a Deșeurilor (Nationaler Abfallbewirtschaftungsplan)*. Regierung Rumäniens.  
<https://anpm.ro/documents/16755/42624324/Planul+National+de+Gestionare+a+Deseurilor.pdf>

Regierung Rumäniens. (2022). *Strategia Națională privind Economia Circulară (AS-IS-Bericht und ROCES 2030)*. Departamentul pentru Dezvoltare Durabilă.  
<https://dezvoltaredurabila.gov.ro/circular-economy>

Himmy, O., Nguyen, T. T., Vazhacharickal, P. J. und Buerkert, A. (2025). Überwachung von Granitsteinbrüchen mithilfe von Deep Learning und UAV-Fotogrammetrie in Bengaluru, Indien. *PLOS ONE*, 20(11), e0334493.  
<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0334493>

HISER-Konsortium. (2019). *Ganzheitliche innovative Lösungen für ein effizientes Recycling und die Rückgewinnung wertvoller Rohstoffe aus komplexen Bau- und Abbruchabfällen (HISER)*. <https://cordis.europa.eu/project/id/642085>

ICEBERG-Konsortium. (2024). *ICEBERG – Innovative Lösungen auf Basis der Kreislaufwirtschaft, die die effiziente Rückgewinnung wertvoller Materialressourcen aus ausgedienten Baumaterialien demonstrieren*. <https://iceberg-project.eu>

ICEBERG-Konsortium. (2025). *ICEBERG: Innovative Kreislaufwirtschaft auf der Grundlage fortschrittlicher Rückgewinnung und Sortierung*. CORDIS Europäische Kommission.  
<https://cordis.europa.eu/project/id/869336>

IGME-CSIC. (2017). *Los laboratorios del IGME*. Instituto Geológico y Minero de España – CSIC.  
[https://web.igme.es/servicios/labora\\_3C/CartaSer/Los%20Laboratorios%20del%20IGME.pdf](https://web.igme.es/servicios/labora_3C/CartaSer/Los%20Laboratorios%20del%20IGME.pdf)

Interreg CENTRAL EUROPE. (2025). *Analyse der regionalen S3-Strategien für Kreislaufwirtschaft und nachhaltige Produktentwicklung* (Abschnitt 2.3: Kroatien). Interreg CENTRAL EUROPE. <https://www.interreg-central.eu/wp-content/uploads/2025/03/Analysis-of-S3-regional-strategies.pdf>

Interreg VI-A IPA Kroatien–Bosnien und Herzegowina–Montenegro. (2025). *CircleAware: Sensibilisierung und Beschleunigung des Übergangs zur Kreislaufwirtschaft* (Projekt HR-BA-ME00025). keep.eu.  
<https://keep.eu/projects/29425>



- Iyiola, C. O., Shakantu, W., & Daniel, E. I. (2024). Digitale Technologien zur Förderung des Managements von Bau- und Abbruchabfällen: Eine systematische Übersicht. *Buildings*, 14(10), 3234. <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/10/3234>
- Kabugo, J. C., Jämsä-Jounela, S.-L., Schiemann, R., & Binder, C. (2020). Industrie 4.0-basierte Plattform zur Prozessdatenanalyse: Eine Fallstudie zu einer Müllverbrennungsanlage. *Internationale Zeitschrift für elektrische Energie und Energiesysteme der* . <https://aaltodoc.aalto.fi/items/0b69cd0c-4a29-44fd-b67c-c6237df3580e>
- Kannan, D., et al. (2024). Intelligentes Abfallmanagement 4.0: Der Übergang von einer systematischen Überprüfung zu einem integrierten Rahmenwerk. *Abfallwirtschaft*, 174, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.08.041>
- Khan, S., Ali, B., Alharbi, A. A. K., Alotaibi, S., & Alkhathami, M. (2024). Effiziente IoT-gestützte Abfallsammlung für urbane Smart Cities. *Sensoren*, 24(10), 3167. <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/10/3167>
- Kokamägi, K., Türk, K. und Liba, N. (2020). UAV-Fotogrammetrie für Volumenberechnungen: Vergleich mit RTK-GNSS und TLS. *Agronomy Research*, 18(3), 2087–2102. [https://dspace.emu.ee/bitstream/10492/6206/4/AR2020\\_Vol18No3\\_Kokamagi.pdf](https://dspace.emu.ee/bitstream/10492/6206/4/AR2020_Vol18No3_Kokamagi.pdf)
- Kovanič, Ľ., Greif, V., & Kučera, M. (2023). Review of photogrammetric and LiDAR applications of UAVs in surveying. *Applied Sciences*, 13(11), 6732. <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/11/6732>
- Kreislaufwirtschaft Bau. (2024). *Mineralische Bauabfälle – Monitoring 2022: Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2022*. Kreislaufwirtschaft Bau. <https://www.kreislaufwirtschaft-bau.de/baustoffindustrie.de>
- Lenz, R., et al. (2021). Innovative training based on Blockchain technology applied to waste management – BLOCKWASTE. SSRN. [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=3912646](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3912646)
- LIPOR. (2025). *AI4Waste – Künstliche Intelligenz für die Vermeidung und Bewirtschaftung organischer Abfälle*. <https://www.lipor.pt/pt/inovar/projetos-financiados/erasmus-ai4waste>
- Maciel, R. R., et al. (2025). Der Einfluss der IoT-gestützten Routenoptimierung auf die Entfernungen bei der Abfallsammlung: Eine systematische Überprüfung und Metaanalyse. *Machines*, 13(4), 161. <https://www.mdpi.com/2305-6290/13/4/161>
- Manshoven, S., & Gillabel, J. (2021). Lernen durch Spielen: Ein Serious Game als Instrument zur Förderung der Bildung im Bereich Kreislaufwirtschaft und zur



Innovation von Geschäftsmodellen. *Nachhaltigkeit*, 13(23), 13277.  
<https://doi.org/10.3390/su132313277>

Ministerium für Wirtschaft und nachhaltige Entwicklung. (2023). *Abfallwirtschaftsplan der Republik Kroatien für den Zeitraum 2023–2028 (Amtsblatt 84/23)*. Regierung der Republik Kroatien. <https://perma.cc/5W2Z-5KRF>

MITECO (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico). (2020). *España Circular 2030. Estrategia Española de Economía Circular*.  
<https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/estrategia.html>

MITECO. (2024). *Proyecto Estratégico para la Recuperación y Transformación Económica (PERTE) de Economía Circular*. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/perte-en-ec.html>

Moreira, P. I., et al. (2022). Ornamental stone processing waste incorporated in the production of mortars. *Sustainability*, 14(10), 5904. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/10/5904>

Năstase, C., Tănase, G. L., & Ionescu, A. M. (2019). Kommunale Abfallwirtschaft in Rumänien im Kontext der EU. *Technologische und wirtschaftliche Entwicklung der Wirtschaft*, 25(5), 1113–1131.  
<https://journals.vilniustech.lt/index.php/TEDE/article/download/10295/8890>

NetZeroCities. (2024). *Cluj-Napoca: Pilotstadtprofil – Digitale Zwillinge für Klimaneutralität*. <https://netzerocities.eu/pilot-cities/>

Onur, N. (2024). Digitalisierung und digitale Anwendungen im Abfallrecycling. *Nachhaltigkeit*, 16(17), 7379. <https://doi.org/10.3390/su16177379>

RECONMATIC-Konsortium. (2023). *RECONMATIC – Automatisierte Lösungen für eine nachhaltige und kreislauffähige Bau- und Abbruchabfallwirtschaft*.  
<https://www.reconmatic.eu>

Roba, J., Kuppens, T. E., Janssens, L., Smeets, A., Manshoven, S., & Struyven, K. (2021). Serious Games in der Sekundarstufe zur Einführung der Kreislaufwirtschaft: Erfahrungen mit dem Spiel ecoCEO. *Frontiers in Sustainability*, 2, 690232.  
<https://doi.org/10.3389/frsus.2021.690232>

Sensoneo. (2023). *Europas größte intelligente Abfallanlage in Madrid in Betrieb genommen*. <https://sensoneo.com/europes-largest-smart-waste-installation-in-madrid>

Sensoneo. (2024). *Groß angelegter Einsatz intelligenter Abfallentsorgung in Madrid: Fallstudie*. <https://sensoneo.com/references/madrid-spain/>

- SMS Consortium. (2022). *S.M.S. – Intelligentes Abfallmanagement für intelligentere Cluster-Schulen (Erasmus+-Projekt 2020-1-RO01-KA229-079971)*. <https://sms-erasmus.cnlr.ro>
- Sosunova, I., & Porras, J. (2022). IoT-fähige intelligente Abfallwirtschaftssysteme für intelligente Städte: Eine systematische Übersicht. *IEEE Access*, 10, 73326–73363. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9815251>
- Street. (2025). *Fuengirola auf dem Weg zu einer intelligenteren, nachhaltigeren Stadt*. <https://www.futurestreet.com/fuengirola-moves-toward-a-smarter-more-sustainable-city>
- Voukkali, I., Papamichael, I., Loizia, P., Zorpas, G., & Zorpas, A. A. (2023). Abfallkennzahlen im Rahmen der Kreislaufwirtschaft. *Science of the Total Environment*, 866, 161154. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37602734>
- Weltbank. (2022). *Kreislaufwirtschaftsansätze in der Abfallwirtschaft – Kroatien (P176636)*. Weltbankgruppe. <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/099700410112212044/p1766360f782e309083e900cf5f56b1a2a6>
- Weltbank. (2022). *Kreislaufwirtschaftliche Bauabfallbewirtschaftung in Kroatien: Vom Rohstoff zum Abfall und zurück*. Weltbankgruppe. <https://www.worldbank.org/en/news/feature/2022/07/06/circular-construction-waste-management-in-croatia-from-raw-material-to-waste-and-back>
- Weltbank. (2023). *Kroatien: Entwicklung eines Aktionsplans für Kreislaufwirtschaft im Bereich Bau- und Abbruchabfälle – CE-Aktionsplan und seine Roadmap / Analyse vorrangiger Maßnahmen*. Weltbank. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099200312132233388/pdf/P173141085f27a0490af1302f2b0f6d1701.pdf>
- Zhao, W., et al. (2025). Anwendung digitaler Technologien im Bauabfallmanagement: Ein wissenschaftlicher Mapping-Ansatz. *Journal of Environmental Management* (im Druck). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479724035461>

### Quellenangaben zu den Abbildungen

- Abbildung 1. Grunver. *Pasaporte digital de producto (DPP)*. <https://grunver.com/pasaporte-digital-de-producto-dpp-grunver/>
- Abbildung 2. Eurostat. *Abfallstatistik*. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics)

Abbildung 3. KPMG Origins. *KPMG Origins – vertrauenswürdige Datenplattform.*  
<https://kpmgorigins.com/>

Abbildung 4. Exceed ICT. *Intelligentes Abfallmanagement.* <https://exceedict.com/smart-waste-management/>

Abbildung 5. Universität Aalborg. *Green Deal oder No Deal? Die EU am Scheideweg des Klimaschutzes.* <https://www.ssh.aau.dk/green-deal-or-no-deal-the-eu-s-climate-crossroads-e145771>

Abbildung 6. European Future Citizens. *Was ist die doppelte Transformation?*  
<https://www.europeanfuturecitizens.eu/what-is-the-twin-transition/>

Abbildung 7. BlockWASTE-Projekt. *Projektübersicht.* <https://blockwasteproject.eu/es/>

Abbildung 8. DigiEcoQuarry-Projekt. *Projektübersicht.* <https://digiecoquarry.eu/>

Abbildung 9. Sensoneo. *Intelligente Lösungen für die Abfallwirtschaft.*  
<http://sensoneo.com/>

Abbildung 10. ICEBERG-Projekt. *Fallstudien.* <https://iceberg-project.eu/case-studies/>

Abbildung 11. Holcim Rumänien. *Servicii de construcții și soluții circulare.*  
<https://www.holcim.ro/ro/servicii>

Abbildung 12. Europäische Union. *Interreg VI-A IPA – erste genehmigte Projekte (Kroatien–Bosnien und Herzegowina–Montenegro).* <https://www.eu.me/en/the-first-9-projects-within-the-interreg-vi-a-ipa-program-croatia-bosnia-and-herzegovina-montenegro-have-been-approved/>

Abbildung 13. Holcim Kroatien. *KOdeCO-Netto-Null-Projekt.*  
<https://www.holcim.hr/KOdeCO-net-zero>